

# Nouveau nucléaire : quelles technologies et quelles perspectives de développement en France et dans le monde ?

Par Jean-Guy DEVEZEAUX DE LAVERGNE

Directeur de l'Institut d'économie (I-tésé) du CEA et président de la section technique Économie de la SFEN <sup>(1)</sup>

Cet article situe l'ordre de grandeur de la contribution du nucléaire à la décarbonation mondiale à un peu moins de 10 % de l'effort global, ce qui correspond à un marché considérable, l'équivalent probablement de plus de mille réacteurs à construire d'ici à 2050. Ces réacteurs de nouvelle génération sont essentiellement refroidis par l'eau ordinaire, et correspondent, pour partie, à des petits ou moyens réacteurs innovants (SMRs). Le nucléaire est ainsi l'une des solutions pour décarboner, en complémentarité avec les énergies renouvelables.

En France, l'optimum économique pourrait être de maximiser la durée d'exploitation des réacteurs actuels, et donc de repousser, par voie de conséquence, le renouvellement du parc existant. Mais nous montrerons que cette stratégie serait lourde de conséquences industrielles des plus pénalisantes, alors que la *supply chain* a eu de grosses difficultés à se reconstituer. La logique qui apparaît la meilleure à ce stade, est de baisser les coûts des réacteurs industriels de troisième génération (par rapport aux têtes de série) et de renouveler le parc sans tarder, en recourant au réacteur EPR2 développé par Framatome.

## Les conditions du développement du nucléaire

### Le nucléaire aujourd'hui dans le monde

Aujourd'hui, l'énergie nucléaire assure 16 % de la production mondiale d'électricité, soit 2 700 TWh/an correspondant à la production de plus de quatre cents réacteurs actuellement en fonctionnement. Quarante-cinq réacteurs électronucléaires sont en construction dans le monde et de l'ordre de cent trente autres sont prévus, principalement en Chine, en Inde, au Japon, aux États-Unis et dans la Fédération de Russie. De nombreux pays qui ne comptent pas encore de réacteurs de puissance dans leur parc électrique ont décidé d'opter pour le nucléaire, notamment au Moyen-Orient et en Asie.

Toutefois, les années récentes ont vu quelques soubresauts affecter la renaissance du nucléaire qui a pris son essor au cours de la première décennie du siècle. D'une part, les réacteurs de nouvelle génération construits dans les pays du « Nord » ont fait face à des difficultés impor-

tantes, induisant des allongements des calendriers et des surcoûts significatifs. D'autre part, les effets du tsunami qui a frappé le Japon, le 11 mars 2011, ont provoqué les décisions de sortie du nucléaire de certains pays (comme l'Allemagne) et ont ralenti les programmes d'autres pays.

### La compétitivité économique dans le mix électrique

Avec les niveaux actuels de coût de production <sup>(2)</sup>, le nucléaire existant est extrêmement compétitif : dans les vingt ans à venir, aucun nouveau moyen de production ne pourra rivaliser avec la performance qu'il affiche. Par ailleurs, plus la durée d'exploitation des réacteurs est allongée, et plus le bénéfice est important, même si l'on tient compte des coûts nécessaires pour faire face aux conséquences du vieillissement des tranches et surtout pour améliorer leur performance de sûreté et la positionner à un niveau comparable aux standards les plus modernes.

(2) Voir, pour la France, l'étude de la SFEN, « Les coûts du nucléaire existant », 2017. Ces résultats sont en général transposables dans d'autres pays, si l'on excepte en particulier quelques réacteurs américains.

(1) Société française d'énergie nucléaire.

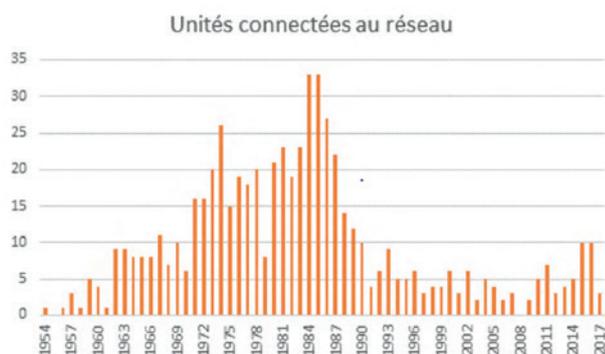


Figure 1 : Les unités connectées révèlent une dynamique de construction marquée par la conjoncture mondiale et la géopolitique (source : base PRIS, AIEA).

Le nucléaire du futur fait preuve d'une bonne compétitivité dans l'ensemble des zones, comme le montre la dernière étude de l'OCDE (voir la Figure 2 ci-après). Cette étude se fonde sur des chiffres européens relatifs à des réacteurs à eau de grande taille et porte sur la période postérieure à l'entrée en fonctionnement de certains prototypes comme Flamanville 3 ou Olkiluoto 3. Dans l'« ancien monde », les coûts actualisés du nouveau nucléaire sont typiquement de 60 à 75 euros/MWh (pour des taux d'actualisation allant de 5 à 7 %).

