

Les petits réacteurs modulaires, une nouvelle ère nucléaire ? Approche géopolitique et stratégique

Michel Derdevet*, Nicolas Mazzucchi**

@ 57374

Mots-clés : nucléaire, durabilité, électricité, innovation, technologies

Le nucléaire fera à l'évidence partie des solutions décarbonées de demain. Mais quel nucléaire? À côté du nucléaire conventionnel et d'autres filières (EPR...) se profile une solution plus small et smart, celle des petits réacteurs nucléaires modulaires, baptisés SMR (Small Modular Reactor), AMR (Advanced Modular Reactor), MMR (Micro Modular Reactor) ou XSMR (eXtra Small Modular Reactor). Comment se construit le nouveau modèle technico-économique lié? Quels atouts en termes de résilience présentent ces nouveaux réacteurs? Comment faire que la France et l'Europe ne soient pas distancées, à la fois en termes de R&D et de production industrielle? Le sujet des SMR sera à l'évidence au cœur des débats énergétiques de demain.

Au vu des manifestations climatiques de cet été 2021 («dômes de chaleur» au Canada et au Maghreb, inondations exceptionnelles dans le centre de l'Europe, incendies généralisés en Californie et dans les pays de la rive nord de la Méditerranée, etc.), une évidence s'impose : le «tic-tac» de l'horloge climatique, pour reprendre l'image de Christian de Perthuis, est bien enclenché, et notre planète est *a minima* sur une trajectoire — dramatique — de réchauffement de 3 °C, bien loin de l'objectif maîtrisé de +1,5 °C conclu le 12 décembre 2015 à l'issue de la COP21. Le rapport du GIEC publié le 9 août dernier confirme cette trajectoire délétère [GIEC, 2021].

La raison est simple et bien connue : les émissions de CO₂ générées par les activités humaines. Dans le domaine de l'énergie, les trois principales sources d'énergies fossiles

utilisées aujourd'hui dans le monde, le charbon, le pétrole et le gaz naturel, représentent encore 84,3 % de la consommation énergétique mondiale; et le charbon, à lui seul, représente 50 % de l'énergie consommée en Asie. Leur contribution est dans ce domaine majeure et la croissance économique, notamment en Asie, entraîne une explosion mécanique des émissions du secteur de l'énergie.

Il faut donc d'urgence viser une décarbonation maximale de nos économies et de nos systèmes électriques, via un basculement généralisé vers l'ensemble des énergies non émettrices de CO₂. Dans sa *roadmap* 2050, présentée le 18 mai 2021, l'Agence Internationale de l'Énergie appelle ainsi, entre autres, à oublier dès maintenant tout projet d'exploration pétrolière et gazière, à ne plus vendre de voitures thermiques neuves au-delà de 2035, et à faire du solaire la première source d'énergie dans le monde.

* Confrontations Europe; EY-Parthenon.

** Fondation pour la Recherche Stratégique (cf. biographies p. 68).

Si ces recommandations étaient suivies, tant par les États que par les industriels, les ressources fossiles ne devraient plus fournir à l'horizon 2050 qu'un cinquième de l'énergie utilisée, la production de charbon chutant de 90 %, celle de pétrole de 75 %, et la demande globale en énergie baissant de 8 % nonobstant un accroissement de 2 milliards d'habitants sur notre planète. Dans le même temps, la part des renouvelables serait multipliée par huit, pour atteindre autour de 90 % du mix électrique mondial, les 10 à 12 % restants étant dévolus au nucléaire¹. Ainsi, le « débat » hexagonal (voire européen), aussi passionné que passionnel, opposant EnR et nucléaire est tout simplement à revisiter vu ces données.

1. Nucléaire et transition énergétique : une complémentarité évidente

Pour reprendre la formule de Fatih Birol, directeur exécutif de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), « nous n'avons pas le luxe de nous priver de l'une ou de l'autre de ces énergies propres. Pour la France, le nucléaire et les énergies renouvelables sont complémentaires ». Toujours selon l'AIE, pour atteindre les objectifs climatiques internationaux, il faudrait que 85 % de l'électricité mondiale provienne de sources décarbonées d'ici 2040... contre 36 % aujourd'hui; ce qui nécessiterait à cet horizon une augmentation de 80 % de la production mondiale d'énergie nucléaire. Au plan économique et financier, l'AIE a enfin estimé, dans un rapport publié en mai 2019, que la transition énergétique serait bien plus coûteuse sans électricité nucléaire, requérant un investissement additionnel de 820 milliards USD pour les économies avancées.

Cette crainte est aujourd'hui relayée en Allemagne. Dix années après la décision politique de sortir pleinement du nucléaire — de manière accélérée suite à la catastrophe de Fukushima — à l'horizon 2022, la Cour des comptes de ce pays a souligné en mai dernier que la sécurité d'approvisionnement en électricité risquait à court terme de ne plus être assurée, qu'il existait un risque de pénurie d'électricité et que les

coûts étaient hors de contrôle. Pour mémoire, les ménages allemands paient déjà le kilowattheure le plus cher d'Europe, à 30,9 centimes, soit près de deux fois plus cher qu'en France où il est à 17,8 centimes; car l'Allemagne a fait le choix de faire peser les surcoûts sur les ménages, afin de favoriser sa compétitivité industrielle. Devant l'augmentation des prix de l'énergie pour les entreprises, la Cour des comptes allemande voit par ailleurs une menace pour l'activité industrielle nationale. Or, ces avertissements arrivent à l'heure où la compétitivité allemande est remise en cause dans certains secteurs, par exemple dans l'automobile qui éprouve des difficultés à prendre le tournant du véhicule électrique, face notamment à une concurrence asiatique féroce.

On le voit donc : à l'heure de l'électrification massive des usages, le nucléaire ne peut pas, tant au plan économique que technique, être balayé d'un revers de main; il doit faire partie des solutions décarbonées de demain, y compris et surtout du fait de ses caractéristiques pilotables, si précieuses au fur et à mesure que la part du photovoltaïque et de l'éolien va croître partout en Europe et dans le monde. Dans un rapport commun publié le 27 janvier 2021, l'AIE et RTE rappellent d'ailleurs qu'un mix de production 100 % renouvelable ne serait atteignable dans notre pays que si les sources de flexibilité étaient développées de manière importante, notamment le pilotage de la demande, le stockage à grande échelle, les centrales de pointe, combinés avec des réseaux de transport et des interconnexions transfrontalières bien développées. Les coûts de mise en œuvre à cette échelle sont particulièrement élevés s'agissant de technologies émergentes, en particulier dans le domaine du stockage en grand volume, à l'exception de quelques solutions spécifiques comme les STEP (Stations de Transfert d'Énergie par Pompe).

