

## Les petits réacteurs nucléaires (SMR\*)

Patrick MICHAILLE

\* SMR = small modular reactor

Le premier réacteur à eau pressurisée (REP) à avoir produit de l'électricité est le réacteur de Shippingport, mis en service fin 1957, et exploité pendant 25 ans. D'une puissance de 60 MWe, sa conception dérive directement des réacteurs de sous-marins (le « Nautilus » a été mis en service début 1955), avec pour objectifs, outre de produire de l'électricité, de servir de prototype pour les réacteurs de porte-avions.

Pour remplacer aux USA les petites chaudières à combustible fossile, représentant un marché de 60 GWe (autant que le nucléaire en France), il est donc normal de voir surgir de nouveaux projets.

### 1. LES PETITS RÉACTEURS (P < 300 MWe)

#### 1.1. CARACTÉRISTIQUES VISÉES

##### 1.1.1 S = Simple, Sûr, Standardisé, de Série

Les réacteurs de faible puissance peuvent être refroidis par convection naturelle. A titre d'exemple, un essai d'arrêt des pompes sans chute de barre a pu être réalisé avec succès en fin de vie de Rapsodie et le réacteur Phénix a pu continuer à fonctionner à 2/3 de puissance nominale après avoir apporté la preuve par le calcul qu'il supporterait un tel accident majeur sans détérioration du combustible.

Ceci est un avantage énorme pour la démonstration de la sûreté des réacteurs, et une simplification de leur équipement, avec un minimum de systèmes de sûreté actifs et des éléments standardisés qui facilitent la fabrication, l'assemblage, les tests en usine, l'exploitation, ainsi que le démantèlement.

##### 1.1.2 M = Modularité ; Maîtrise de la qualité, du coût et des délais ; Manœuvrabilité ; Maintenance

Le montage en usine, et le transport des composants dans une cuve intégrée sur le site nucléaire, est un avantage très net par rapport au montage sur site réalisé pour les gros réacteurs : il assure la maîtrise de la qualité, des coûts et des délais. En visant un temps de mise en place de 3 ans (au lieu de près de 10 ans pour l'EPR), les gains financiers pour la compagnie-acheteur sont très importants. La modularité permet aussi de mettre en place une chaîne de production industrielle de composants, avec les gains de productivité afférents.

La multiplication des petits réacteurs sur un même site permet d'augmenter la puissance de la centrale, au rythme nécessité par la consommation globale. Le petit réacteur permet aussi d'ajuster à tout instant la production à la consommation car chaque réacteur peut manœuvrer rapidement entre 100 % et 20-25 % de la puissance nominale, alors que les centrales à gaz sont limitées à 50 %. Par ailleurs, la maintenance est optimisée (gestion des arrêts, phasés ; mutualisation des pièces de rechange).

##### 1.1.3 R = Retour d'expérience

Le type de réacteur le plus répandu dans le monde est le réacteur à eau pressurisée (REP, ou PWR en anglais), qui présente l'avantage de pouvoir être d'une taille réduite compatible avec la taille d'un sous-marin.

Plus de 200 sous-marins ont équipé chacune des flottes soviétiques (250) et américaines (210), ce qui requiert un niveau d'industrialisation élevé des procédés de fabrication. Leurs sous-marins stratégiques, ainsi que les porte-avions, comptent 2 réacteurs. Avec les flottes britannique et française, et les brise-glaces russes, ce sont plus de 500 SMR de par le monde qui constituent la base du retour d'expérience, auxquels s'ajoutent environ 300 REP qui contribuent à la qualification des matériaux, des procédés de fabrication, et des codes de calcul.

