

# Les *Small Modular Reactors* (SMR)

Les SMR sont des réacteurs nucléaires d'une puissance inférieure à 300 mégawatts électriques (MWé). Fabriqués en usine sous la forme de modules, ils sont ensuite transportés et assemblés sur site. Ces réacteurs peuvent être construits seuls (une unité isolée) ou en modules assemblés pour constituer une centrale de grande puissance dite multi-modules.

Si les SMR n'ont pas encore conquis le domaine de la production d'électricité, il existe néanmoins de nombreux projets en cours de développement (notamment aux Etats-Unis et en Russie). Les modèles les plus matures de SMR sont des réacteurs à eau pressurisée dont le déploiement pourrait être envisagé au début des

années 2020.

Les promoteurs de ces SMR, qui font l'objet d'un engouement particulier aux Etats-Unis, mettent en avant leur économie, leur sûreté passive et la flexibilité qu'ils apportent en termes d'investissement, d'adaptation à la demande d'électricité et de gestion du réseau électrique. L'analyse de ces différents points montre que les SMR méritent une attention particulière notamment quant au déploiement de centrales multi-modules.

Par **Jean-Michel DELBECQ\***

L'AIEA (1) définit les SMR (*Small and Medium size Reactors*) comme des réacteurs dont la puissance est inférieure à 300 MWé, pour les plus petits (*small*), et comprise entre 300 et 700 MWé, pour les *medium*. On ne s'intéressera ici qu'aux *small*, qui font aujourd'hui l'objet d'un fort regain d'intérêt. Ces réacteurs sont fabriqués en usine sous la forme de modules transportables, qui sont ensuite assemblés sur site : on les appelle *Small Modular Reactors*, dont l'acronyme est SMR. Ces réacteurs peuvent être construits seuls (unité isolée) ou en modules groupés pour constituer une centrale énergétique de grande puissance dite multi-modules.

---

## UNE « ZOOLOGIE » DES SMR

Les SMR ne sont pas des réacteurs d'un type nouveau, il en existe de nombreux exemplaires actuellement en service dans le monde : les réacteurs de propulsion navale (d'une puissance de quelques dizaines de MWé) ainsi que des réacteurs utilisés pour la recherche scientifique en tant que sources de neutrons

---

\* EDF R&D (1, avenue du Général de Gaulle – 92140 CLAMART).

(1) AIEA : Agence Internationale de l'Energie Atomique.

(Une remarque, à ce sujet : les réacteurs de sous-marins nucléaires ont des caractéristiques très différentes de celles des réacteurs de production d'électricité, notamment du point de vue de leur régime de fonctionnement. Cette remarque vaut également pour les petits réacteurs utilisés pour la recherche).

Jusqu'ici, les SMR n'ont pas encore conquis le domaine de la production d'électricité à l'exception de la centrale de cogénération de Bilibino, en Sibérie (composée de quatre unités (des réacteurs bouillants modérés au graphite) d'une puissance de 62 MWth (mégawatts thermiques) et de 11 MWé chacune produisant de l'électricité et de la chaleur destinée au chauffage urbain). Des petits réacteurs d'une taille plus importante existent aussi dans divers pays : en Inde (un PHWR de 220 MWé), en Chine (un CNP-300 de 300 MWé construit à Qinshan, Phase 1) et au Pakistan (un PHWR Candu de 125 MWé, à Kanupp, et un CNP-300, à Chashma). Ce sont des réacteurs d'une technologie dite classique.

Il existe aujourd'hui de nombreux projets de SMR producteurs d'électricité en cours de développement ou mis en avant par des constructeurs/développeurs. Ces constructeurs/développeurs sont des compagnies ayant déjà des références dans le nucléaire ou, au contraire, des compagnies nouvelles. Les modèles les plus matures dans cette catégorie sont des réacteurs à eau pressurisée. Ainsi, on peut citer parmi ceux-ci :

- aux États-Unis [3] : le mPower de Babcock & Wilcox (180 MWé) [16], le SMR 200 de Westinghouse (dérivé de l'AP1000, de l'ordre de 200 MWé) [17], le NuScale de NuScale (douze modules de 45 MWé chacun) [18], le HI-SMUR de Holtec International (145 MWé) [19] ;

- en Corée du Sud, le SMART de KAERI (100 MWé) [3] ;

- en Russie, la société OKBM Afrikantov (Rosatom) développe des réacteurs pour la propulsion de navires (notamment de brise-glaces) et pour la production d'électricité et de chaleur sur des barges flottantes. Elle propose déjà dans son catalogue le KLT-40S de 35 MWé, qui équipe les brise-glaces russes. Une barge flottante, l'Akademik Lomonosov, est en cours de construction et sera équipée de deux de ces réacteurs (elle sera mise en service au Kamchatka) [3, 4, 20]. OKBM Afrikantov développe aussi le SMR VBER, d'une puissance de 300 MWé [4].

Certains SMR sont également proposés avec un caloporteur métallique liquide ou gazeux, comme, par exemple, le PRISM de GE Hitachi (311 MWé, refroidi au sodium) ou le SVBR-100 de Rosatom-Gidropress (100 MWé, refroidi au plomb-bismuth) [3] : alors que les SMR précédents relèvent de la catégorie des réacteurs nucléaires de troisième génération, ceux-ci relèvent de la quatrième génération : leur maturité industrielle sera certainement atteinte à un horizon plus lointain que celle des SMR à eau (le

déploiement des premiers SMR, si une clientèle existe, est envisageable pour le début des années 2020).