Dans ce contexte, faut-il rappeler que le nucléaire présente justement l'avantage intrinsèque de faire partie de ces moyens de production pilotables et dispatchables, si complémentaires des modes de production renouvelables, intermittents et non stockables.

Les petits réacteurs modulaires, une nouvelle ère nucléaire ? Approche géopolitique et stratégique

On l'oublie trop souvent, mais la puissance délivrée par les 58 réacteurs nucléaires du parc installé en France peut varier très rapidement (de 100 % à 20 % en moins de trente minutes), ce qui constitue un formidable outil de flexibilité, immédiatement disponible. Le parc français permet ainsi de stabiliser le système électrique, en disposant de plus de 20 GW de flexibilité, qui offrent la possibilité d'ajuster en temps réel l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité. Cette caractéristique particulière fait de la France le *swing producer* électrique au niveau européen qui permet d'équilibrer la charge sur la plaque continentale, en évitant des *black-out* majeurs et approvisionnant *de facto* l'Europe en électricité bas carbone.

Ceci étant, si l'on revient au niveau mondial, quatre évolutions majeures se profilent :

1. Le parc mondial actuel de 439 réacteurs vieillit plus vite qu'il n'est renouvelé; et d'ici 2025, c'est-à-dire demain, près d'un quart de la capacité nucléaire existante devrait être arrêté, entraînant des milliards de tonnes d'émissions de CO₂ supplémentaires; il faut donc dans les mois et années, et non les décennies, à venir imaginer le nucléaire du futur, qui viendra se substituer aux centrales en cours de fonctionnement depuis les années 1960².

2. Un basculement géopolitique est à l'œuvre, qui déplace le centre de gravité du nucléaire mondial vers la Chine. En 2030, ce pays devrait dépasser l'Europe et les États-Unis en matière de capacités nucléaires installées, s'appuyant principalement sur des technologies domestiques. La Chine espère ainsi atteindre 150 GW de puissance nucléaire installée en 2035, soit 10 % de son électricité, ce qui impliquera la construction de dizaines de réacteurs ces quinze prochaines années.

3. La question des coûts du nucléaire s'invite obligatoirement au débat, avec un triple constat ces dix dernières années :

- La chute vertigineuse du coût direct des énergies renouvelables : l'amélioration des technologies, les économies d'échelle, ainsi

que la compétitivité des chaînes d'approvisionnement ont entraîné une forte baisse du coût de l'électricité issue de ces moyens de production. Depuis 2010, les baisses de coûts enregistrées au plan mondial sont considérables : -85 % pour l'électricité solaire photovoltaïque à échelle industrielle; -68 % pour l'énergie solaire à concentration (CSP); -56 % pour l'éolien terrestre, et -48 % pour l'éolien *offshore*. Et ce mouvement s'est amplifié en 2020 : le coût du solaire thermique à concentration (CSP) a ainsi baissé sur la seule année écoulée de 16 %, l'éolien terrestre de 13 %, l'éolien *offshore* de 9 % et le solaire photovoltaïque de 7 % [IRENA, 2021].

- Dans le même temps, les coûts directs du nucléaire « historique » se sont eux alourdis, notamment depuis l'accident de Fukushima qui a vu, partout dans le monde, les autorités de sûreté nucléaire hausser leur niveau d'exigence. En France, la seule prolongation de dix à vingt ans des réacteurs en service devrait ainsi coûter 50 milliards EUR.

- On notera aussi que les filières de remplacement évoquées ces quinze dernières années n'ont pas jusqu'ici répondu aux attentes formulées à leur endroit. Ainsi, le 9 juillet 2020, la Cour des comptes soulignait concernant le projet de réacteur nucléaire européen à eau pressurisée (EPR³) les difficultés et les coûts de construction, qui ont dérivé, ainsi que la surestimation de la capacité de la filière nucléaire française à y faire face, au prix de risques financiers pour les entreprises du secteur. Pour elle, « la multiplication par 3,3 du coût de construction, estimé par EDF à 12,4 milliards (Md) EUR (valeur 2015), et par au moins 3,5 du délai de mise en service de l'EPR de Flamanville par rapport aux prévisions initiales, constitue une dérive considérable qui résulte d'estimations de départ irréalistes, d'une mauvaise organisation de la réalisation du projet par EDF, d'un manque de vigilance des autorités de tutelle et d'une méconnaissance de la perte de compétence technique des industriels de la filière ».

C'était moins d'un an avant l'incident intervenu le 14 juin 2021 dans le réacteur EPR n°1 de Taishan, qui a entraîné depuis l'arrêt de celui-ci pour maintenance et contrôle et fragilise

un peu plus encore, dans son ensemble, la filière EPR. L'incident de Taishan, survenu sur un réacteur ultra-sécurisé de dernière génération, dont les autres prototypes (en France, en Finlande ou en Grande-Bretagne) n'ont pas encore abouti, va nécessairement nourrir le débat sur les technologies nucléaires à développer ces prochaines années, et surtout sur les priorités à mobiliser en termes d'investissements en faveur des nouveaux projets nucléaires.

4. Ainsi, le nucléaire conventionnel, incontestablement décarboné, est admis comme sécurisé ; mais il reste insuffisamment compétitif dans sa forme actuelle. Il ne répond donc qu'à deux des exigences du trilemme énergétique formulé par le Conseil Mondial de l'Énergie : créer un cadre politique qui permette de fournir une énergie sûre, abordable et respectueuse de l'environnement. S'il veut jouer le rôle qui lui revient dans la résolution de ce trilemme, il doit donc être, demain, à la pointe de la compétitivité pour être en mesure de rivaliser sur la base de coûts-bénéfices réels avec les alternatives aux combustibles fossiles.

Pour ce faire, il doit faire évoluer sa propre industrie au niveau technologique, afin qu'elle devienne progressivement meilleure que la technologie existante. Pour soutenir sa compétitivité, il doit mettre en cause ses propres coûts-bénéfices sans tabous, car ce sont les seuls leviers primaires qui feront bouger les acteurs économiques.

C'est dans ce contexte que se profile, partout dans le monde, une autre solution, plus *small* et *smart*, celles des petits réacteurs nucléaires modulaires, connus sous le terme générique de SMR. Selon l'OCDE [OCDE, 2021], le marché des SMR est évalué à 20 GWe d'ici 2035, avec un effet de série s'exerçant à un niveau de production de 70 à 100 SMR/an.