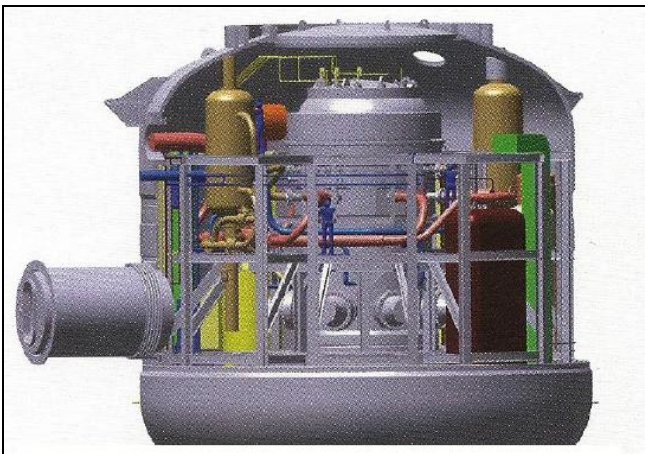
Le retour d'expérience en conception, exploitation, et démantèlement des réacteurs à eau sous pression est donc unique.

## 1.2. LE PROJET FRANÇAIS

En France, les sous-marins sont construits par Naval Group (ex DCNS), la partie nucléaire étant fournie par TechniAtome (combustible et petits composants). Toutes les innovations rendues nécessaires par l'exiguïté des sous-marins demandent à être réévaluées en termes de sûreté et de coût pour des réacteurs à terre, en gardant l'avantage de la compacité afin de permettre de construire le réacteur en usine.

Le groupement EDF (architecte général), CEA (cœur), TechniAtome (chaudière) et Naval Group (gros composants) travaille à la conception d'un réacteur à terre dont les caractéristiques principales sont :

- Les composants primaires : pompes primaires (PP), générateurs de vapeur (GV) et pressuriseur, sont tous intégrés dans une cuve primaire ne dépassant pas la taille d'une cuve de réacteur de 900 MWe transportable par barge.
  - Série : 8 GV et 6 PP par réacteur ; pour une centrale de 1200 MWe cela correspond à des séries de 48 GV et 24 PP.
  - Par souci de compacité, les GV sont à plaques ; les PP sont à rotor noyé.
  - Pas d'utilisation du bore soluble pour le contrôle neutronique, ce qui évite une usine de traitement des effluents borés (ainsi que la génération de tritium).
  - Chaque assemblage combustible est équipé d'une grappe de contrôle, ce qui augmente la dynamique pour le suivi de charge.
  - Pour simplifier la fabrication du couvercle de la cuve du réacteur et en augmenter la sûreté, les grappes absorbantes sont commandées par un mécanisme qui ne traverse pas le couvercle.
- La dynamique de réponse à la sollicitation du réseau en est accrue : les réacteurs peuvent jouer le rôle de réserve primaire (et secondaire) face à l'intermittence des sources d'énergie renouvelables.



Projet SMR français (TechniAtome)

**Sûreté** : la cuve primaire est confinée dans une enceinte métallique qui joue le rôle de l'enceinte étanche des REP et présentant les avantages suivants :

- le contrôle de son étanchéité est plus facile qu'avec une enceinte de béton
- elle est immergée dans un bassin d'eau qui contribue à confiner les produits de fission en cas d'accident
- ainsi, la puissance résiduelle est évacuée par des systèmes passifs qui laissent un délai de 7 jours avant qu'une intervention humaine soit nécessaire, ce qui évite de classer les diesels de reprise en « ultime secours »

Le choix de garder des pompes primaires plutôt qu'une circulation naturelle permet d'atteindre des puissances plus significatives en limitant la taille : 16 m de haut, contre 23 m pour NuScale (60 MWe) et 60 m pour Holtec (160 MWe).

**Standardisation** : il s'agit d'une construction par module, issue de la technologie navale, qui facilite aussi le démantèlement.

## 2. POUR QUI ?

### 2.1. LE MARCHÉ

Les petits réacteurs conviennent à des fonctions diversifiées répondant au marché, compte tenu de leur taille : équilibrage du réseau électrique, fourniture de chaleur pour l'industrie ou le chauffage (cogénération), dessalement d'eau de mer, production d'hydrogène.