Ces chiffres sont encourageants pour le nucléaire. Ils doivent toutefois être nuancés dans deux directions au moins, qui portent sur sa compétitivité par rapport aux énergies renouvelables. Dans un sens, le coût de ces dernières énergies baisse à grande vitesse, et l'on voit actuellement des projets de fermes solaires affichant

des coûts inférieurs à 30 \$/MWh au Moyen-Orient. À l'inverse, de nombreux travaux d'économistes ont mis en évidence depuis une petite dizaine d'années l'importance des « coûts de système » pour toutes les productions électriques. Pour les renouvelables variables, ces coûts (liés essentiellement à l'ajustement offre-demande à court terme, à la variabilité, aux raccordements, ainsi qu'à la possibilité de déclenchement de coûts échoués en dynamique <sup>(3)</sup>) sont généralement d'un ordre de plusieurs dizaines d'euros/MWh et augmentent avec la part de ces énergies dans le mix <sup>(4)</sup>. Aujourd'hui, il faut donc apprécier le rôle du nucléaire dans des mix complets, et c'est dans ce nouveau cadre que sa compétitivité doit être appréciée. Les toutes prochaines années permettront de préciser ces données <sup>(5)</sup>.

### Les supply chains nucléaires (réacteurs et cycle)

Le développement du nucléaire résulte essentiellement d'un choix des États au titre de leur politique énergétique et d'un choix économique des compagnies électriques. Il nécessite aussi de disposer d'une capacité indus-

(3) Voir, notamment, le rapport de l'OCDE/AEN, "The Costs of Decarbonisation: System Costs with High Shares of Nuclear and Renewables", 2019, [www.oecd-nea.org/news/2019/2019-01.html](http://www.oecd-nea.org/news/2019/2019-01.html)

(4) Voir l'article de Dominique Finon, consacré à ce sujet et publié dans ce même numéro des *Annales des Mines*.

(5) Ainsi, il faudra analyser les situations locales avec des outils dédiés, dont la complexité est nettement plus grande que les coûts actualisés utilisés jusqu'ici. Il est assez peu probable que ces nouvelles méthodes amènent à remettre en question de façon forte la compétitivité du nucléaire dans les deux prochaines décennies. À l'avenir, il faudra définir des stratégies dynamiques pour chaque pays (ou zone électrique), et le nucléaire devrait, en règle générale, y figurer en bonne place selon l'analyse économique.

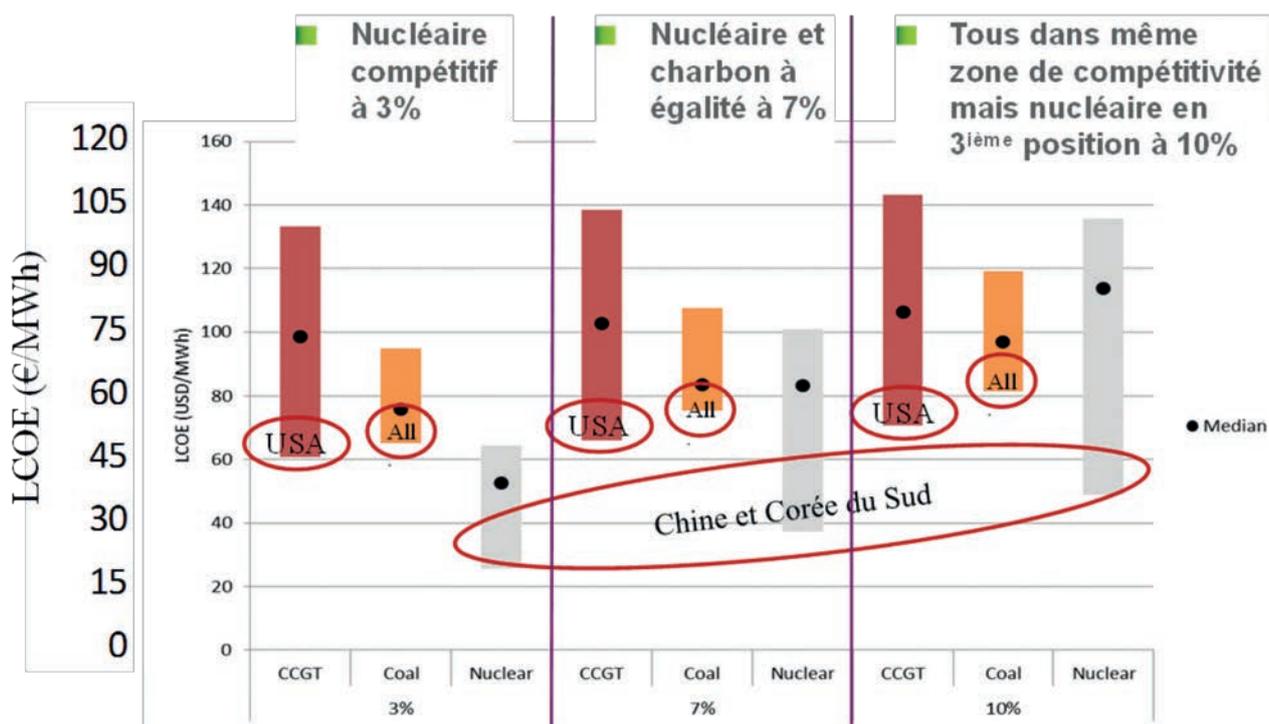


Figure 2 : Compétitivité du nucléaire à construire dans les principales zones du monde (source : OCDE AIE et AEN, 2015).  
Nota : CCGT signifie cycle combiné gaz.

trielle pour partie spécifique (flot nucléaire). Ces éléments peuvent être totalement importés, essentiellement pour les « primo-accédants ». Deux enjeux sont très présents ici : la capacité mondiale à satisfaire des rythmes qui pourraient atteindre jusqu'à vingt réacteurs par an (soit de l'ordre de cent réacteurs en construction), et corrélativement la capacité à développer des *supply chains* locales. Ces sujets ne sont actuellement que peu l'objet de travaux universitaires, mais les expériences déjà anciennes des États-Unis ou de la France, et celle plus récente de la Chine, laissent augurer des marges de manœuvre suffisantes pour permettre de se conformer aux scénarios élevés qui ont été élaborés en matière de construction de réacteurs.