Des États-Unis à l'Asie, en passant par la Russie, de nombreux pays misent actuellement sur ces mini-réacteurs nucléaires, baptisés SMR (*Small Modular Reactor*), AMR (*Advanced Modular Reactor*), MMR (*Micro Modular Reactor*) ou XSMR (*eXtra Small Modular Reactor*) et les

développent pour produire à grande échelle des microgénérateurs d'énergie électrique de 1 à 350 MW. Et ils le font avec le soutien actif des gouvernements concernés. Ainsi, comme le souligne Charles Merlin [IFRI, 2019], «dès 2015, le soutien financier aux SMR, notamment aux concepts de 4^e génération, a pris une autre dimension. Le DoE (Department of Energy, USA) a lancé le programme Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear (GAIN) afin de développer les supports technique, réglementaire et financier nécessaires aux développements de ces nouveaux réacteurs.» Et au-delà de l'allocation régulière de subventions, le Congrès américain a également entamé ces derniers mois un véritable effort législatif pour le développement des SMR, levant petit à petit les principaux obstacles réglementaires au développement de ces nouveaux réacteurs.

2. Le SMR, un nouveau modèle techno-économique

L'un des principaux problèmes identifiés quant aux réacteurs nucléaires «traditionnels» tient au modèle industriel et économique que ceux-ci imposent, par leur coût et leur complexité : un prix extrêmement élevé, au-delà le plus souvent du milliard USD pour chaque réacteur, avec une rentabilité qui ne se réalise que plusieurs décennies après la mise en service de celui-ci. Il s'agit donc — comme l'a démontré le succès du modèle Rosatom [Mazzucchi, 2019] — de disposer à la fois d'une capacité de financement importante — dans ce dernier cas au travers des institutions étatiques ou paraétatiques russes — mais aussi d'une offre intégrée verticalement au niveau industriel. Seuls les pays à fort capitalisme d'État sont aujourd'hui en mesure de proposer un tel modèle et les difficultés françaises s'expliquent aussi par la complexité des systèmes de financement ; EDF a notamment dû s'associer avec son concurrent chinois CGN pour être en mesure de construire l'EPR d'Hinkley Point-C. La planification de long terme avec sécurisation des financements sur plusieurs décennies apparaît ainsi dans beaucoup de pays du monde, notamment en sphère euroatlantique, comme

Les petits réacteurs modulaires, une nouvelle ère nucléaire ? Approche géopolitique et stratégique

un modèle dépassé qu'il est nécessaire de réinventer au risque d'une perte accrue de compétitivité, s'agissant des installations de production électrique.

En France, cette question de la planification politico-économique est patente pour les réacteurs EPR dont une partie importante des retards — pour les projets européens que sont Flamanville-3 et Olkiluoto — est due à la perte de savoir-faire technique lié à certaines parties spécifiques, conséquence partielle d'une politique erratique depuis plus de deux décennies. Les enjeux de maintien des capacités humaines, liées en particulier à des qualifications précises de techniciens supérieurs, en chaudronnerie ou robinetterie, sont ainsi apparus au grand jour au cours des années 2010, avec les conséquences détaillées dans le rapport précité de la Cour des comptes. Ainsi, le modèle «traditionnel» du réacteur nucléaire de forte puissance implique une alliance complexe entre l'excellence de la R&D et ce que l'on pourrait

pratiquement qualifier «d'artisanat d'art» industriel, au niveau de la fonte et de l'assemblage d'un certain nombre de pièces critiques. En ce sens, ce type de réacteur, dont l'EPR est en France le symbole, repose sur un modèle techno-industriel que l'on pourrait appeler «la cathédrale». Les compétences d'ingénierie y sont au moins aussi importantes que celles liées à l'assemblage, avec le besoin d'entretenir un flux continu de spécialistes ingénieurs et techniciens supérieurs, au risque d'une perte de compétence critique. La différence entre des pays comme la France et les États-Unis face à d'autres comme la Russie et la Chine, dans le succès actuel au niveau de l'industrie nucléaire civile, s'explique partiellement par cette question des ressources humaines. Alors qu'en France les années 1960-1980 ont été celles du développement de l'industrie électro-nucléaire, avec comme corollaire un investissement fort sur la formation, les années 1990 et surtout 2000 ont été au contraire celles de la remise en question de cette industrie avec,

Décennie de début de construction des réacteurs de production électrique en France

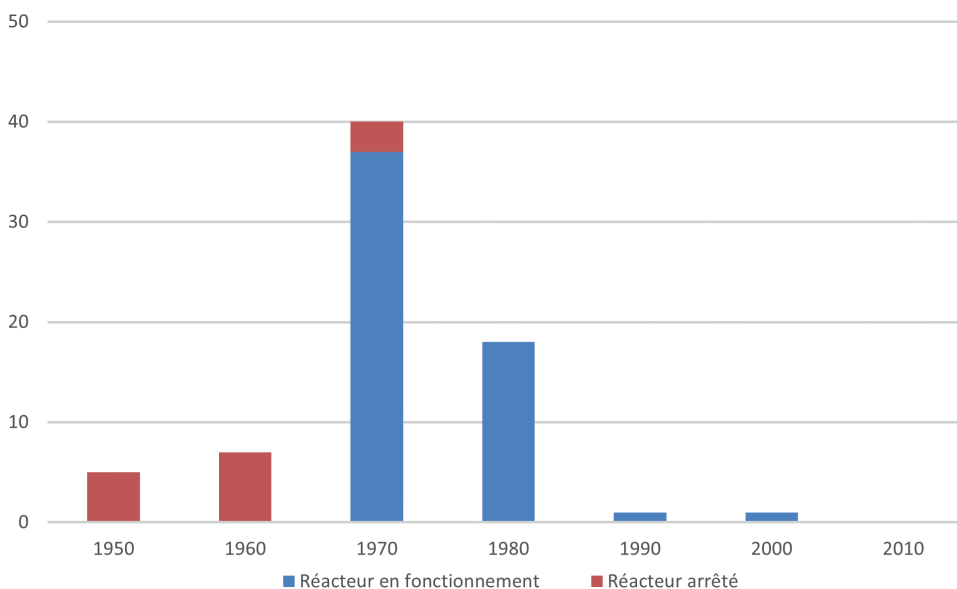


Figure 1. Classement des réacteurs nucléaires de production électrique suivant leur décennie de début de construction (coulé du premier béton); la décennie 2000 correspond au réacteur de Flamanville-3, pas encore en service en 2021

outre la désindustrialisation globale du pays, la limitation drastique de la construction de nouveaux réacteurs. Avant Flammanville-3 dont la construction a débuté en 2007, la dernière mise en construction était celle de Civaux-2 en 1991. Une situation similaire se retrouve aux États-Unis, avec l'effet conjugué de Three Miles Island et de Tchernobyl qui entraîna le même effondrement dans les constructions. Au contraire, la Russie maintient ses compétences, notamment au travers d'un soutien étatique fort au secteur, avec une remise en cause profonde du fonctionnement, l'ensemble de celui-ci aboutissant à la création de Rosatom en 2007. Quant à la Chine, tard venue sur le marché du nucléaire, elle apparaît comme l'acteur le plus en croissance, avec ses besoins internes et ses ambitions externes.