D'ici 2040, le marché est estimé à environ 20 GWe soit p. exemple 130 SMR de 150 MWe.

#### 2.1.1 Les territoires isolés

Les petits réacteurs ont été développés pour des sites isolés (navires). Ils conviennent tout particulièrement pour les îles et les territoires peu habités (comme la Sibérie et le nord du Canada) disposant d'une source de refroidissement. Pour ce qui est de l'Europe, seules les îles éloignées du continent et les territoires isolés sont concernés : Madère, Açores, Antilles, Réunion, Guyane...

### 2.1.2 L'exportation

Pour la France, les marchés à l'exportation potentiels sont des secteurs comme l'Inde, l'Amérique latine, en constituant des groupements transnationaux. Car il ne faut pas oublier que les petits réacteurs sont issus de la technologie des sous-marins, et que les pays qui veulent développer leur flotte militaire y recourent, en voulant maîtriser la technologie.

Une autre clientèle pourrait provenir des pays africains en développement, dont les besoins en énergie sont croissants (plus d'un milliard d'humain n'a encore pas accès à l'électricité) mais qui n'a pas encore la capacité technique (exploitation, gestion du combustible usé et des déchets) ni organisationnelle (personnel compétent, tant au niveau de l'exploitation que de l'autorité de sûreté nucléaire).

Un système de location pourrait être appliqué, le fournisseur assurant le rôle d'exploitant et vendant l'électricité produite. La gestion du combustible usé pourrait faire partie du contrat, les déchets ultimes revenant au pays bénéficiaire.

### 2.1.3 L'Amérique du Nord

Actuellement, un marché potentiellement important émerge aux États-Unis : l'électricité y est produite aux deux tiers par des centrales à combustible fossile, avec plus de 400 centrales thermiques à charbon, dont certaines vieillissantes (de 50 à 300 MWe). Les remplacer par des petits réacteurs aurait un effet bénéfique sur la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>.

### 2.1.4 La propulsion navale marchande

Un marché naturel aurait été la propulsion des navires de surface : les Russes ont mis en service 11 brise-glaces et une barge atomiques. L'insécurité qui règne sur le monde avec le terrorisme repousse l'ouverture de ce marché hypothétique de plusieurs décennies.

## 2.2. LE FINANCEMENT

L'augmentation progressive de la puissance des réacteurs (en France : 900, 1300, 1450 et maintenant 1650 MWe avec l'EPR) résulte du gain financier lié à l'effet de taille : le coût d'exploitation dépend peu de la taille. Mais, comme le montrent l'EPR et l'AP-1000, les gros réacteurs sont longs à construire !

Or les exigences financières sont autres : investissement initial minimal, avec possibilité de phasage ; temps de construction minimal, pour diminuer les frais des intérêts intercalaires. Cela concerne autant les petites compagnies privées que les États en développement ou les Américains qui disposent de beaucoup d'énergie fossile peu coûteuse à exploiter.

Le modèle des SMR répond à la réduction du temps de retour sur investissement, en agrégeant éventuellement sur un site plusieurs réacteurs dont la construction est phasée, des servitudes communes (salle de commande, pièces de rechange partagées) et une exploitation intégrée (gestion des arrêts alternés pour la maintenance et le rechargement du combustible). Un réacteur peut être construit (ou démantelé) à côté d'un autre en fonctionnement. L'objectif est une durée de construction en 3 ans, du premier béton au couplage sur le réseau.

## 2.3. D'AUTRES UTILISATIONS QUE LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

Les réacteurs fournissent essentiellement de la chaleur, qui peut servir à d'autres usages que la production d'électricité : chauffage urbain, dessalement d'eau de mer, production d'hydrogène (mais en compétition avec les EnR). La sûreté intrinsèque des petits réacteurs permet de les implanter à proximité des centres urbains, et de développer la cogénération.

## 3. QUAND ? À QUELLES CONDITIONS ?

Alors que le premier sous-marin atomique (le Nautilus) a été mis en activité en 1955, quels obstacles ont donc ralenti le développement des SMR à terre ?