Pour ce qui est du cycle du combustible, les capacités minières suivent des fluctuations (actuellement le marché de l'uranium est orienté à la baisse), mais les technologies de lixiviation *in situ* permettent de penser que peu de limites joueront fortement dans cette première moitié du siècle. Il pourrait ensuite en être autrement, avec des risques de tensions<sup>(6)</sup>. Enfin, les technologies de recyclage sont principalement maîtrisées par la France, qui est en discussion étroite avec la Chine. Comme le stockage définitif des déchets, ces technologies peuvent attendre, mais un développement (socialement) durable du nucléaire mérite de les mettre en œuvre à une large échelle.

### Les compétences

Le ratio d'emploi de l'industrie nucléaire est modeste (c'est une industrie efficace), mais il est comparable aux autres énergies durables. En France, ce sont au total 400 000 emplois qui sont générés par ce qui est la troisième filière industrielle. Au plan mondial, la production de 700 GW en 2050 demanderait de disposer de l'ordre de trois millions d'emplois qualifiés. En l'état actuel des choses, ce n'est pas inatteignable : cela nécessite d'organiser des filières de formation, en particulier dans les « nouveaux » pays. Ces développements sont en cours et sont souvent l'accessoire des contrats de construction de réacteurs. Dans les pays déjà équipés, des situations parfois difficiles sont observées, non seulement dans des pays ayant décidé de sortir du nucléaire (par exemple, l'Allemagne), mais aussi dans des pays dont les programmes marquent des à-coups, comme cela pourrait arriver en France<sup>(7)</sup>.

### Gouvernance, sûreté et faisabilité sociétale

La rapidité à laquelle se développe un programme nucléaire dépend pour une large part de l'organisation en matière de sûreté et de processus d'autorisations (dont les normes, la qualité, les modalités d'instruction, les enquêtes publiques...). Plusieurs pistes (outre la formation, comme mentionné ci-dessus) peuvent être suivies dans le

but de pallier la tendance actuelle à l'allongement des délais, tout en assurant un niveau de sûreté très élevé. Certaines sont inspirées de pratiques en usage dans l'aviation : certification générique, reconnaissance mutuelle des certifications, délégations innovantes... L'organisation tend aussi à associer les autorités de sûreté le plus en amont possible des projets (dès l'étape de conception), pour éviter des allers-retours dispendieux à une phase plus avancée. Enfin, le consentement des populations est indispensable à toute industrie énergétique. Le dialogue entre l'État, les industriels et les parties prenantes (surtout locales) est de plus en plus indispensable, probablement sous des formes nouvelles, au développement du nucléaire.

## Quel cahier des charges pour les nouveaux réacteurs nucléaires ?

Les concepts de réacteurs qui seront développés au cours des prochaines décennies visent à progresser dans de nombreux domaines.

### Le niveau de sûreté

Le niveau objectif est toujours croissant, avec notamment la rétention dans le réacteur de l'ensemble des radioéléments, même en cas d'accident grave, cela pour éviter un besoin d'évacuation et limiter les conséquences de toutes natures d'un tel accident. Cette approche est le critère principal qui caractérise la troisième génération de réacteurs. De plus, la philosophie « post-Fukushima » consiste à mettre en place des dispositifs pour pallier des événements exceptionnels par nature (hors dimensionnement). Certains réacteurs visent par leur conception à renforcer la sûreté par un fonctionnement essentiellement passif (par exemple, l'AP1000 de Westinghouse), voire par un fonctionnement totalement passif (certains petits réacteurs innovants<sup>(8)</sup>). D'autres jouent sur leur petite taille pour garantir un meilleur confinement en cas d'accident<sup>(9)</sup>.

### L'intégration dans le mix énergétique et les services associés (suivi de charge, taille)

De plus en plus de systèmes électriques intègrent des EnR intermittentes. De nombreux concepts de réacteurs nucléaires peuvent être très flexibles<sup>(10)</sup>. La complémentarité entre nucléaire et EnR est ainsi une possible réalité technique. Sa limite porte sur la baisse du facteur de charge des réacteurs en suivi de réseau. À terme, toutefois, des possibilités d'utiliser l'énergie « en excès » (production d'hydrogène ou de chaleur stockables) permettent d'imaginer des systèmes hybrides très performants. Un autre axe de développement est de réduire la

(6) Voir Monnet A., Gabriel S. & Percebois J. (2017), "Analysis of the long-term availability of uranium: The influence of dynamic constraints and market competition", *Energy Policy* 105, pp. 98-107, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.02.010>

(7) Voir, par exemple, l'étude de la Société française d'énergie nucléaire, « Quand décider d'un renouvellement du parc nucléaire français ? », note SFEN, avril 2019.