Les chaudières de ces réacteurs sont de plusieurs types. Du plus classique au plus innovant, on distingue :

- les chaudières à boucles (cas des SMR de technologie classique identique à celle des réacteurs à eau de grande puissance) ;

- les chaudières compactes dont certains gros composants de leur circuit primaire (comme les générateurs de vapeur, les pompes primaires ou le pressuriseur) sont raccordés à la cuve principale par des tuyauteries très courtes (c'est le cas des réacteurs SMR russes KLT-40S et VBER 300) ;

- les chaudières intégrées dont les composants de leur circuit primaire sont intégrés dans la cuve (c'est le cas des réacteurs SMR américains mPower, NuScale et Westinghouse SMR, ainsi que du SMART coréen). La cuve est alors de grande hauteur : celle du mPower a une hauteur de 25,3 m et un diamètre de 3,96 m, celle du NuScale a une hauteur de 13,7 m et un diamètre de 2,7 m (à titre de comparaison, la cuve de l'EPR, tel celui de Flamanville, dans le département de la Manche, a une hauteur de 13 m et un diamètre de 5,40 m).

Nous invitons le lecteur à se reporter aux références bibliographiques [1], [2], [3], [4] et [5] pour une description plus détaillée de ces réacteurs dont la figure 1 de la page suivante donne quelques illustrations.

---

## QUEL EST L'INTÉRÊT DES SMR ?

*(IS SMALL BEAUTIFUL ?)*

Les promoteurs des SMR mettent principalement en avant l'économie, la sûreté passive, la flexibilité en termes d'investissement, d'adaptation à la demande d'électricité et de gestion du réseau électrique de ces réacteurs. Ces points sont présentés en partant des caractéristiques des SMR : puissance, taille, intégration du réacteur, fabrication en usine, possibilité de centrales multi-modules, aspects réseaux. La sûreté apparaît dans les thèmes « taille » et « intégration ».

---

### L'effet de taille

Depuis cinquante ans que l'énergie nucléaire se développe, la puissance des réacteurs à eau n'a fait que croître : de 100 à 150 MWé pour les premiers réacteurs (Indian Point 1, aux États-Unis), elle est passée à 1 000 MWé aujourd'hui (1 150 MWé pour l'AP1000 de Westinghouse), et même bien au-delà (1 650 MWé pour l'EPR d'Areva et 1 700 MWé pour l'APWR de Mitsubishi). Cette évolution s'explique facilement :

