

Construction modulaire

## L'émergence des mini-centrales

Au facteur d'échelle favorable aux grandes puissances, les petits réacteurs modulaires répondent par d'autres atouts :

- Une fabrication et des essais réalisés en usine, gages d'une meilleure qualité de réalisation, d'une diminution des durées de montage sur site et d'une déconstruction facilitée. Ils reposent sur une conception et une fabrication modulaires des installations des parties nucléaire et classique. Chaque module est transportable par voie terrestre ou maritime pour être assemblé sur site. Cette approche est largement appliquée dans le domaine de la construction navale. La fabrication modulaire concerne aussi le génie civil.
- Une architecture intégrée du réacteur, tirant profit de la modularité et présentant des avantages sur le plan de la sûreté. La cuve du réacteur rassemble le cœur, les générateurs de vapeur, le pressuriseur et les pompes primaires, supprimant ainsi les boucles primaires.
- Un investissement réduit, donc moins risqué, et éventuellement progressif, rendant ainsi accessible le nucléaire à de nouveaux acteurs aux capacités financières limitées.

## Les réacteurs nucléaires de faible puissance (SMR)

### UNE NOUVELLE FILIÈRE POUR LE NUCLÉAIRE ?

L'énergie nucléaire s'est développée dans le monde sur deux axes répondant à des besoins bien spécifiques : celui de la production massive d'électricité et celui de la propulsion navale militaire, principalement les sous-marins. Le nombre de réacteurs et la technologie employée dans les deux secteurs sont voisins, quelques centaines et pour l'essentiel des réacteurs à eau pressurisée (REP) mais les puissances unitaires sont très différentes : de l'ordre de 1000 MWe pour le premier et limitées à l'équivalent de quelques dizaines de mégawatts électriques pour le second. En effet, bien que le développement de l'électricité nucléaire ait pour origine les petits réacteurs, une tendance générale vers les réacteurs de plus grande puissance a suivi, en raison d'une économie d'échelle liée à la taille des installations.



Sous-marin nucléaire

Pourtant, depuis quelques temps, plusieurs pays concepteurs de réacteurs envisagent de développer une offre de centrales électriques dans une gamme de puissance inférieure à 200 MWe. Ces réacteurs autorisent des conceptions plus compactes et modulaires : ce sont les petits réacteurs modulaires ou SMR (Small Modular Reactor).

### La position d'EDF

La France est reconnue dans le monde entier pour sa filière nucléaire d'excellence. Elle appartient en outre au club très fermé des concepteurs et exploitants de réacteurs de propulsion navale. Ainsi, un consortium réunissant le CEA, AREVA, DCNS et EDF s'est légitimement interrogé sur la pertinence du développement des SMR et a conclu positivement à l'issue d'une étude de faisabilité technique et économique sur 2012-2014.

**Annie DIET, chef du projet SMR à EDF R&D.**

## SMALL IS BEAUTIFUL : LA NOUVELLE VOIE DE L'INDUSTRIE NUCLÉAIRE ?

# Les SMR, des réacteurs bien intégrés

L'approvisionnement en énergie compte parmi les enjeux politiques, économiques et écologiques décisifs pour l'avenir de la planète au XXI<sup>e</sup> siècle. La satisfaction de la demande énergétique mondiale et le respect des objectifs internationaux de lutte contre le changement climatique imposent de développer des énergies décarbonées. Le nucléaire apparaît ainsi comme un élément indispensable du mix énergétique du futur.

### Le financement, un avantage clé pour le SMR

L'accès au nucléaire a été intimement lié au poids économique des pays, leur PIB. Les pays ayant développé l'option nucléaire ont un PIB dépassant 200 milliards de dollars. La mondialisation et la libéralisation des échanges commerciaux ont considérablement redessiné la répartition des richesses, et de nouveaux pays atteignent désormais des PIB intermédiaires - de 40 à 200 milliards de dollars - insuffisants pour financer des réacteurs de forte puissance. Ce niveau de ressource, dans la mesure où le marché de l'électricité n'est pas morcelé entre exploitants à faible poids, pourrait permettre des investissements limités, de l'ordre du milliard d'euro par réacteur, niveau visé par les réacteurs de faible puissance. Ces pays à richesse intermédiaire et ayant manifesté leur intérêt pour le recours à l'énergie nucléaire sont appelés les « primo-accédants ». Il en est de même pour les « pays riches » dont le marché de l'électricité est morcelé et dont certains exploitants, du fait d'une capacité d'investissement trop faible, ne peuvent accéder au nucléaire de grande puissance. Les Etats-Unis appartiennent à cette catégorie de pays et s'intéressent aux SMR pour participer au renouvellement de leur parc de production des centrales à

charbon. Les compagnies d'électricité de taille moyenne, dans des pays déjà dotés de l'énergie nucléaire ou ayant la volonté d'y accéder et soucieux d'équilibrer leur mix énergétique, pourraient trouver un intérêt aux réacteurs de faible puissance.