(8) Ainsi, le SMR français, grâce à son cœur aux dimensions réduites et au bassin d'eau dans lequel il est immergé, est conçu pour disposer d'un délai de grâce de sept jours, durée pendant laquelle il peut se passer d'une source de refroidissement externe et laisser le temps aux équipes d'intervenir, y compris dans des pays étrangers.

(9) Certains réacteurs à eau de moins de 1 000 MW peuvent garantir la rétention du cœur fondu (corium) en cuve, et donc ne pas nécessiter de récupérateur.

(10) Par exemple, les réacteurs actuels d'EDF, avec des « pentes » de 5 % de la puissance nominale par minute.

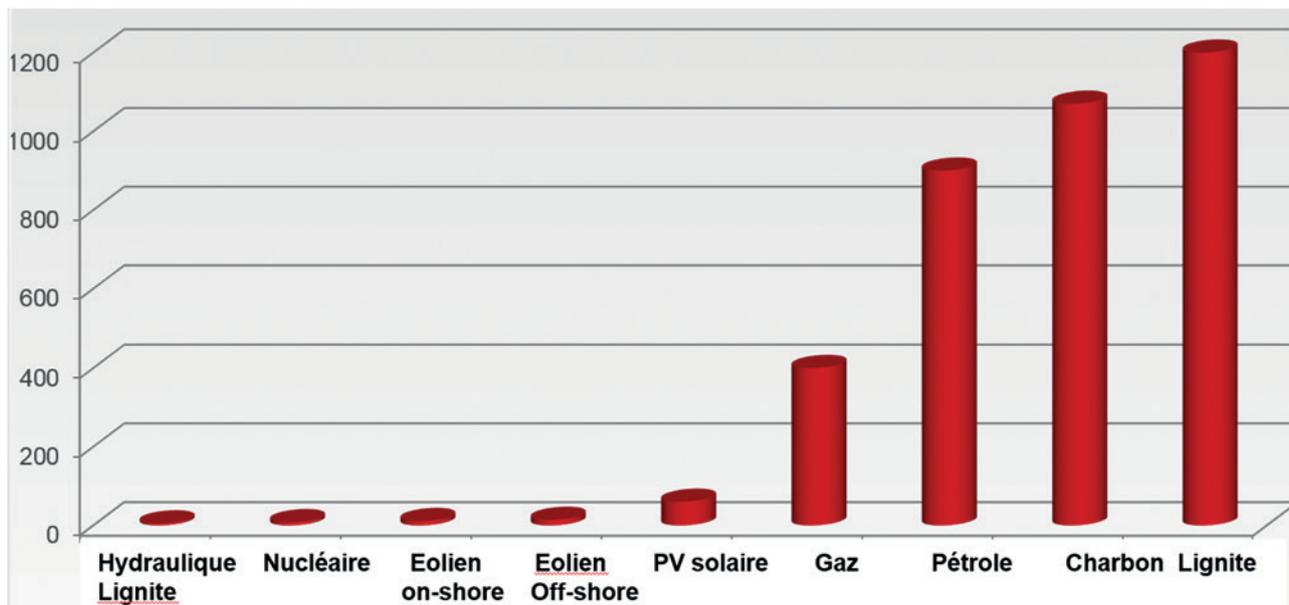


Figure 3 : Les émissions totales de CO<sub>2</sub> en cycle de vie des principales filières de production d'électricité (Source : OCDE 2006).

taille des machines pour les sites isolés, les systèmes mal interconnectés ou les marchés à l'exportation.

### L'économie (dont les délais de construction)

La baisse des coûts est, selon les régions, un impératif (voir *supra*). Celle-ci est mise en œuvre à différents niveaux : conception d'ensemble (simplification, taille), nouvelles technologies (conception : numérique, réalisation : préfabrication et fabrication additive, matériaux : bétons hautes performances, combustibles « tolérants aux accidents »), organisation (équipes intégrées). Le raccourcissement de la durée de construction est un facteur majeur de compétitivité que les SMRs (réacteurs de petite et moyenne puissances) cherchent à exploiter. L'effet de série (des programmes de six à vingt réacteurs identiques, par exemple) est aussi un puissant moteur de baisse des coûts. Enfin, un sujet clé est le partage des risques entre les parties prenantes (comme pour les EnR). Le rôle des États est en ce sens majeur. À titre d'exemple, la SFEN chiffre à 30 % au moins le gain possible pour l'EPR2 par rapport au standard actuel (celui de Flamanville).

### L'impact environnemental (dont le cycle du combustible)

Le nucléaire induit peu d'impacts environnementaux. Son bilan CO<sub>2</sub> est un des plus faibles (voir la Figure 3 ci-dessus). Les autres impacts sont essentiellement dus aux conditions d'exploitation des mines (mais ceux-ci sont très faibles à l'échelle mondiale, les tonnages étant inférieurs à 100 000 tonnes d'uranium/an) et à la gestion des combustibles usés. Le progrès en la matière vise à réduire drastiquement la consommation d'uranium<sup>(11)</sup> via les réacteurs à neutrons rapides et/ou à limiter volumes et toxicité

(11) L'objectif pour les nouveaux réacteurs est de parvenir à une consommation d'uranium quasi nulle au cours de la seconde moitié du siècle.

des déchets en recourant à des technologies avancées de traitement et recyclage. Les stratégies en question mobilisent des conceptions intégrées des réacteurs et des usines du cycle.