À cette question de la compétence, les SMR apportent une solution intéressante qui est celle de l'industrialisation de la production. En effet, en se reposant sur un flux important de production — qui plus est le plus standardisée possible —, induit notamment par la puissance limitée de chaque unité, l'entretien des compétences spécifiques de construction est bien plus aisé, évitant *de facto* le risque de la perte de savoir-faire humain. La construction en amont d'un nombre important de sous-ensembles standardisés permet ainsi, avec la chaîne logistique adéquate, un abaissement aussi bien des coûts globaux que des temps de production. L'étalement du coût en capital induit par la standardisation, voire la «massification», réduit mécaniquement le prix final par unité [Expert Finance Working Group, 2018]. De fait, le modèle industriel des SMR permettrait, si les promesses qu'il porte sont tenues, de résoudre partiellement deux problématiques majeures de l'industrie électronucléaire : la temporalité et le prix. La possibilité de cette construction standardisée et sérielle renvoie finalement à un modèle techno-économique bien connu et qui a été au cœur du succès de nombreuses entreprises du xx^e siècle. Il n'est ainsi pas étonnant de voir que les États-Unis ont justement encouragé — au travers d'une entente interministérielle — le développement des SMR pour répondre aux défis énergétiques

multiples que le pays affronte, en particulier avec son retard certain dans la transition énergétique. La possibilité d'installer en parallèle un certain nombre de SMR, dans une optique de modularité des centrales, ouvre également des possibilités nouvelles en ce qui concerne l'après-vie de ces unités, lesquelles bénéficient de toute façon des avancées liées à la Génération III+ dans ce domaine.

Il s'agit là de la première des évolutions majeures que propose le modèle SMR par rapport au modèle traditionnel. À celle-ci, il faut également ajouter la modularité intrinsèque au concept même de petit réacteur modulable. Leur installation s'effectue de manière progressive sur un même site par adjonction de modules complémentaires (par exemple six modules de 50 MW mis en service successivement pour atteindre 300 MW). Leur conception passe aussi par le fait que chacun de ces modules est monté sur site, à partir de composants fabriqués en usine, offrant ainsi la possibilité de remplacer facilement tout ou partie d'un des réacteurs. Ce dernier point induit une durée de vie de chaque centrale plus longue, permettant de prendre en compte certains sauts technologiques comme celui de la Génération IV. La question importante du prolongement de la vie de certaines centrales — avec les coûts que cela suppose sur le «grand carénage», tout comme le coût politique important de ces décisions — est ainsi minorée par rapport aux modèles traditionnels de réacteurs, comme ce fut le cas pour Fessenheim. Cette même modularité est également intéressante dans le contexte de la transition énergétique telle qu'elle se déroule en Europe, avec une décentralisation progressive de la production, vers une plus grande proximité avec les consommateurs. Cette décentralisation, qui impose de repenser les réseaux électriques comme des infrastructures bidirectionnelles [Beltran, Roques, Derdevet, 2017 ; Derdevet, 2020] à même de faire face à de nouveaux usages et à une situation inédite dans le domaine du transport et de la distribution, est en réalité tout à fait compatible avec le modèle des SMR qui peuvent s'envisager eux-mêmes dans cette logique décentralisée,

Les petits réacteurs modulaires, une nouvelle ère nucléaire ? Approche géopolitique et stratégique

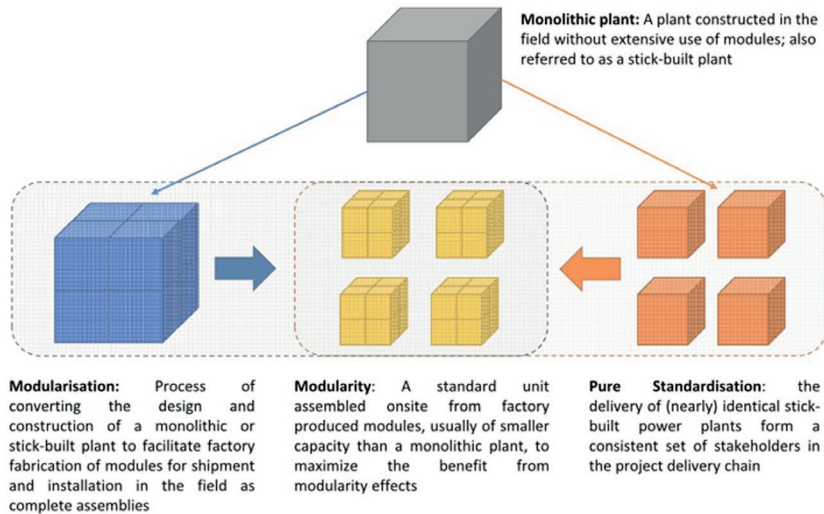


Figure 2. Différences entre les approches monolithique et modulaire

Source : Mignacca et Locatelli (2020)

dépendant bien entendu de la puissance unitaire considérée pour chaque réacteur.

En termes économiques, la rentabilité des SMR demeure à ce stade difficile à évaluer. Toutefois, en se fondant sur les données économiques de Mignacca et Locatelli [Mignacca, Locatelli, 2020], pour une usine de production à 1 milliard USD qui produirait des unités de 180 MW, il faudrait en vendre 4 pour un montant total de 1,5 milliard USD afin de se trouver en position bénéficiaire par rapport à l'investissement initial. Néanmoins, en l'absence d'une mise en production d'un modèle de SMR — intégrant la modularité et la production sérielle — il est pour le moment extrêmement difficile de se prononcer sur la rentabilité, ce qui se retrouve dans la littérature [Roulstone, Lloyd, Lyons, 2021]. Ce besoin d'une rentabilité minimale pose à l'évidence la question de la concurrence entre acteurs au niveau des SMR puisqu'en l'état actuel les nombreux projets identifiés au plan mondial — plus de 70 à des stades de maturité différents selon l'AIEA [AIEA, 2020] — ne pourront bien entendu pas atteindre le stade de la production. Une fois encore, le choix de la puissance installée de chaque unité est bien entendu très important dans ce calcul de rentabilité, le terme SMR

étant — comme mentionné plus haut — relativement vague quant à la puissance considérée (de 1 à 300 MW par unité). Cette approche renforce la nécessité de penser les SMR dans une vision de série standardisée, avec comme corollaire une stratégie fondée sur l'exportation pour toute une série d'applications déjà mentionnées.