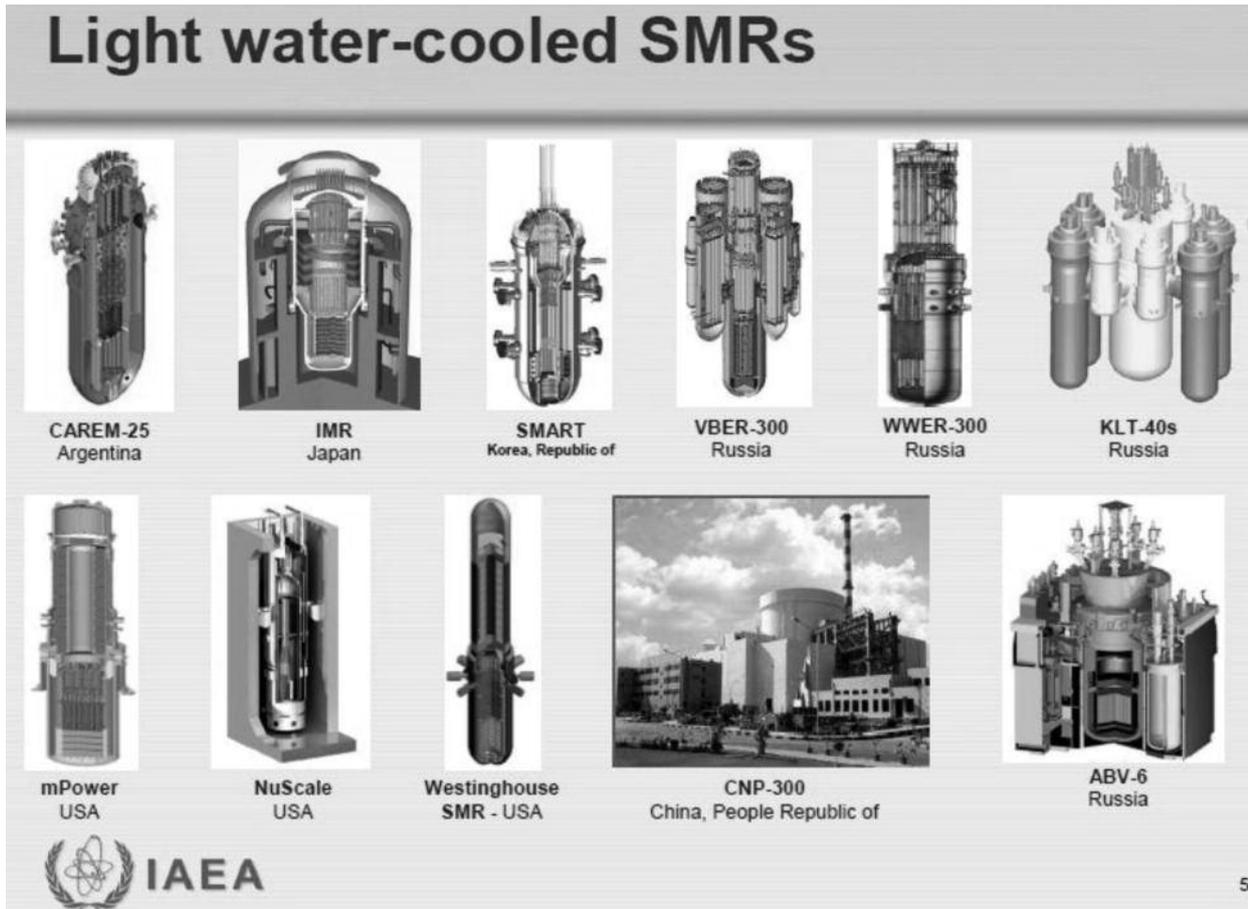


Figure 1 : Quelques SMR à eau pressurisée [1].

– les coûts fixes sont importants dans le nucléaire et l'augmentation de la puissance permet de répartir ces coûts fixes sur un plus grand nombre de MWé. Les coûts unitaires du MWé installé et du MWh produit sont alors réduits ;

– l'économie due à cet effet de taille a aussi des origines physiques. Les puissances développées dans les installations thermiques (réacteurs nucléaires ou chaudières) sont, pour une technologie donnée, proportionnelles au volume de ces dernières. De ce fait, la surface occupée au sol est proportionnelle à la puissance  $2/3$  de la puissance de l'installation ( $P^{2/3}$ ). Le dimensionnement des équipements (et donc leur masse) varie mais moins que proportionnellement à la puissance. Il faut toutefois garder à l'esprit que des discontinuités existent dans cette relation coût/puissance : ainsi, l'augmentation de la puissance impose d'augmenter le nombre des boucles primaires (trois boucles, pour 900 MWé, et quatre boucles, pour 1 300 MWé).

Cela étant, les SMR présentent aussi des atouts, leur précision « à technologie donnée » étant très importante. Ainsi, en restant dans le domaine de la physique, les échanges thermiques sont proportionnels à

la surface : un petit réacteur a un rapport surface/volume plus grand qu'un réacteur de grande puissance, et donc de plus grandes capacités d'échange thermique. Dans un petit réacteur, le rapport masse d'eau/puissance est lui aussi plus important. Il en résulte la possibilité de dégager des marges plus importantes dans le dimensionnement et d'introduire plus de passivité dans les systèmes de refroidissement, et donc de les simplifier, par exemple, en ayant recours à la convection naturelle pour le refroidissement du cœur du réacteur. La compacité des circuits et la grande hauteur des cuves des SMR, qui découle directement de l'intégration de ces réacteurs, favorisent cette convection naturelle (par effet gravitaire). On peut aussi citer à l'avantage des SMR la possibilité de retenir de façon passive le corium en cuve en cas d'un accident grave de fusion du cœur, et le bénéfice d'une grande autonomie pour l'évacuation passive de la puissance résiduelle (qui représente un avantage significatif dans le contexte post-Fukushima). On devrait donc trouver dans les SMR moins de systèmes actifs, les plus coûteux, tant à l'investissement qu'en exploitation. En outre, les SMR, du fait de leur petite taille, peuvent être enterrés : il en résulte une meilleu-

re résistance aux agressions externes (notamment aux séismes, mais les inondations continuent à représenter un risque majeur) et une plus grande facilité de protéger ce type de réacteur nucléaire contre le risque de chute d'avion (2).

### L'intégration des SMR

La technologie des SMR est différente de celle des réacteurs de grande puissance, notamment du fait de leur intégration. C'est un levier fort pour contrebalancer l'effet de taille. Le caractère intégré de ces réacteurs est une rupture technologique majeure qui permet aussi d'éliminer certains initiateurs d'accidents dans l'analyse de leur sûreté (notamment les accidents initiés par des ruptures de tuyauteries primaires), ce qui est une source d'économies. À l'inverse, la passivité des SMR est souvent obtenue au prix d'une faible densité de puissance du cœur et du recours à une cuve de dimension imposante, ce qui a un coût. On notera que Westinghouse est passé de l'AP600 (un réacteur d'une puissance de 600 MWé, resté au stade du projet) à l'AP1000 (un réacteur passif, en cours de construction en Chine et aux États-Unis) et qu'elle développe aujourd'hui un SMR 200.

Il faut aussi mentionner ici un impact négatif potentiel des réacteurs intégrés : leur exploitation et leur maintenance peuvent s'avérer plus difficiles que celles d'un réacteur de grande puissance, sauf à prendre des dispositions adaptées. Ainsi, avec leur cuve dans laquelle sont intégrés tous les composants primaires, les opérations de chargement/déchargement du combustible peuvent prendre beaucoup plus de temps, s'il faut au préalable retirer les composants (les générateurs de vapeur (GV) en particulier). C'est d'ailleurs ce qui justifie pour les SMR la recherche de cycles longs (d'au moins deux ans) de gestion du combustible. L'inspection des composants pourrait être aussi plus difficile. Il n'est par conséquent pas possible d'affirmer qu'un SMR est effectivement compétitif sans avoir procédé à une étude détaillée de son *design* et de son exploitation, au moins sur les points clés susceptibles de contribuer à la réduction de leur coût de production.