### Créer de nouvelles valeurs

Enfin, certains des concepts nucléaires du futur apporteront d'autres services que la production d'électricité : chaleur, froid, dessalement, production d'hydrogène, fourniture de services au réseau électrique, voire de radioéléments pour la médecine<sup>(12)</sup>. La petite taille de certains réacteurs et la totale sûreté qu'ils devraient offrir permettront, si besoin est, de les installer en sous-sol au cœur des mégapoles, en interaction avec l'ensemble du système énergétique local.

### Les technologies pour demain et après-demain

Les concepts de réacteurs des prochaines décennies sont pour certains d'entre eux des extrapolations des usines actuelles. Pour d'autres, la recherche de l'augmentation des performances a conduit à des ruptures importantes, soit dans les technologies (les réacteurs de quatrième génération), soit au niveau de la taille (SMRs).

### Les réacteurs à eau

En majorité, les réacteurs les plus récents sont refroidis et modérés (ralentissement des neutrons) par de l'eau ordinaire<sup>(13)</sup>. Ces réacteurs de troisième génération ont intégré les nouveaux objectifs de sûreté décrits *supra* et d'autres innovations, tant en ce qui concerne le concept lui-même qu'en ce qui concerne ses modalités de conception ou de

(12) C'est déjà le cas pour le plomb 212, avec Orano-Med.

(13) Par différence avec l'eau lourde, qui associe deux atomes de deutérium (et non d'hydrogène) et un atome d'oxygène.

réalisation. Nous sortons de la phase prototype pour passer à celle de leur mise en production, avec le démarrage effectif ou très proche de plusieurs EPR (Taishan, Olkiluoto, Flamanville) ou AP1000 (de Westinghouse).



Figure 4 : L'EPR de Flamanville, le concept de réacteur européen de troisième génération.

Le tableau ci-après expose l'essentiel des forces en présence, avec l'arrivée de la Chine qui développe plusieurs modèles, dont le Hualong One qui sera notamment construit au Royaume-Uni.

Un enjeu est la part que les constructeurs des pays du « Nord » (dont Framatome, en France) vont pouvoir reconquérir, alors que la Chine et l'Inde se positionnent, à l'échelle mondiale, en tête des constructions (voir la Figure 5 de la page suivante). À ce propos, la décision qui sera prise en 2021 par l'actuel gouvernement français sera déterminante<sup>(14)</sup> pour fournir à notre industrie la base nationale nécessaire à son action à l'export. La phase actuelle consiste

(14) Voir le rapport cité *supra* en note 7.

à optimiser les projets de troisième génération, au travers de concepts revisités. En France, c'est le projet EPR2 de Framatome qui est le réacteur de série appelé à renouveler le parc existant, avec un objectif de coût de l'ordre de 65 €/MWh.

### Les réacteurs de quatrième génération

Le concept de réacteurs de quatrième génération regroupe les réacteurs reposant sur des technologies en rupture. On y trouve des réacteurs refroidis au sodium, au gaz, ou par des métaux fondus (plomb et bismuth, notamment). Pour certains, la température du fluide est très élevée (jusqu'à 1 000°C), offrant ainsi des rendements fortement améliorés et de nouvelles possibilités d'usages industriels de la chaleur.

Les réacteurs à sodium sont les plus matures sur le plan industriel (plusieurs d'entre eux fonctionnent ou ont fonctionné, d'autres sont en construction). Via le recyclage des combustibles, ils permettent notamment de réduire pratiquement à zéro la consommation d'uranium<sup>(15)</sup> et ouvrent la porte à une énergie électrique quasi illimitée<sup>(16)</sup> à un coût qu'il faudra néanmoins maîtriser<sup>(17)</sup>. C'est le choix technique fait par la France, alliée notamment au Japon, pour un recyclage durable des matières.

Hors du champ de la quatrième génération, les réacteurs à thorium ou la fusion sont des technologies qui pourraient émerger quantitativement d'ici à la fin du siècle.

(15) DEVEZEAUX de LAVERGNE J.-G, GAUCHÉ F. et MATHONNIÈRE G. (2012), « Recyclage du combustible et réacteurs de quatrième génération », *Revue générale nucléaire*, n°2, mars-avril, pp. 92-99.

(16) La limite principale devenant alors la disponibilité des sites de stockage des déchets. Mais il faut noter que ces réacteurs ont aussi la possibilité de réduire la toxicité de ces derniers.

(17) Ce coût dépend notamment de celui de l'uranium. Les travaux du CEVI-tésé positionnent la période de compétitivité de ces réacteurs dans la seconde moitié de ce siècle.

	Design	Décision	Démarrage	Durée de construction (années)			Connection
				prévue	retard	Totale	
OL3	EPR	2003	août-05	4	9	13	2019
FLA 3	EPR	2005	déc-07	5	6	11	2020
<u>NovoV 2.1</u>	VVER1200	2006	juin-08	7	1	8	2016
Leningr 2.1	VVER1200	2006	oct-08	5	3	8	2018
Sanmen 1	AP1000	2007	avr-09	6	3	9	2018
Hayiang 1	AP1000	2007	sept-09	5	4	9	2018
Shin Kori 3	APR1400	2007	oct-08	5	3	8	2016
Taishan1	EPR	2007	oct-09	5	4	9	2018
Vogtle 3	AP1000	2008	mars-13	4	2	6	??
Fuqing 5,6	HUALONG 1	2014	mai-15	5	?	?	2019-2020

Tableau 1 : Les réacteurs de dernière génération en construction dans le monde.