Enfin, il importe de mentionner également un enjeu connexe aux SMR important par rapport aux réacteurs traditionnels, à savoir celui de la portabilité. Si les réacteurs déplaçables ne sont pas une nouveauté conceptuelle — l'URSS avait déjà exploré cette voie avec le projet Pampir-630D en Biélorussie; celui-ci, inauguré au moment de la catastrophe de Tchernobyl, n'a pas connu de véritable carrière opérationnelle, mais a validé le concept de centrale mobile, du moins en partie⁴ —, ils sont néanmoins une approche très novatrice. Depuis cette époque, la Russie a entrepris à nouveau de développer des systèmes mobiles, incarnés par la première « centrale flottante », l'Akademik Lomonossov. Lancé en 2010 et raccordé au réseau électrique en 2020, l'Akademik Lomonossov est une tête de classe — il emploie 2 réacteurs KLT40S dérivés du réacteur de propulsion KLT40 des brise-glaces nucléaires quand ses successeurs

embarquent 2 réacteurs RITM200 plus puissants — de centrale mobile à eau pressurisée. Toutefois, la question est posée de savoir si ces réacteurs peuvent être considérés comme des SMR, l'aspect modularité étant a priori absent de leur conception. Néanmoins, la validation du concept de réacteur transportable par l'Akademik Lomonossov — utilisé comme centrale d'appoint le long de la côte Arctique de la Russie pour le développement des infrastructures de la future route du Nord-Est — a permis à certains industriels ou acteurs étatiques (Rosatom, US DoD, CNNC, etc.) d'envisager des systèmes équivalents. Il est à noter que dans le domaine militaire, les États-Unis, face aux besoins prévisibles des opérations expéditionnaires des années futures, ont relancé des travaux importants sur les réacteurs transportables — conteneurisables — avec une coopération importante entre le Department of Energy et le Department of Defense [Vitali et al., 2018]. Plusieurs projets identifiés par l'AIEA prévoient ainsi des modèles transportables, enterrables — à partir du moment où ils seraient sur un autre paradigme technologique que l'eau pressurisée — voire considérés pour des applications liées à la mobilité, dans l'exploration spatiale à longue distance en particulier.

3. La compétition internationale se dessine

Eu égard à cet ensemble de possibilités et aux nouvelles applications déjà mentionnées, la compétition internationale s'organise dans ce domaine afin de profiter des opportunités ouvertes. Celles-ci pourraient d'ailleurs s'étendre dans les années à venir, en fonction du positionnement des grands acteurs financiers publics et privés, en particulier au niveau international. Si les grands fonds d'investissements en infrastructure commencent à envisager des investissements dans les SMR — alors même qu'ils se sont depuis longtemps désintéressés du nucléaire traditionnel —, les grands bailleurs multilatéraux sont pour le moment muets sur la question; tout juste la Banque asiatique d'investissement considère que le nucléaire peut être une partie de la solution de

l'équation climato-énergétique. Le positionnement de la Banque mondiale sur ce sujet qui est encore attendu, alors même que la Banque s'est toujours montrée hostile au nucléaire, pourrait être un révélateur d'un changement important de mentalité chez les acteurs du domaine.

En 2020, l'AIEA identifiait ainsi plus de 70 projets issus de 16 pays différents, parmi lesquels se retrouvent bien évidemment les grands acteurs historiques : Chine, États-Unis, France, Japon et Russie. Toutefois, tous ces acteurs, dans leur diversité, ne se positionnent pas au même niveau et la question de la définition très large du terme de SMR par l'AIEA pose problème s'agissant de l'établissement d'une typologie spécifique. L'aspect de la modularité n'est ainsi pas spécifiquement pris en compte, ce qui tend à élargir démesurément le catalogue des projets.

La Russie et la Chine présentent de ce point de vue une orientation relativement proche, avec parfois des coopérations plus ou moins ténues. Les deux pays adoptent une continuité de leur profil politico-industriel, avec une forte prédominance du capitalisme d'État — en particulier en Russie — où les maîtres d'œuvre sont les grands acteurs historiques. Se retrouvent ainsi les différentes filiales de Rosatom — en compétition entre elles — pour la Russie, à commencer par le bureau Afrikantov, ainsi que les trois grandes entreprises chinoises : CNNC, CGN et SPIC. Ici, c'est avant tout la prise en compte de l'intérêt spécifique des petites unités pour le marché export qui est ciblée, avec certes des besoins nationaux, mais qui viennent en complément des centrales traditionnelles, pour des applications particulières. Comme mentionné, le caractère modulable d'un certain nombre de solutions russes et chinoises demeure à démontrer. Néanmoins, il est important de considérer l'avantage technologique dont bénéficient à ce stade ces deux pays, en particulier la Russie.

L'Akademik Lomonossov est représentatif dans ce domaine de la culture d'innovation russe dans le nucléaire, avec des évolutions

Les petits réacteurs modulaires, une nouvelle ère nucléaire ?

Approche géopolitique et stratégique

incrémentales plutôt que des ruptures nettes. Si la tête de classe emploie des réacteurs dérivés de ceux des brise-glaces, dont le RITM-200 qui alimente les brise-glaces du projet 22220 et est entré en service en 2020, les modèles suivants utiliseront des designs spécifiques (projet 23000E). L'évolution de ces réacteurs permet également d'envisager des modèles de très faible puissance (MMR) : le réacteur ABV-6E de 6 MW est dans cette perspective idéal pour certaines applications mobiles. On observera enfin que Rosatom a annoncé en novembre 2020 son intention d'installer un SMR terrestre RITM-200 en Yakoutie, dans la ville d'Ust-Kuyga, afin de se substituer à la production actuelle d'électricité et de chaleur à base de charbon et de pétrole.