### 3.1. RUPTURE DU MODÈLE ÉCONOMIQUE

Jusqu'à présent, on a cherché à faire des réacteurs plus puissants dans des pays développés, car le nombre de sites qui peuvent être agréés comme centre de production nucléaire est limité, et l'économie d'échelle était évidente.

Pour compenser l'avantage de la taille, il faudra, avec les SMR, tenir les coûts et les délais de construction, dans un contexte de concurrence entre sources d'énergie, et de concurrence industrielle plus prégnante que pour les livraisons militaires. Cela nécessitera une rupture de technologies et de procédés de fabrication, l'ouverture des marchés de composants à la concurrence avec des normes ajustées et des contrôles en usine, bref un nouveau modèle économique dont pourra bénéficier en retour la propulsion navale.

### 3.2. HARMONISATION DES APPROCHES DE SÛRETÉ

Les SMR présentent une sûreté passive très poussée et reportent les compétences au niveau amont des fournisseurs, avec la possibilité de qualifier les composants en usine. Le marché ne sera viable que pour un nombre limité de vendeurs, ce qui obligera à des partenariats internationaux.

La fabrication des SMR à partir de composants fabriqués dans divers pays nécessitera la qualification des composants et la certification des usines qui les construisent. Pour exporter les SMR, il sera nécessaire d'obtenir les agréments par pays. Le marché ne verra donc le jour qu'avec une harmonisation des exigences de sûreté, sous l'égide de l'AIEA. Un groupe de travail de 14 vendeurs et acheteurs potentiels<sup>1</sup> s'est mis en place, ainsi qu'un forum des instances de réglementation, en vue de mettre à jour les guides spécifiques aux SMR.

En parallèle, il faudra que les nouveaux pays accédant au nucléaire forment leur personnel, depuis l'autorité jusqu'aux exploitants y compris les sous-traitants. La standardisation des matériels et des procédures organisationnelles favorisera ce transfert de connaissances et de compétences.

### 3.3. LA SÉCURITÉ

Disséminer des réacteurs de par le monde posera des problèmes de sécurité, dépendant notamment du niveau du risque de terrorisme : le nucléaire ne peut être implanté que dans des pays stables politiquement pour de nombreuses décennies (la durée de vie d'un réacteur est de l'ordre de 60 ans).

## 4. LES PROJETS AMÉRICAINS ?

### Nuscale

C'est le projet le plus avancé. Puissance nominale : 60 MWe, sans pompe primaire (d'où sa grande taille). 700 M\$ ont déjà été engagés, 400 M\$ supplémentaires sont prévus avant la construction de la tête de série.

Le coût visé pour l'électricité est inférieur à 70 \$/MWh, de façon à rester compétitif par rapport au gaz (60-70 \$/MWh). Cependant, une subvention étatique de 18 \$/MWh est prévue pour les premiers.

La licence d'exploitation pour les USA, le Canada et le Royaume-Uni est prévue début 2021. Le premier réacteur pourrait démarrer en 2026.

### Holtec

Le réacteur de 160 MWe est prévu en coopération avec la compagnie ukrainienne EnergoAtom, et les compagnies japonaises Mitsubishi et Hitachi.

## 5. RÉFÉRENCES

[1] « SMR en mode modules », RGN – Juillet-Août 2018. Dossier spécial.

[2] « Phénix, réacteur surgénérateur ». Article GAENA N° 3. <https://www.energethique.com/>

[3] « Propulsion nucléaire des sous marins ». Fiche argumentaire GAENA N° 43. <https://www.energethique.com/>

<sup>1</sup> Australie, Argentine, Chine, Corée du Sud, France, Indonésie, Inde, Iran, Italie, Jordanie, Pakistan, Royaume-Uni, Russie, USA. Le Japon, l'Arabie saoudite, le Kenya et le Canada, devraient rejoindre ce groupe.