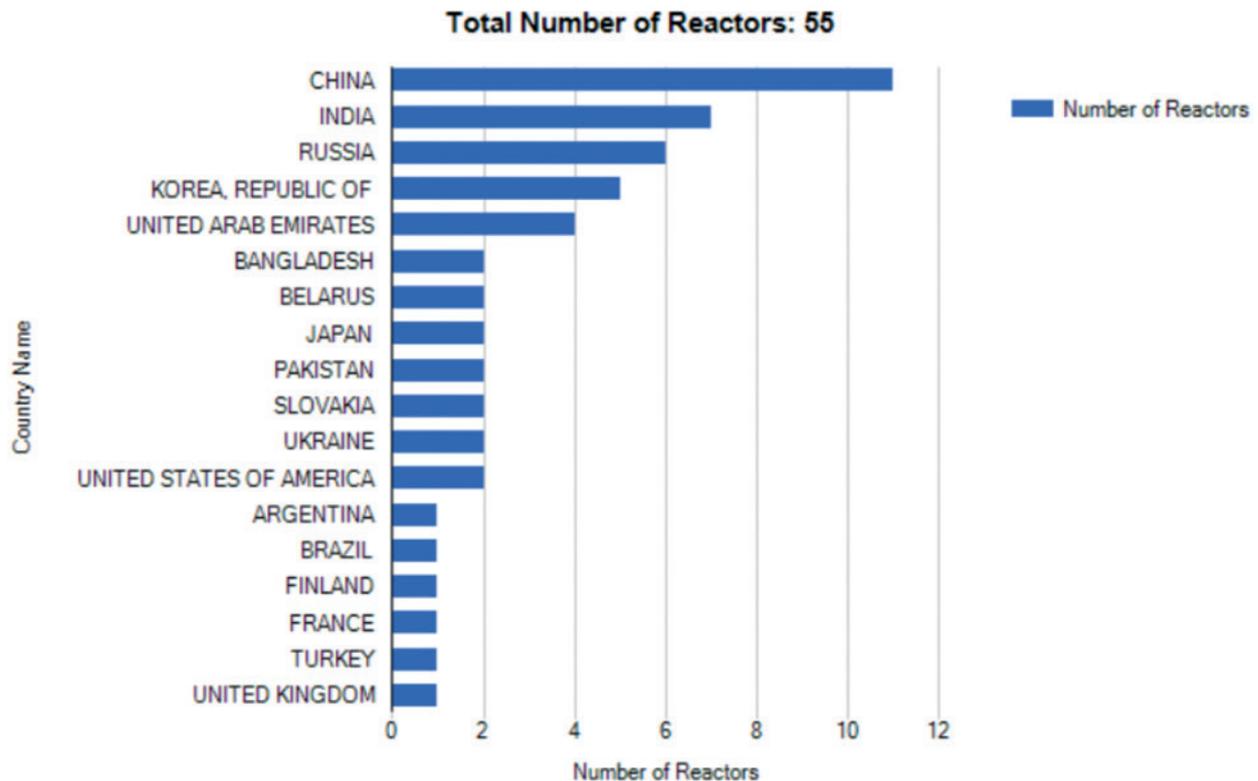


Figure 5 : Les réacteurs en construction dans le monde (base PRIS, AIEA).

### Focus sur les réacteurs de petite taille

Depuis une dizaine d'années, de très nombreux concepts sont développés, notamment par des *start-ups* aux États-Unis. On en compte plus de cinquante. L'un des projets les plus avancés est celui de la firme Nuscale (modules de 50 MWe), dont le premier prototype pourrait diverger aux États-Unis en 2027. À partir de 2012, la France a travaillé à son F-SMR (modules de 150-170 MWe) destiné à étoffer l'offre de réacteurs français à l'export. Un consortium français (EDF, Naval Group, TechnicAtome et CEA) développe des innovations en rupture visant une forte compétitivité (avec pour objectif, un coût inférieur à 100 €/MWh), pour pouvoir notamment s'approprier des marchés de niches, comme tous ses homologues. Ces niches regroupent des réseaux de petites tailles (des îles ou des sites militaires, par exemple), concernent le remplacement de réacteurs

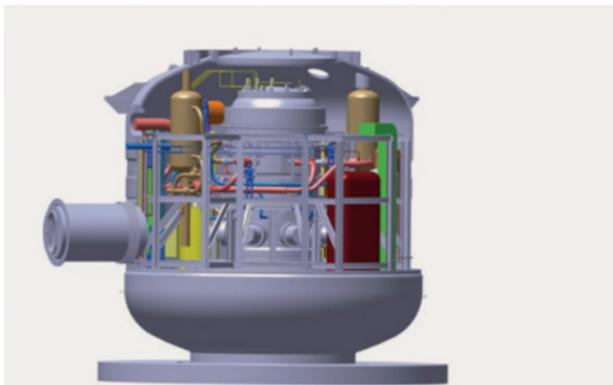


Figure 6 : Le cœur innovant du réacteur F-SMR français (source : TechnicAtome).

thermiques. Citons aussi la stratégie des pays « primo-acédants », qui cherchent à franchir une première étape sur la voie d'une industrialisation rapide.