Centrale nucléaire de Belleville

### Les petits réacteurs complémentaires des grands

Les petits réacteurs ne sont pas concurrents des grands réacteurs mais complémentaires. Ils se positionnent sur des segments de marché pour lesquels les grands ne sont pas adaptés. C'est le cas des pays ou régions ayant un réseau électrique peu robuste ou isolé. D'autres usages s'offrent en outre aux petits réacteurs du fait de leur possible implantation à proximité des besoins : cogénération, dessalement d'eau de mer, production d'hydrogène, dans des régions isolées où les applications non-électriques sont aussi importantes que l'électricité ; ce segment représente cependant un marché de niche et dont la compétitivité économique reste encore à évaluer.

## REPÈRES

**1954** : le Nautilus, premier sous-marin à propulsion nucléaire (General Dynamics, Etats-Unis).

**1957** : le réacteur de Shippingport, premier réacteur nucléaire de type REP d'une puissance de 60 MWe (Westinghouse, Etats-Unis).

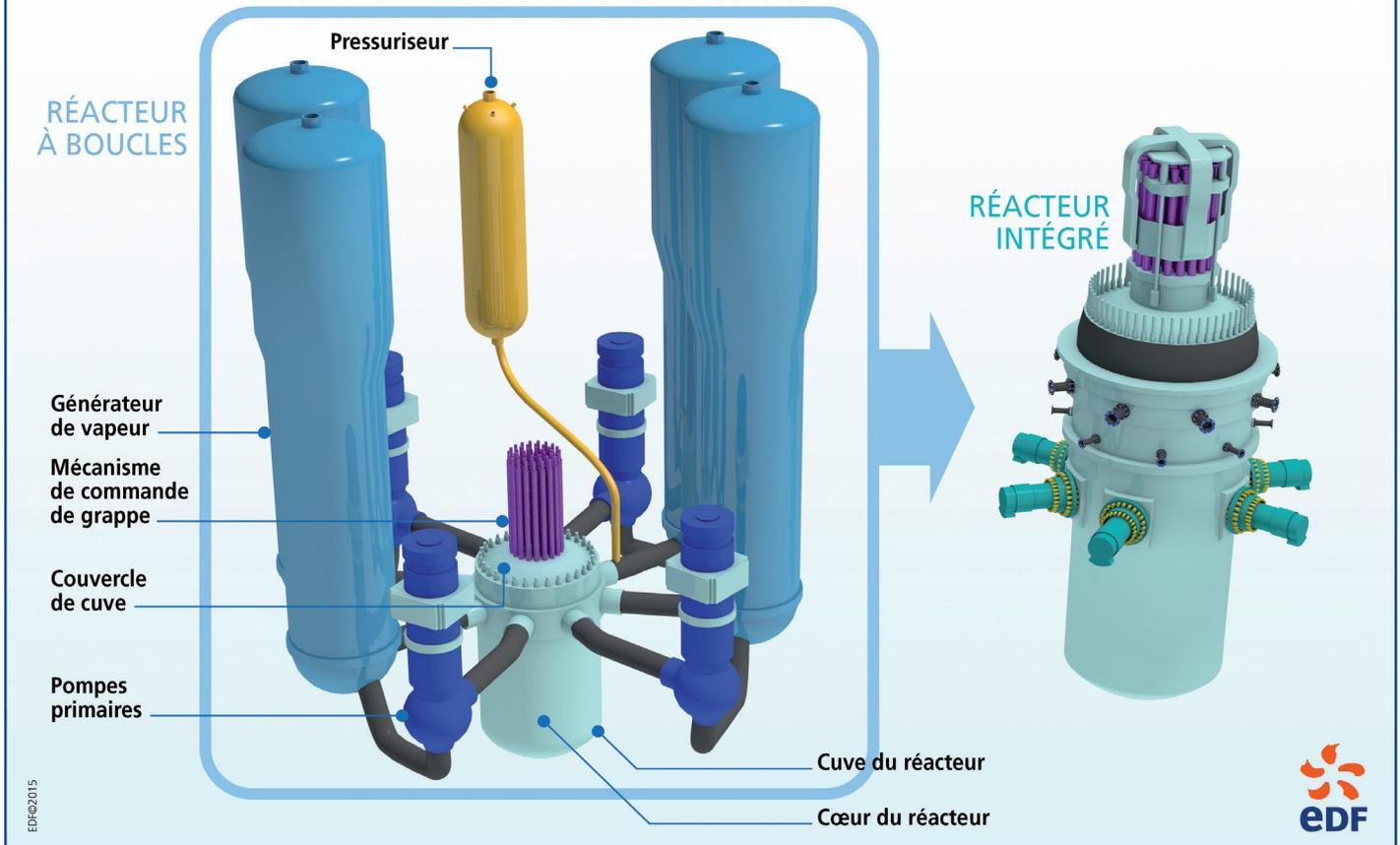
**1964** : le PAT « prototype à terre » de réacteur de propulsion nucléaire pour sous-marin. Il préfigure la chaufferie du Redoutable, premier sous-marin nucléaire lanceur d'engins (SNLE) de la Marine Nationale, admis au service actif en décembre 1971.