La Chine, à la suite de la Russie, envisage le même type de solutions, avec des réacteurs embarqués sur des plateformes navales (ACP-100/ACPR-50S). En outre, ces deux pays bénéficient également d'une certaine avance sur les technologies de Génération IV et pourraient proposer dans les années à venir des réacteurs enterrables, à cycle fermé ou utilisant d'autres combustibles (thorium) de la taille d'un SMR. La Russie qui dispose d'ores et déjà de réacteurs au sodium (BN-600, BN-800) et la Chine qui a raccordé au réseau fin 2019 un réacteur à très haute température (le HTR-PM) idéal pour la production d'hydrogène, pourraient ainsi être les premiers pays à effectuer le double bond SMR/Génération IV, ouvrant par là une ère totalement nouvelle pour l'industrie nucléaire.

Aux États-Unis, après l'échec de la Génération III+ des réacteurs de Toshiba-Westinghouse (AP1000) et GE-Hitachi (ABWR), un foisonnement de projets naît depuis quelques années, porté par la nécessité pour le pays d'envisager une véritable transition énergétique, alors même que le mix électrique national demeure extrêmement carboné. Aux côtés des acteurs traditionnels, de nombreux acteurs du domaine de l'énergie et au-delà proposent des projets ou des visions de SMR, le plus souvent à eau pressurisée, mais pour certains avec des approches bien plus ambitieuses (sels fondus, neutrons rapides, etc.). Par ailleurs, la

stratégie américaine de l'énergie définie par l'administration Biden semble faire une place importante au nucléaire — et aux SMR en particulier — pour un certain nombre d'applications, à commencer par l'hydrogène [US Department of Energy, 2020]. Il est également intéressant de noter, aux États-Unis comme en Europe, une modification profonde du paysage industriel du nucléaire à l'aune de cette nouvelle ère des SMR. Loin de ne se concentrer que sur les acteurs historiques du secteur, les développements se rencontrent ainsi beaucoup au niveau soit d'acteurs-tiers qui investissent le segment des centrales, soit de *start-ups* créées pour l'occasion, avec des modèles économiques le plus souvent à l'opposé des acteurs historiques. Ainsi, aux côtés des acteurs comme Westinghouse (réacteur au stade du concept) ou General Electric (réacteur BWRX-300), d'autres entreprises sont lancées dans la compétition, notamment avec des demandes de qualification des réacteurs auprès de la Nuclear Regulatory Commission (NuScale, Holtec International, etc.), signe de l'avancement de certains projets. Le plus souvent d'ailleurs, les différentes entités fédérales intéressées par le concept même de SMR tendent à instaurer des coopérations interministérielles, comme c'est le cas en particulier entre le Department of Defense, le Department of Energy — au travers en particulier de ses National Laboratories — et la NASA [Mazzucchi, 2020]. Les États-Unis emploient ici un modèle éprouvé de coopération public-privé, avec un soutien public fort — y compris économique — permettant de répondre partiellement — dans le cas de technologies considérées comme essentielles au niveau fédéral — à la complexité d'un marché de l'énergie très libéralisé, où intervient une multiplicité d'acteurs.

Ce paysage concurrentiel n'est pas sans rappeler celui qui s'est dessiné dans le spatial à l'orée des années 2000 et qui a reçu depuis le nom de New Space, avec Space X comme porte-étendard. Sommes-nous à l'aube de l'apparition d'un New Nuke? Il est bien entendu trop tôt pour le dire, eu égard au foisonnement actuel des projets de SMR. Toutefois, il impose de noter le dynamisme très important

de certaines de ces nouvelles entreprises, y compris avec des sponsors prestigieux comme Bill Gates pour TerraPower. Aux États-Unis, des acteurs comme NuScale ou XEnergy sont révélateurs de cette nouvelle vague du nucléaire, avec plusieurs designs de réacteurs actuellement testés par le Department of Energy sur le site de l'Idaho National Laboratory en application de l'initiative Carbon Free Power Project lancée en 2015. Les changements de modèle opérés résultent de la conjonction d'un ensemble de facteurs : un consortium régional de compagnies électriques clientes (Utah Associated Municipal Powers Systems), une aide substantielle du Department of Energy et la mobilisation d'acteurs privés majeurs (le leader de la construction aux États-Unis, Fluor, pour NuScale). Il importe également d'ajouter d'autres acteurs à ce panorama, dont la probabilité de passage de leurs projets à l'état de production est difficile à évaluer, parmi lesquels on peut en particulier distinguer Rolls-Royce, dont le SMR pourrait avoir une finalité spatiale étant donné les accords signés en 2021 entre l'entreprise et l'agence spatiale britannique dans le nucléaire⁵.

En tout cas, même si leur succès ne devait être que mineur, ces nouveaux modèles bouleversent le paysage entrepreneurial en obligeant les compagnies d'électricité — aux États-Unis comme en Europe — exposées aux aléas des prix de marché à se positionner sur les SMR. L'évolution du positionnement d'EDF est ainsi révélatrice de la manière dont ces nouvelles entreprises tendent à bousculer ce qui était jusqu'à présent un oligopole marqué par l'importance du public et du parapublic. Le Japon connaît une situation quelque peu analogue à celle de la France, à laquelle il faut rajouter le traumatisme de Fukushima. Si la plupart des réacteurs arrêtés suite à cette catastrophe n'ont pas été redémarrés, les dirigeants du pays ont toutefois pris conscience — en particulier le gouvernement Suga — de la nécessité de relancer un secteur électronucléaire complètement à l'arrêt. Si la crainte du nucléaire demeure forte dans l'archipel, les grands acteurs nationaux (Mitsubishi Heavy Industries, Toshiba, etc.) n'hésitent plus à proposer des

projets de SMR, en cherchant souvent des coopérations internationales, en particulier face à une concurrence qui apparaît très — voire trop — féroce pour ces entreprises. Le Japon est ainsi en recherche de partenariats dans le domaine, avec les États-Unis bien sûr, mais aussi avec l'Europe, au travers notamment des instances UE-Japon sur le dialogue énergétique, signe de la possible recomposition d'un paysage concurrentiel historiquement dominé par les pays du Nord.

4. La France et l'Europe face au futur du nucléaire

Dans ce contexte global de compétition en cours de démarrage, la France et l'Europe apparaissent pour le moment distancées, à la fois sur les SMR en tant que tels, mais également en ce qui concerne l'ensemble de la filière électronucléaire de manière plus générale. Au niveau européen, la situation est d'autant plus paradoxale que l'Europe de l'énergie — si tant est que ce concept puisse avoir un sens en regard des multiples tensions qu'il provoque au sein des États membres comme à Bruxelles — est née de la coopération nucléaire [Livet, 2020].