En conclusion de cette analyse, on retiendra qu'un premier levier d'économies potentielles des SMR réside dans la rupture technologique que permet leur faible puissance, qui se traduit dans leur conception innovante intégrée. Leur passivité est un atout majeur, d'abord pour la sûreté, et ensuite pour les économies induites. Il ne faut cependant pas oublier l'effet de taille : à technologie identique, plus la puissance d'un réacteur est élevée, plus celui-ci est économiquement rentable.

Mais les SMR présentent d'autres avantages, potentiellement majeurs pour leur économie et leur sûreté.

### La fabrication en usine des SMR et leur possible modularité

Du fait de leur taille et de leur géométrie compacte ou intégrée, les SMR permettent une fabrication dans des conditions optimales, en usines, sous la forme de modules (3) standardisés (4) qui sont ensuite transportés sur site. Il s'agit alors d'une fabrication en série qui est favorable à la qualité, et donc à la sûreté de ces réacteurs (par comparaison à une fabrication plus importante réalisée sur site), elle peut ainsi bénéficier d'un effet « programme » (les coûts amont sont répartis sur un grand nombre d'unités), d'un effet d'apprentissage important et d'un effet de productivité grâce à l'optimisation des approvisionnements et des équipements de production. Il peut en résulter des durées de construction réduites, des processus de contrôle et d'essai de nature répétitive, d'où une réduction des intérêts intercalaires et du coût d'investissement.

Leur modularité et leur transportabilité invitent fortement à l'adoption de règles de sûreté de conception des modules harmonisées ayant une maille internationale de façon à permettre l'exportabilité de ces modules entre plusieurs pays. Cela représenterait incontestablement un atout pour l'industrie nucléaire, à l'instar de ce qui existe déjà depuis de nombreuses années dans l'industrie aéronautique.

Par ailleurs, la réalisation de centrales de référence, cruciales pour la démonstration de la crédibilité du concept, serait également facilitée, le coût d'un module étant plus faible que celui d'une centrale de grande puissance.

En outre, comme le mettent en avant de nombreuses études économiques sur les SMR (notamment celle de l'Université de Chicago) [6], les risques projets sont moindres pour un réacteur de petite puissance fabriqué en usine (moindre coût en capital, durée de construction plus courte, incertitudes réduites de par la standardisation) : la prime de risque pour ces projets pourrait être plus faible et donc des taux de financement moindres.

### La mise en œuvre de centrales multi-modules

L'intérêt de la mise en œuvre de centrales d'une puissance importante constituées de modules identiques de petite puissance est d'abord d'ordre financier. La mutualisation de bâtiments ou de systèmes support entre les modules est aussi un avantage potentiel.

(2) Une dalle épaisse est plus facile à réaliser que la coque « avion » de l'EPR en cours de construction.

(3) Au sens ordinaire de « morceaux ».

(4) C'est-à-dire identiques, pour l'essentiel.

Il est envisagé, aux Etats-Unis, de mutualiser des salles de commande entre plusieurs modules (5), notamment dans le projet NuScale, où la centrale est constituée de douze modules d'une puissance pour chacun, de 45 MWé.

D'autres avantages potentiels sont aussi cités notamment en termes de maintenance et de rechargement de combustible, opérations qui peuvent être réalisées en n'arrêtant que le seul module concerné.

#### Autres avantages des SMR

Le coût d'investissement d'un SMR est modeste, comparé à celui d'un réacteur de forte puissance : c'est la raison principale de l'engouement actuel pour les SMR aux Etats-Unis, où le coût du capital est un élément de décision plus important qu'il ne l'est en Europe.

Les SMR permettent aussi une plus grande flexibilité de gestion de la capacité nucléaire installée dans une région donnée : l'incrément d'augmentation de la puissance installée pour chaque nouvelle centrale mise en service est en effet moindre. Il en résulte une meilleure adaptation de l'offre d'électricité à la demande.

Du point de vue des réseaux électriques :

- du fait de leur petite puissance, les SMR sont potentiellement intéressants dans une région où le réseau électrique manque de robustesse (6) ou dans une région isolée (comme l'Alaska ou la Sibérie, pour citer des exemples concrets de projets) ainsi que dans des zones insulaires. Le marché des zones isolées est un marché de niche, les réacteurs adaptés étant de très petite taille (par exemple, jusqu'à 50 MWé). Un marché de niche n'est pas forcément cohérent avec la réalisation de réacteurs SMR en grande série, mais pour un tel marché le coût n'est pas un critère aussi déterminant.

- les SMR peuvent apporter une plus grande flexibilité à la gestion du réseau électrique, en termes d'arrêts de tranche (la puissance retirée du réseau par un arrêt d'un SMR est faible, par comparaison à une centrale de grande puissance).

#### La résistance à la prolifération

L'avantage de la résistance à la prolifération accrue des SMR est mis en avant, notamment aux Etats-Unis, qui y sont très sensibles. Mais c'est là un avantage discutable dans la mesure où il est admis qu'indépendamment de la puissance des réacteurs, le risque maximal de prolifération se situe dans les usines du cycle du combustible (notamment dans les usines d'enrichissement).

#### QUELS MARCHÉS POTENTIELS POUR LES SMR ? (IS SMALL ATTRACTIVE ?)

##### Les marchés potentiels de SMR dans le monde

Les cibles sont :

- des pays ou régions dont le réseau électrique est isolé et/ou peu robuste,
- des applications de cogénération : chaleur industrielle, dessalement,... en plus de la production d'électricité,
- des clients recherchant une flexibilité financière ou un financement initial moindre,
- la substitution du nucléaire à des moyens de production d'électricité utilisant des combustibles fossiles (centrales au charbon) et ce, pour une puissance équivalente, et sans émission de CO<sub>2</sub>.