**1967** : mise en service à Chooz de la première centrale nucléaire française de type REP d'une puissance de 300 MWe.

**1975** : la CAP « chaufferie avancée prototype ». Plus compacte que le PAT, cette chaufferie va permettre à la France de construire les plus petits sous-marins nucléaires du monde : les sous-marins nucléaires d'attaque (SNA).

**1977-1999** : connexion au réseau des 58 tranches du parc nucléaire français ; les puissances installées ont été successivement : 900, 1300 et 1400 MWe.

## SMR : DU RÉACTEUR À BOUCLES AU RÉACTEUR INTÉGRÉ



### LE SAVIEZ-VOUS ?

**Le développement des réacteurs intégrés s'insère assez naturellement dans la continuité de celui des réacteurs de propulsion navale, pour lesquels seul le pressuriseur est installé à l'extérieur de la cuve. Ces réacteurs fonctionnent sans bore soluble, ce qui simplifie les systèmes auxiliaires et l'exploitation, et diminue le volume des effluents. Mais leur transposition directe aux SMR ne peut s'envisager du fait de leur taille et des conditions de services à satisfaire très différentes.**

### Les avantages de l'architecture intégrée au niveau de la sûreté

Les projets de SMR les plus matures dans le monde sont des réacteurs à eau pressurisée, appartenant à la catégorie des réacteurs nucléaires de troisième génération. A la différence des réacteurs de grande puissance, la taille des SMR autorise une architecture intégrée, ce qui conduit à la suppression des boucles primaires, dont la rupture est un initiateur d'accidents dans l'analyse de sûreté (perte de réfrigérant primaire). La compacité associée à cette architecture intégrée favorise une large réalisation en usine, augmentant la qualité de réalisation et réduisant les durées de travaux sur site. Elle permet d'adopter des systèmes de sauvegarde passifs pour l'évacuation de la puissance résiduelle. Ceux-ci utilisent très largement la gravité ou la circulation naturelle mise en œuvre par un chauffage du fluide primaire en zone basse et un refroidissement en zone haute. La différence de densité crée un mouvement du fluide, donc un écoulement. Ces systèmes passifs fonctionnent sans intervention humaine

pendant plusieurs jours et ne nécessitent aucune source d'énergie externe, ce qui présente un avantage significatif au plan de la sûreté. Bénéficiant d'une circulation naturelle en fonctionnement normal, certains concepts vont même jusqu'à voir disparaître les pompes primaires. Les caractéristiques des petits réacteurs modulaires - faible puissance associée à une cuve de grande dimension - garantissent le maintien du corium en cuve en cas d'accident grave avec fusion du cœur, éliminant ainsi le besoin d'un récupérateur de corium, requis sur l'EPR. Le pilotage du réacteur uniquement avec les grappes de contrôle, c'est-à-dire sans bore soluble, élimine les risques de criticité par dilution intempestive. Déjà maîtrisée sur les réacteurs de propulsion navale, cette option technique offre une simplification du système de traitement des effluents. Enfin, la gamme de puissance de ces petits réacteurs modulaires rend possible une conception du bâtiment réacteur partiellement ou entièrement enterré, réduisant la vulnérabilité aux agressions externes (chutes d'avions...).

## Perspectives

Afin de compenser l'effet d'échelle défavorable aux SMR, des leviers économiques sont à identifier et analyser, à commencer par l'effet de série. Une fabrication modulaire en usine suppose un outil industriel dédié, rentable uniquement si le SMR est conçu de façon standard et produit en série.

### L'effet de série, clé de la compétitivité des SMR

Les gains d'une fabrication en série en usine ont été estimés par les chantiers navals. La règle communément admise est celle du « 1 – 3 – 8 » : une tâche réalisée en usine dans un atelier spécifique demande 3 fois plus de temps sur un chantier dédié de pré-assemblage et 8 fois plus de temps à bord d'un navire. Même si les contraintes sur un site classique sont moindres qu'à bord d'un navire, les gains d'une fabrication en usine semblent évidents. Ces gains s'apprécient sur le coût de construction d'un SMR.