Le Traité Euratom de 1957, signé concomitamment au Traité de Rome, formalisait ainsi une coopération interétatique dans l'énergie qui était alors porteuse des espoirs d'un continent pauvre en pétrole. Plus de soixante ans plus tard, la situation a radicalement changé dans une Union européenne qui peine à considérer le nucléaire comme une solution potentielle aux multiples évolutions énergétiques du continent. Le récent débat sur la taxonomie de l'énergie est à ce titre éclairant tant il a contribué à montrer à la fois les fractures au sein des instances communautaires, mais également en faisant apparaître au grand jour la polarisation des États membres sur le sujet. Dans sa première itération, suite au rapport technique de 2020 commandité par la Commission en préparation de la liste des énergies vertes, le nucléaire se retrouve exclu de ladite taxonomie, limitant *de facto* l'attractivité économique de celui-ci pour les futurs bailleurs de fonds de la

Les petits réacteurs modulaires, une nouvelle ère nucléaire ? Approche géopolitique et stratégique

transition énergétique sur le territoire de l'UE. Toutefois, lors de la transmission de l'acte délégué sur la taxonomie de la Commission vers le Parlement pour son adoption, les débats rejallèrent sur l'exclusion du nucléaire, portés par les députés des pays d'Europe orientale, soutenus par les dirigeants de 7 pays (France, Hongrie, Pologne, République tchèque, Roumanie, Slovaquie et Slovénie) qui publièrent une lettre ouverte à la Commission en mars 2021. En juillet 2021, un groupe de 5 pays antinucléaires (Allemagne, Autriche, Danemark, Espagne et Luxembourg) publia à son tour une lettre ouverte à la Commission visant à empêcher l'inclusion du nucléaire dans la taxonomie.

À ce jour, la situation n'est toujours pas résolue. Toutefois, étant donné l'opposition forte de la coalition emmenée par l'Allemagne, il importe de se demander si l'Union européenne, peu connue pour son appétence du clivage, ne risque pas de sacrifier le nucléaire sur l'autel de la concorde, l'important étant selon elle de fournir des instruments pour l'accélération du déploiement des énergies renouvelables, les seules considérées comme « vertes »⁶.

Le clivage apparaît également au plan géographique avec une opposition entre des pays d'Europe centrale et orientale, aux mix énergétiques le plus souvent très carbonés, avec des économies en croissance, qui désirent accéder à ou relancer des programmes électronucléaires pour soutenir leurs trajectoires environnementales et les pays d'Europe occidentale, à l'exception de la France. En reprenant la liste des signataires de la lettre « antinucléaire » de juillet 2021, il est aisé de se rendre compte que celle-ci comporte des pays qui sont soit opposés au nucléaire sur des fondements idéologiques anciens, le plus souvent liés à une association d'idées entre nucléaire militaire et nucléaire civil (Autriche, Allemagne, Luxembourg), soit des pays qui cherchent à éliminer une concurrence potentielle du nucléaire face aux solutions renouvelables construites par leurs entreprises nationales (Allemagne, Danemark, Espagne).

Dans cette dialectique, la France a un positionnement ambivalent. En effet, malgré son

soutien affiché au nucléaire, le pays est profondément entré suite à la loi de transition énergétique de 2015 dans une phase de réduction nette de la part de l'électronucléaire dans le mix électrique. La volonté — transcrite dans les différentes itérations de la Programmation pluriannuelle de l'énergie depuis 2016 — d'accélérer le déploiement des énergies renouvelables et des solutions de stockage s'est jusqu'ici faite dans une opposition frontale au nucléaire, les différents ministres en charge de l'Énergie n'ayant le plus souvent pas caché leur opposition à cette énergie.

Il en a résulté à la fois des baisses spectaculaires de financement, avec des effets délétères sur l'avenir technologique — comme en témoigne l'enterrement du projet Astrid entre 2018 et 2020 — mais aussi une réorientation de la recherche et du développement. En outre, les difficultés rencontrées dans le cadre du développement de l'EPR ont également retardé l'entrée de l'électricien national dans les projets de développement de SMR, le réacteur NuWard initialement porté par Naval Group concentrant les espoirs de l'entreprise vers des unités de 170 MW, installées par paires. Le consortium NuWard dévoilé en 2019 porte ce projet d'un réacteur à eau pressurisée qui pourrait permettre à EDF de s'engager dans cette voie.

Outre ce projet, il appartient également de mentionner l'initiative française Naarea qui, plus ambitieuse que NuWard, propose un double saut technologique : à la fois SMR et Génération IV avec un réacteur à sels fondus. Les avantages multiples de ce projet — sans besoin d'un accès à l'eau comme pour les réacteurs à eau pressurisée — permettent d'envisager des usages multiples et des déploiements dans des territoires plus variés, d'autant plus que les réacteurs sont envisagés dans des puissances limitées (1 à 40 MW par unité). En outre, un modèle à sels fondus permet également d'envisager des combustibles différents (thorium), modifiant d'autant la géopolitique des ressources et les liens de dépendance vis-à-vis des fournisseurs d'uranium et de combustible.

Conclusion

Le secteur de l'électronucléaire est aujourd'hui face à un tournant majeur. Alors que le modèle techno-économique traditionnel s'essouffle, en particulier en Occident, les nécessités de la lutte contre les changements climatiques semblent quant à elles pouvoir redonner au nucléaire une nouvelle impulsion. Cette situation paradoxale se double également de nouvelles applications pour l'électronucléaire au-delà de la seule production électrique. Avec des possibilités nouvelles comme la production d'hydrogène et d'autres déjà bien connues comme le dessalement d'eau de mer et la cogénération, le nucléaire est face à un foisonnement d'opportunités, sur des territoires littoraux, urbains, continentaux, etc.

Dans ce contexte — avec en outre une croissance forte de la consommation électrique globale —, la possibilité de construire des réacteurs nucléaires suivant une logique différente de la « cathédrale » pratiquée historiquement offre des opportunités. Des unités de plus faible puissance, construites en série industrielle, installées de manière groupée ou isolée et bénéficiant d'une modularité pour leur évolution et leur remplacement, apparaissent comme des solutions particulièrement pertinentes. De nombreux acteurs, notamment en Europe, aux États-Unis, en Chine et en Russie, ont pris la mesure de cette évolution majeure du secteur, avec un foisonnement de nouveaux projets, différant par la taille, le paradigme de production ou les applications visées.