### La place des réacteurs dans les systèmes énergétiques du futur

Le développement du nucléaire ne dépend pas, et de loin, exclusivement des nouveaux progrès de la technologie des réacteurs, aussi diversifiée et innovante soit-elle. Nous avons évoqué plus haut le cas du cycle du combustible et des déchets, ainsi que l'intérêt de concevoir des systèmes entiers permettant de créer conjointement des valeurs de natures multiples. Des progrès technologiques majeurs sont en cours, qui entraîneront l'émergence de nouvelles fonctionnalités ou services (par exemple, le progrès très significatif que représentent les conduites de chaleur à grande distance pour la cogénération). Inversement, l'insertion des réacteurs nucléaires de nouvelle génération dans les systèmes intégrés du futur favorisera des fonctions encore inédites : suivi de charge rapide et de grande amplitude (pour hybridation avec les EnR), production de haute température, capacité de déplacement des installations (réacteurs mobiles), absence de besoin de chargement (réacteurs à cœur unique)...

### Quelle place pour le nucléaire dans la transition énergétique en France et dans le monde ?

#### La place du nucléaire dans la transition à l'échelle mondiale

Dans ses prévisions récentes, l'Agence internationale de l'énergie décrit un scénario « Haut Nucléaire » qui at-

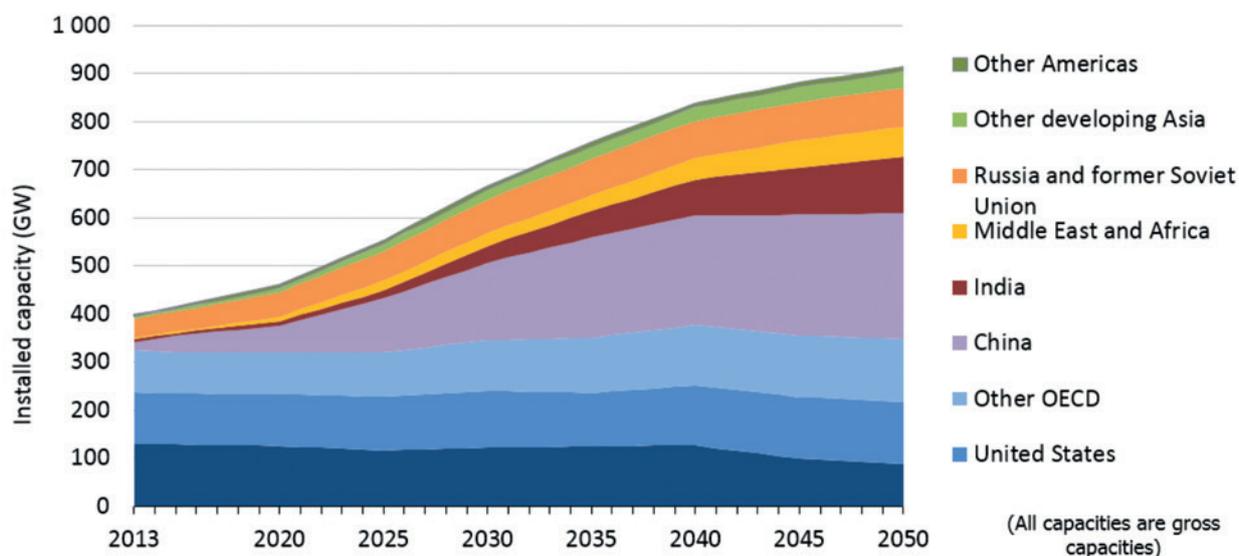


Figure 7 : Scénario de développement du nucléaire mondial et la ventilation des puissances entre les différentes régions du monde (Source : AIE, 2016).

teindrait plus de 900 GW en 2050<sup>(18)</sup>. D'autres scénarios tablent sur des puissances plus faibles, mais correspondant, au minimum, au maintien de la puissance actuelle. De fait, même si les incertitudes sont fortes, le rôle du nucléaire dans la décarbonation mondiale pourrait devenir crucial dans la phase dite de décarbonation profonde (vers le « zéro émissions nettes ») à partir de 2040 environ. La contribution de cette énergie à la concrétisation des résultats voulus par l'Accord de Paris serait voisine de 10 % du total, à égalité ou presque avec le solaire et l'éolien<sup>(19)</sup>. Dans le scénario *supra*, les puissances futures se répartiraient comme indiqué dans la Figure 7 ci-dessus, avec un rôle central de l'Asie.

### Les parts de marché des différentes technologies

L'essentiel du futur marché, d'ici à 2050, sera constitué de grands réacteurs à eau légère de génération 3 (voir *supra*). La compétition sera vive entre les acteurs historiques et les (relativement) nouveaux arrivants, telle la Chine aujourd'hui, l'Inde demain, avec une place particulière pour une Russie volontariste. La puissance nucléaire nord-américaine serait, dans la majorité des scénarios, orientée à la baisse. Les politiques industrielles sont encore animées par les États, ce qui pourrait peut-être évoluer, surtout pour les fournisseurs amont de la *supply chain*.

À l'horizon de quelques décennies, une autre partie se jouera avec les SMRs. Une analyse de l'OCDE a estimé leur marché à une vingtaine de GW en 2035<sup>(20)</sup>. Des éva-

luations françaises récentes extrapolent ce marché pour aller jusqu'à 50 GW d'ici à 2040. Il représenterait alors de l'ordre de 20 % du marché total du nucléaire.