### La certification au niveau international est essentielle

Les SMR présentent des spécificités de conception et de construction par

rapport aux réacteurs de puissance, comme le niveau de puissance, le terme source, l'architecture intégrée, la fabrication modulaire et la qualification en usine. Ces spécificités pourraient faciliter la réponse à certaines exigences de sûreté, mais aussi demander des adaptations de la réglementation. La NRC (autorité de sûreté américaine) développe d'ailleurs un référentiel spécifique adapté aux SMR.

La recherche d'une harmonisation internationale du cadre réglementaire, comme c'est le cas dans le domaine aéronautique, présenterait un intérêt réel. Elle serait pertinente, les pays primo-accédants pouvant alors s'appuyer sur des certifications données par les autorités de sûreté des pays concepteurs ayant pour référence un cadre universellement reconnu. Le référentiel NRC paraît incontournable pour servir de base à cette harmonisation. Si les autorités de sûreté française et américaine progressaient ensemble dans ce sens, cette réglementation deviendrait une référence incontournable, compte tenu de leur poids sur la scène nucléaire mondiale.

## Lexique

**Bore soluble** : sa concentration en permanence ajustée dans l'eau du circuit primaire permet la maîtrise de la réactivité des réacteurs nucléaires à eau pressurisée en absorbant les neutrons. L'autre moyen est l'utilisation de grappes de contrôle mobiles contenant des matériaux absorbant les neutrons.

**Corium** : magma constitué des matériaux oxydés et métalliques fondus du cœur d'un réacteur nucléaire (combustible, gaine du combustible, aciers constituant les structures du cœur). Sous l'effet de la puissance résiduelle, la température du corium dans la cuve dépasse ~2500°C.

**Générateur de vapeur** : échange la chaleur entre l'eau primaire, chauffée par le combustible nucléaire, et l'eau secondaire qui, à l'état de vapeur, entraîne la turbine couplée à l'alternateur.

**Pressuriseur** : maintient la pression dans le circuit primaire pour éviter que l'eau n'entre en ébullition.

**Puissance résiduelle** : chaleur produite par le cœur postérieurement à l'arrêt de la réaction en chaîne constituée par l'énergie de désintégration des produits de fission.

**Risque de criticité** : déclenchement intempestif d'une réaction de fission en chaîne non maîtrisée. Une telle réaction s'accompagne d'une émission intense de rayonnements gamma et de neutrons.

**Sûreté** : ensemble des dispositions permettant d'assurer le fonctionnement normal d'une centrale nucléaire, de prévenir les accidents ou les actes de malveillance et d'en limiter les effets tant pour les travailleurs que pour le public et l'environnement.

**Système de sauvegarde** : système de sûreté qui intervient après un accident pour en limiter les conséquences et ramener le réacteur en état d'arrêt sûr.

**Terme source** : nature, quantité et cinétique de rejet des produits radioactifs d'une installation nucléaire. Sert à évaluer les conséquences d'un tel rejet dans l'environnement.

## > pour en savoir plus

Revue Générale Nucléaire – Année 2014, n° 2 mars-avril :

- J. Chénais, A. Diet, Y. Grondin, S. Perrier, « L'approche française par le consortium SMR (CEA, EDF, AREVA, DCNS) »
- P. Lepelletier, S. Danguy des Deserts (DCNS), « La construction modulaire : 30 ans d'expérience dans le secteur naval, au service du nucléaire civil »



Agence internationale de l'énergie atomique : [www.iaea.org](http://www.iaea.org)

N'imprimez que si vous en avez l'utilité.

EDF  
22-30 avenue de Wagram 75382 Paris Cedex 08  
FRANCE

SA au capital de 930 004 234 euros - 552 081 317 R.C.S. Paris

[www.edf.fr](http://www.edf.fr)

Publication EDF R&D - 1 av Général de Gaulle 92141 Clamart Cedex  
Directeur de la publication : Stéphane ANDRIEUX  
Secrétaire de rédaction : Florence METGE-LAYMAJOUX  
Le contenu de cette publication n'engage que son auteur et en aucune manière la responsabilité d'EDF.

© 2015 EDF

Toute reproduction interdite sans l'autorisation de l'auteur.  
Crédits photos : DCNS, EDF - Pierre MERAT, IDE

Le groupe EDF est certifié ISO 14001

Contact :

[communication-rd@edf.fr](mailto:communication-rd@edf.fr)  
<http://chercheurs.edf.com>