La plupart des études qui ont été réalisées à ce jour font apparaître un marché très limité lorsque l'on prend en compte l'aspect compétitivité économique (notamment par rapport à d'autres moyens de production utilisant des combustibles fossiles). Il est donc essentiel de démontrer la compétitivité des SMR par rapport aux autres moyens de production d'électricité. Nous y reviendrons plus loin.

Une étude réalisée en 2009 par AIEA/INPRO [7] auprès de pays futurs utilisateurs potentiels de l'énergie nucléaire dans le futur (7), montre que :

- si l'on fait abstraction des contraintes de réseau, 80 % des capacités nouvelles de production nucléaire seraient d'une capacité se situant autour de (ou supérieure à) 1 000 MWé et la répartition en nombre d'unités de production serait de 38 % en SMR et de 62 % en grands réacteurs (d'une puissance égale ou supérieure à 1 000 MWé) (8) ;
- en prenant en compte la taille du réseau électrique du pays (sans ses éventuelles interconnexions avec des pays voisins), en 2015, 1/3 des pays éligibles seraient capables d'intégrer des centrales de petite puissance

(5) C'est déjà le cas, aux Etats-Unis, par paire de centrales sur un même site.

(6) La puissance d'une centrale ne doit pas dépasser 10 % de la puissance totale desservie par le réseau.

(7) Ces pays représentent 34 % de la population mondiale, 13 % du PIB et 19 % de la production d'électricité mondiale aujourd'hui. La Chine et l'Inde ne font pas partie des pays pris en compte. En 2030, 30 % de la totalité des nouvelles capacités de production d'électricité seraient installés dans ces pays.

(8) Cette étude ne semble pas faire de différence entre une centrale constituée de quatre modules d'une puissance unitaire de 150 MWé et une centrale unique d'une puissance de 600 MWé.

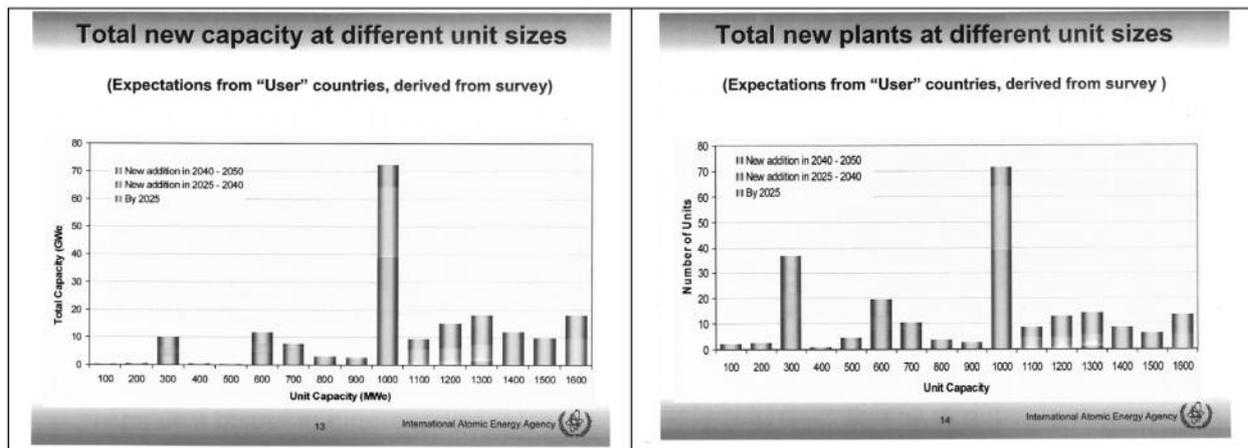


Figure 2 : Puissances nouvelles et nombre d'unités nouvelles en fonction de la puissance des unités [8].

(inférieure à 300 MWe) et 10 % de ceux-ci seraient, de plus, capables d'intégrer des centrales de moyenne puissance (supérieure à 700 MWe) ; Il est précisé qu'aucune contrainte de financement n'a été prise en compte dans cette étude. Ces résultats (hors contraintes de réseau) sont illustrés par la figure 2 (extraite de la référence bibliographique [8]).

### L'engouement pour les SMR aux USA

Les SMR font actuellement l'objet d'un fort soutien politique de la part du Congrès américain et du DOE (9) et plusieurs projets sont en cours de développement chez les vendeurs. Un budget de 67 millions de dollars a été alloué pour l'année fiscale 2012 au DOE au titre du soutien technique apporté par l'Administration au *licensing* des SMR à eau légère. Ce montant s'inscrit dans une enveloppe budgétaire allouée au DOE, d'un montant de 452 millions de dollars, sur cinq ans, pour soutenir, dans le cadre d'un partenariat public-privé (à coûts partagés, 50/50), le développement et le déploiement d'ici à 2022 de deux modèles américains de SMR à eau pressurisée. Cette initiative a été lancée auprès des vendeurs américains au cours du printemps 2012 et le DOE doit annoncer les modèles retenus avant le 1<sup>er</sup> octobre 2012. Le DOE a aussi annoncé, début mars 2012, avoir signé des partenariats avec les trois sociétés NuScale, Holtec International et Hyperion Power Generation pour la démonstration de SMR sur son site de démonstration de Savannah River. Un budget de 29 millions de dollars a par ailleurs été alloué à la R&D portant sur des concepts avancés de SMR.