### Le cas de la France dans l'Europe

L'Union européenne, considérée comme une zone géopolitique, reste le premier acteur nucléaire mondial. Avec quelque cent trente réacteurs en exploitation, elle dépasse nettement les États-Unis, qui est le second plus important « exploitant nucléaire » au monde et devance toujours des pays comme la Chine.

Aujourd'hui, quatorze États membres de l'UE continuent de recourir à l'énergie nucléaire, mais plusieurs autres, comme l'Autriche, l'Irlande et le Luxembourg, contestent le bien-fondé de cette source d'énergie. D'autres pays européens ont décidé de sortir du nucléaire (Allemagne) ou de ne pas relancer leur programme (Italie).

Toutefois, d'autres États membres poursuivent sur la voie du nucléaire : de nouveaux réacteurs sont ainsi en construction en Finlande, en France, en Slovaquie et au Royaume-Uni. Enfin, d'autres pays souhaitent recourir à cette énergie dans les années qui viennent, comme la Pologne. Le Programme indicatif nucléaire (PIN) en vigueur prévoit une légère baisse, puis une stabilité à moyen terme de la puissance nucléaire européenne installée.

La France bénéficie largement de son parc installé (coûts, export, flexibilité), mais doit faire face à trois grands défis : l'allongement de la durée moyenne d'exploitation des réacteurs (avec le programme du « Grand Carénage »), le choix politique d'augmenter rapidement la part des EnR dans le bilan électrique et la gestion de sa *supply chain*. En situation de demande électrique stable, les marges de manœuvre en matière d'ajustement deviennent plus faibles, et les risques de coûts échoués dus à l'arrêt prématuré d'équipements lourds augmentent. L'arbitrage du gouvernement exprimé récemment dans une loi modifiant

(18) AIE, scénario 2°C, "high nuclear", 2016. D'autres scénarios, moins optimistes (et moins aptes à une décarbonation de la planète), tablent sur une puissance constante. L'AIE va, cette année, réactualiser ses scénarios nucléaires.

(19) Voir l'étude de l'Alliance ANCRE, "Decarbonization Wedges Report", novembre 2015, [www.allianceenergie.fr/rapport-ancre-decarbonization-wedges-paru/](http://www.allianceenergie.fr/rapport-ancre-decarbonization-wedges-paru/)

(20) Voir le rapport "Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment", OECD/NEA, 2016.

la loi de Transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) a défini un objectif de 50 % de production nucléaire en 2035.

Compte tenu de l'âge très resserré de la flotte de nos réacteurs, EDF doit, pour atteindre cet objectif, ajuster, en les « lissant », les durées d'exploitation de ses réacteurs, alors que, dans la même période, il apparaît crucial de lancer un nouveau programme électronucléaire. La décision du renouvellement de la flotte, qui devrait être prise en 2021, sera un moment crucial<sup>(21)</sup>.

## Conclusion

Nous vivons dans un monde volatil, incertain, complexe et ambigu. Personne ne sait quelle énergie, électrique ou autre, sera la plus attractive dans les systèmes énergétiques des années 2050, qui devraient être dominés par la volonté de décarboner. Mais nous savons que l'avenir sera de mixer des sources de production aux caractéristiques techniques très différentes. Le nucléaire, qui sort de la période de maturation de ses réacteurs de troisième génération, a de nombreux atouts : coûts stables, très faible bilan carbone, ressources en uranium importantes ou gérables *via* la quatrième génération, commandabilité, flexibilité, diversification des offres... Il est très dynamique en matière d'innovations et sa palette d'offres se diversifie au plan international (grands réacteurs optimisés, SMRs, réacteurs de quatrième génération).

---

(21) Voir le rapport cité *supra* en note 7.

En situation de forte complémentarité avec les EnR, les réacteurs nucléaires de demain pourraient atteindre une puissance totale de 500 à 900 MW en 2050, et contribuer ainsi à près de 10 % au nécessaire effort de décarbonation à l'échelle mondiale. Les techniques sont ou seront disponibles à terme bref. Les incertitudes sont plutôt au niveau des politiques qui seront menées, et renvoient à des questions de faisabilité sociale et de géopolitique.

Compte tenu de l'âge plutôt élevé du parc nucléaire actuel, c'est l'essentiel de la flotte mondiale qui est à reconstruire. Le marché est donc considérable, avec probablement plus de 1 000 réacteurs d'ici à 2050, compte tenu de l'arrivée des SMR. Les enjeux industriels sont ainsi de grande ampleur, notamment de par la présence de la Chine qui, forte d'un marché domestique de première grandeur, pourrait se tailler la part du lion, ou plutôt du tigre, à l'export.

Des technologies performantes (réacteurs, cycle) et une *supply chain* française réorganisée poussent à retenir le nucléaire comme un des éléments majeurs de la solution dans notre pays, et potentiellement en Europe. Au plan économique, l'optimum est de maximiser la durée d'exploitation des réacteurs existants... Ce qui pourrait amener à différer les nouvelles constructions. Mais cette stratégie de *stop and go* serait très lourde de conséquences industrielles en favorisant définitivement la concurrence étrangère. La logique qui apparaît dès lors la meilleure à ce stade est de baisser les coûts des réacteurs de troisième génération (par rapport aux têtes de série) et de renouveler sans tarder le parc actuel en recourant au réacteur EPR2.