La France est face à un tournant. Tout d'abord face à une transition énergétique nationale et communautaire, dans laquelle la place du nucléaire est, ici et là, contestée. Or, le consensus des grandes institutions comme le GIEC ou l'Agence Internationale de l'Énergie sur la nécessité de doubler la part de l'électronucléaire dans le mix énergétique mondial (jusqu'à 12 %) pour atteindre les objectifs de l'Accord de Paris doit au contraire inciter les autorités politiques à se projeter vers cette solution, en complément d'autres. D'autre part, il existe également une incertitude industrielle

et technologique. Là où les acteurs français avaient fait le pari du maintien du modèle traditionnel de centrale à eau pressurisée — avec l'abandon progressif des financements vers d'autres modèles, comme en témoigne le réacteur Astrid de Génération IV — celui-ci se révèle finalement profondément remis en cause. Il apparaît donc nécessaire, pour l'ensemble du secteur ainsi que pour les acteurs politiques de l'énergie, d'opérer un virage net vers les SMR ainsi que vers les technologies de la Génération IV, à la fois pour la transition énergétique, mais aussi dans une optique de compétitivité industrielle, à la fois dans l'énergie, mais également pour d'autres secteurs comme le spatial ou la défense.

À l'heure où le Green Deal est la ligne de force énergétique de l'Europe, et comme la Chine et les États-Unis le font déjà, l'Union européenne se devrait de soutenir plus ardemment tous les opérateurs, centres de recherche et *start-ups* des 27 qui souhaitent penser et mettre au point ces réacteurs nucléaires du futur, qu'ils soient à sels fondus, à neutrons rapides ou plus classiquement à eau pressurisée comme NuWard. Ces nouvelles technologies, complémentaires plus qu'adversaires, changent en effet, en profondeur, la donne : en termes de production (standardisation et industrialisation), de taille (décentralisée vs centralisée) et de sécurité. Un grand programme industriel européen pourrait ainsi émerger ces prochains mois. Il permettrait d'accompagner le basculement vers plus d'énergies renouvelables, et de participer à l'autonomie stratégique de notre continent, qui risque à défaut de dépendre demain de technologies SMR extraeuropéennes. Pour cela, il faudrait juste, d'abord, que les différents modèles électriques européens cessent de s'opposer de manière stérile, alors que la demande électrique croissante supposera de penser « et » plutôt que « ou » si l'on veut atteindre la neutralité carbone en 2050!

Il importera également de ne pas fermer la porte à des coopérations internationales sur ces réacteurs ou leur technologie, au moment où de nombreuses synergies apparaissent dans

Les petits réacteurs modulaires, une nouvelle ère nucléaire ? Approche géopolitique et stratégique

le secteur de l'énergie, à l'image de celle entre l'Europe et le Japon dans l'hydrogène.

RÉFÉRENCES

- AIEA, 2020 (septembre). *Advances in Small Modular Reactors Technology Development*, Vienne.
- Beltran A., Roques F., Derdevet M., 2017. *Énergie : pour des réseaux électriques solidaires*.
- Derdevet M., 2020 (mai). Rapport Synopia, «Les réseaux d'électricité, vecteurs du nouveau modèle européen décarboné».
- Expert Finance Working Group, 2018. *Market Framework for Financing Small Nuclear*, Londres, UK Government.
- GIEC, 2021. *Climate Change 2021: the Physical Science Basis*, Bonn, WG1 Contribution to the 6th IPCC Assessment Report.
- IFRI, 2019 (mai). *Les petits réacteurs modulaires dans le monde*, IFRI Centre Énergie.
- IRENA, 2021. *Renewable Power Generation Costs in 2020*, Abu Dhabi.
- Livet, A., 2020. *Transition énergétique : quel rôle pour le nucléaire?*, Paris, FRF.
- Mazzucchi N., 2019 (février). «Nucléaire civil, un enjeu stratégique pour la Russie», in Anne de Tinguy (dir.), *Regards sur l'Eurasie. L'année politique 2018*, CERI/SciencesPo.
- Mazzucchi N., 2020. *Le Department of Defense, acteur central du développement énergétique aux États-Unis*, Paris, FRF.
- Mignacca, B., Locatelli, G., 2020. "Economics and finance of Small Modular Reactors: A systematic review and research agenda", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 118.
- OCDE, 2021. "Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities", Nuclear Energy Agency, n° 7560.
- Roulstone, T., Lloyd, C., Lyons, R., 2021 (janvier). "Small can be beautiful in nuclear", Présentation à l'Université de Cambridge, disponible à l'adresse : https://www.eprg.group.cam.ac.uk/wp-content/uploads/2021/03/T.-Roulstone_26Jan21.pdf.
- US Department of Energy, 2020 (novembre). *Department of Energy Hydrogen Program Plan*.
- Vitali, J., et al., 2018. *Study on the Use of Mobile Nuclear Power Plants for Ground Operations*, Washington, Vice-chef d'État-major de l'US Army G-4.

NOTES

1. Contre 11 % de l'électricité consommée à l'heure actuelle (AIE).
2. Le premier raccordement d'une centrale nucléaire au réseau électrique date de 1954; et depuis, la capacité nucléaire mondiale n'a quasiment pas cessé d'augmenter. Cette croissance fut significative entre 1970 et 1990, et la construction de réacteurs nucléaires connut son apogée dans les années 1980.
3. L'«European Pressurized Water Reactor» (EPR) se fonde sur la technologie des réacteurs à eau sous pression, la plus utilisée dans le monde. Il offre une puissance plus élevée (1 650 mégawatts) que les centrales actuellement en service en France.
4. Le système séparé en 5 modules montés sur camion dispose d'une puissance électrique de 630 kW, d'un système de modération de la réaction à hydrure de zirconium avec un refroidissement fourni par du tétraoxyde d'azote. Il s'agit ainsi d'un modèle spécifique, bien loin des adaptations miniaturisées des REP imaginées au même moment aux États-Unis. De fait, le combustible utilisé était de type HEU avec un UO₂ enrichi à 45 %.
5. Communiqué de presse disponible à l'adresse : <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2021/12-01-2021-rr-uk-space-agency-launches-first-study-into-nuclear-power.aspx>.
6. Il est dans ce contexte intéressant de relire le document de stratégie hydrogène de la Commission publié en juillet 2020 qui, dès son préambule, considère qu'un hydrogène décarboné (et donc «vert») est nécessairement produit par électrolyse de l'eau à partir d'une électricité provenant de sources renouvelables. *De facto*, cette stratégie enterre *ex abrupto* le couple nucléaire-hydrogène, au contraire de ce que les États-Unis promeuvent un an plus tard.