De son côté, la NRC (10) se prépare activement à mener l'instruction de la certification des SMR, qui pourrait démarrer en 2012, pour NuScale et, en 2013, pour le mPower. Elle instruit déjà en liaison

étroite avec une *SMR Task Force* du NEI, la possibilité d'adapter la réglementation des réacteurs de grande puissance aux spécificités des SMR (plan d'urgence, sécurité, personnel d'exploitation réduit, mutualisation des salles de commande, terme source, exigences fonctionnelles du confinement).

Plusieurs motivations sont à l'origine de cet engouement pour les SMR, au-delà de l'espérance que suscite chez les fournisseurs la vente de ces centrales nucléaires et de l'intérêt financier pour les *utilities* qu'ils présentent (moindre investissement initial, progressivité de cet investissement) :

- Les SMR pourraient restaurer un *leadership* américain dans le domaine de l'énergie nucléaire (11) et permettre de créer des emplois et de reconstituer un outil industriel sur le sol américain (en localisant les usines de fabrication des modules sur le territoire américain, puis en les transportant ensuite dans les pays acquéreurs).

- l'Administration américaine a défini par ailleurs des objectifs de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère qui sont contraignantes, notamment pour les installations fédérales (réduction de 28 % de ces émissions à l'horizon 2020). Le DOE est particulièrement intéressé par le déploiement de moyens de production « zéro carbone » à proximité de ses laboratoires nationaux. Une première réalisation pourrait avoir pour initiateur l'électricien TVA, qui a signé en 2011 une lettre d'intention de commande pour la fourniture de six réacteurs SMR mPower sur le site de Clinch River pour alimenter en électricité le laboratoire national d'Oak Ridge.

(9) *Department of Energy* (ministère de l'Énergie, aux États-Unis).

(10) *Nuclear Regulatory Commission*.

(11) Avant la récente commande de quatre AP1000 par deux *utilities* américaines, la dernière commande de centrale nucléaire aux États-Unis remontait à l'année 1978.

– Le DOD (12) est lui aussi intéressé pour réduire la dépendance de ses bases militaires aux États-Unis vis-à-vis d'un réseau électrique fragile [9].

– Les SMR sont aussi vus par les *utilities* comme une technologie susceptible de remplacer de nombreuses centrales au charbon vieillissantes, dans un contexte législatif de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. On estime qu'aux États-Unis, c'est environ 120 GW<sup>é</sup> de centrales au charbon construites avant 1980 qui doivent être remplacées. Toutefois, sur ce marché, les centrales au gaz sont en concurrence directe avec les SMR et ce d'autant plus qu'aux États-Unis, les prix du gaz ont chuté suite à la découverte d'importants gisements de gaz de schiste.

### LA COMPÉTITIVITÉ DES SMR PAR RAPPORT AUX AUTRES MOYENS DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ – (IS SMALL CHEAPER ?)

L'économie des SMR a fait l'objet de nombreuses études récentes [6, 10, 11, 12, 15].

La compétitivité des SMR est à examiner par rapport aux moyens de production d'électricité concurrents sur les marchés visés à l'horizon post-2020, c'est-à-dire par rapport aux centrales à cycle combiné à gaz et aux ENR (plus particulièrement, à l'éolien terrestre).

– En ce qui concerne les cycles combinés à gaz, une étude de l'Université de Chicago [6] donne une fourchette comprise entre 60 et 80 dollars/MWh (13), tandis que l'étude de l'*Institute for Energy* de Petten [12] donne une fourchette se situant entre 70 et 125 euros/MWh.

– Les coûts de production de l'éolien terrestre se situent aujourd'hui dans une fourchette comprise entre 70 et 80 dollars/MWh [13] (notre référence [6] donne un coût de 90 dollars/MWh).

L'étude la plus récente sur les SMR est celle de l'Université de Chicago [6]. Elle montre en particulier toute l'importance de l'effet d'apprentissage et de la mise en œuvre de centrales multi-modules. Le taux d'apprentissage adopté est de 10 % : à chaque fois que le nombre de modules est doublé, le coût du module baisse de 10 %. Cette valeur est tirée du retour d'expérience de la Navy américaine et d'une étude faite en 2004 par l'Université de Chicago [14]. Les simplifications apportées par la sûreté passive sont elles aussi essentielles pour la réduction des coûts. Elle adopte également une prime de risque réduite pour les SMR (investissement initial moindre, délai de construction raccourci, standardisation,...). Les résultats de cette étude sont résumés dans la figure 3 de la page suivante extraite de notre référence bibliographique [6], qui donne le coût de la production d'un MWh par chacune des centrales successivement évoquées.

Dans cette analyse, la première centrale (LEAD/2) est constituée de trois modules, de 100 MW<sup>é</sup> chacun, et

les suivantes (LEAD, FOAK-1, FOAK-2,..., NOAK) sont constituées, quant à elles, de six modules. La courbe « Upper band » (resp. « Lower band ») est associée à un coût *overnight* (14) de la « Lead Plant » de 11 000 dollars au kW (vs. 6 700 dollars/kW) et à un taux d'apprentissage agressif (par opposition à modéré), tandis que la courbe médiane est associée à un coût *overnight* de la « Lead Plant » de 7 900 dollars/kW et à un taux d'apprentissage moyen de 10 %. La bande grise représente la fourchette de coûts du MWh d'un cycle combiné à gaz (de 65 à 80 dollars/MWh). Cette étude fait donc apparaître que la compétitivité des SMR avec les cycles combinés à gaz peut être atteinte très rapidement, entre 10 et 54 modules, selon les hypothèses (15), avec une valeur moyenne de 18 modules à 80 dollars/MWh et de 54 modules à 65 dollars/MWh. Les vendeurs américains considèrent, de leur côté, que les SMR deviennent compétitifs avec les énergies concurrentes après la réalisation du 10<sup>ème</sup> module.

Un autre résultat de cette même étude est le coût *overnight* de la N<sup>ème</sup> (« NOAK ») centrale de six modules, soit 4 700 dollars/kW, à comparer au coût *overnight* d'une centrale de grande puissance, qui est évalué à 4 220 dollars/kW.

Enfin, les auteurs de l'étude considèrent que l'investissement que représente la construction de l'usine de fabrication des modules serait rentabilisé par un programme sur vingt ans, correspondant à la production de 240 modules (de 24 GW<sup>é</sup>), ce qui est relativement limité si ces SMR adressent le marché des centrales de puissance *via* des centrales multi-modules SMR.

Ces études reposent, d'une part, sur la valeur du taux d'apprentissage et, d'autre part, sur le coût *overnight* d'un module SMR. Ces deux chiffres nécessitent une justification approfondie avant, éventuellement, de changer le paradigme qui prévaut dans le domaine de l'énergie nucléaire depuis cinquante ans : “*large is cheaper*” [Ndlr : les installations de grande taille sont moins coûteuses], et c'est probablement ce qui justifie les financements significatifs consacrés à des études sur cette question aux États-Unis.

(12) *Department of Defense*.

(13) Cette fourchette ne prend pas en compte les gaz de schiste.

(14) Coût dit *overnight* : coût théorique d'investissement de la centrale calculé en considérant que celle-ci aurait été construite en l'espace d'une seule nuit, c'est-à-dire sans qu'aient été générés des intérêts intercalaires, et de l'inflation.

(15) Une hypothèse retenue par cette étude est un rythme de fabrication de un module par mois.

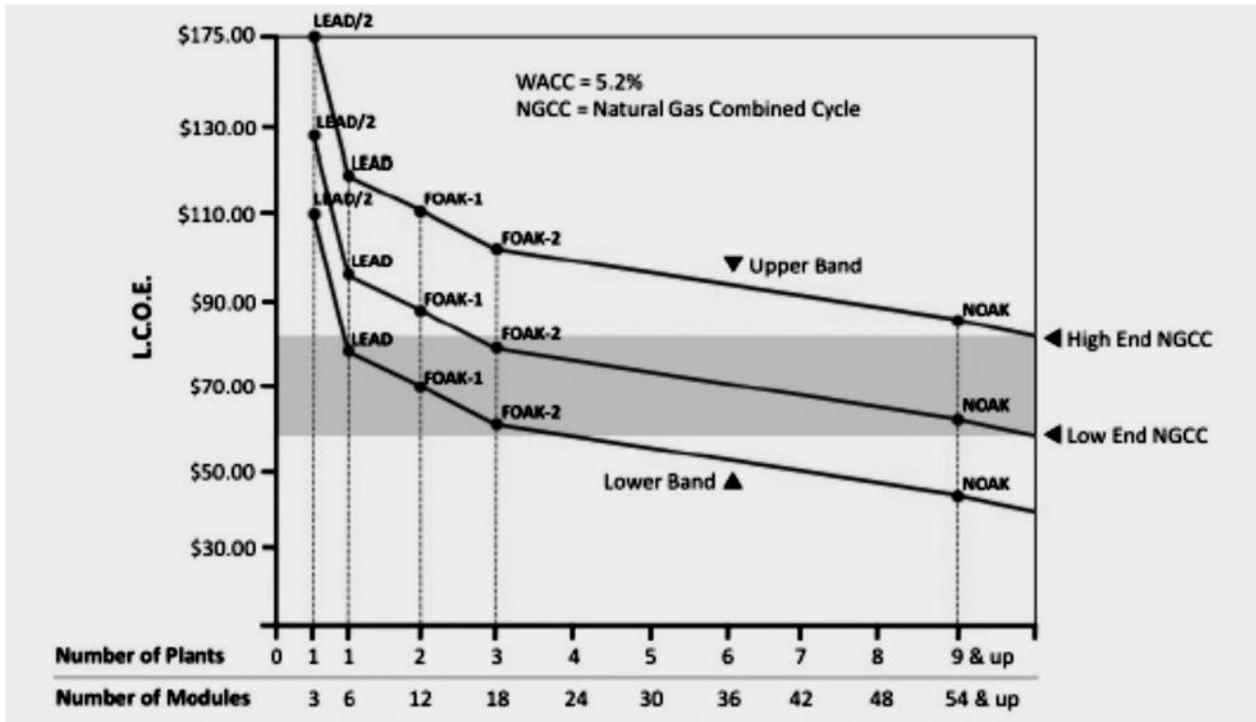


Figure 3 : Levelized Costs of LEAD and learning Plants.

## CONCLUSION

Les propos tenus par Pete Lyons (16) ouvrant un séminaire du DOE consacré aux SMR, en juin 2010, résumant bien la situation en ce qui concerne les SMR [21] : « Les SMR font l'objet de l'attention des médias du monde entier. Ils sont décrits comme des centrales dont la petite taille, la simplicité de fonctionnement et la sûreté améliorée permettent leur déploiement partout dans le monde, y compris aux Etats-Unis. Mais beaucoup d'entre vous savent que la technologie nucléaire n'est pas toujours simple, sûre et fiable. Ces qualités ne sont atteintes que grâce à une conception fondée sur le retour d'expérience des centrales du passé. Des SMR peuvent être conçus pour avoir ces qualités, mais nous savons qu'il y a beaucoup de démonstrations et de preuves à apporter, pour une technologie nucléaire nouvelle. Comme le disait l'Amiral Rickover, il y a [de cela] des années, il y a de grandes différences entre un réacteur [sur le] papier et un réacteur réel ».

Les SMR sont encore des réacteurs « papier », plus ou moins avancés selon les modèles, et il reste beaucoup à faire avant qu'ils ne deviennent des réacteurs réels ayant fait la preuve de leur viabilité économique. Leur

mise à maturité industrielle prendra du temps : de l'ordre d'une dizaine d'années, pour les plus matures aujourd'hui (à savoir les SMR recourant à une technologie à eau légère). Mais ils méritent certainement qu'on leur apporte une attention particulière, tout particulièrement dans le cas d'un déploiement (générateur d'économies d'échelle) de centrales multi-modules.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Workshop on SMR Technology Assessment for Near Term Deployment, 5-9 December 2011, IAEA Programme on common technology and Issues for SMRs, M. SUBKI (Hadid). [http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloads/Technology/meetings/2011-Dec-5-9-WS-SMR/Day-1/2\\_IAEA\\_Subki\\_SMR\\_Prog\\_WS-SMRDec2011.pdf](http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloads/Technology/meetings/2011-Dec-5-9-WS-SMR/Day-1/2_IAEA_Subki_SMR_Prog_WS-SMRDec2011.pdf)
- [2] Status of Small and Medium Sized Reactor Designs – A supplement to the IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). <http://aris.iaea.org-September 2011-www.iaea.org/NuclearPower/Downloads/Technology/files/SMR-booklet.pdf>
- [3] <https://smr.inl.gov/>
- [4] <http://www.world-nuclear.org/info/inf33.html>
- [5] Current Status, Technical Feasibility and Economics of Small Nuclear Reactors, OECD/AEN Nuclear Development, June 2011.

(16) Pete Lyons, *Principal Deputy Assistant Secretary, Office of Nuclear Energy, DOE.*

- [6] *Small Modular Reactors – Key to Future Nuclear Power Generation in the U.S.*, ROSNER (Robert) & GOLDBERG (Stephen), Energy Policy Institute at Chicago, The Harris Scholl of Public Policy Studies, Technical Paper, Revision 1, November 2011.
- [7] Common User Considerations (CUC) by Developing Countries for Future Nuclear Energy Systems, Report of Stage 1, IAEA Nuclear Energy series n°NP-T-2.1, May 2009.
- [8] *IAEA Assistance to Nuclear Power Newcomers*, STARZ (Anne), Department of Nuclear Energy, IAEA.
- [9] *Small Nuclear Reactors for Military Installations: Capabilities, Costs, and Technological Implications*, ANDRES (Richard B.) & BREETZ (Hanna L.), INSS, February 2011.
- [10] *Competitiveness of small-medium, new generation reactors: a comparative study on capital and O&M costs*, par CARELLI (M. D.) & *al.*, Icone, 16 May, pp. 11-15, 2008.
- [11] *Small Modular Reactors DOE Initiatives and Outlook for Development*, KELLY (John E.), Platts SMR Conference, May 23, 2011.
- [12] *Economic viability of small to medium-sized reactors deployed in future European energy markets*, SHROPSHIRE (David), Institute for Energy Petten, Progress in nuclear energy 53, pp. 299-307, 2011.
- [13] *Rapport Energies 2050*, PERCEBOIS (Jacques) & MANDIL (Claude), février 2012. Site Internet : [www.economie.gouv.fr](http://www.economie.gouv.fr)
- [14] *The Economic Future of Nuclear Power*, University of Chicago, with Argonne National Laboratory, August 2004.
- [15] *A methodology for evaluating economics competitiveness of SMR*, POLIMI nuclear economics research group, Prof. RICOTTI (Marco E.) & *al.*, IFNEC, 7<sup>th</sup> IDWG, December 6-7, 2010, Rome.
- [16] <http://www.generationmpower.com/technology/>  
<http://www.babcock.com/library/pdf/E2011002.pdf>  
<http://www.generationmpower.com/pdf/sp201100.pdf>
- [17] [http://www.westinghousenuclear.com/smr/fact\\_sheet.pdf](http://www.westinghousenuclear.com/smr/fact_sheet.pdf)  
<http://www.westinghousenuclear.com/smr/index.htm>
- [18] <http://www.nuscalepower.com/>
- [19] <http://www.holtecinternational.com/divisions/smr-llc>
- [20] <http://www.world-nuclear.org/info/inf34.html>
- [21] [http://www.ne.doe.gov/smrworkshop/docs/Remarks\\_PLyons.pdf](http://www.ne.doe.gov/smrworkshop/docs/Remarks_PLyons.pdf)