

Le modèle du *New Space* est-il l'avenir des petits réacteurs modulaires ?

Par Antoine CHESNE

Ingénieur et économiste

L'industrie nucléaire connaît aujourd'hui une période de forte émulation, marquée notamment par les promesses des petits réacteurs modulaires et l'émergence de *start-up* innovantes. Il est aussi notable que le nucléaire partage avec le spatial des origines communes, puis un développement parallèle, avec un essor rapide dans les années 1960 et 1970, suivi d'une période de relative stabilité des années 1980 aux années 2000. Depuis une dizaine d'années, l'industrie spatiale est néanmoins bouleversée par la révolution du *New Space*, redynamisant la filière. Cette transformation inspire aujourd'hui l'essor des SMR portés par le *New Nuclear*, dont l'inspiration technique, économique et politique est directement issue du *New Space*. En adoptant ses codes : miniaturisation, répliquabilité, réutilisabilité, en attirant ses entrepreneurs, et en menant des politiques publiques semblables, le nouveau nucléaire cherche à répliquer la réussite du spatial et à trouver la voie qui lui permettra de jouer un premier rôle dans la transition énergétique.

Parmi les opportunités qu'offre la relance de l'industrie nucléaire, le développement des petits réacteurs modulaires (en anglais SMR "Smart Modular Reactors"), qu'ils soient mini-, micro-, voire nano-, est appelé à jouer un rôle majeur dans le renouveau de la filière et l'arrivée de la quatrième génération. Futurs composants essentiels de l'essor du Nouveau Nucléaire, les SMR promettent de révolutionner les codes traditionnels de la filière nucléaire en adoptant des solutions empruntées à de nombreux autres secteurs technologiques. Pour le nucléaire, l'enjeu est de s'ouvrir à des méthodes et des applications issues de secteurs jusqu'alors très éloignés de celui-ci, pour se décupler et prendre enfin une vraie place dans la transition énergétique. À ce titre, l'Atome devra savoir apprendre d'autres filières, et prendre pour modèle celles qui ont su se transformer et réussir leur mutation. En particulier, l'industrie spatiale apparaît aujourd'hui comme un exemple à suivre : la révolution du *New Space* a chamboulé l'écosystème traditionnel pour multiplier les possibilités d'accès et d'utilisation de l'Espace. Né aux États-Unis, le phénomène *New Space* influence désormais outre-Atlantique les codes du *New Nuclear* américain, les passerelles entre les deux mondes étant nombreuses. L'objet de cet article est d'analyser les facteurs de succès du *New Space* et ses liens avec le nouveau nucléaire, et d'en tirer des leçons pour encourager l'essor des SMR de ce côté de l'Atlantique.

Si l'on retrouve dans la littérature ou dans les médias des références occasionnelles au *New Space* pour le nucléaire, rares sont les auteurs à avoir jusqu'alors véritablement caractérisé la relation entre les deux univers. On citera notamment les articles de Crombrughe

(2022)¹, Scherer (2022)², ou Rauch (2023)³. Si évoquer Espace et Nucléaire ouvre le sujet de la propulsion nucléaire spatiale, nous nous concentrerons ici sur l'inspiration du spatial pour les SMR terrestres.

Deux filières aux origines communes et aux histoires parallèles

Le premier lien à faire entre Espace et Nucléaire est historique. Ces filières partagent en effet une histoire commune : initiées par des percées dans le domaine de la physique, elles connurent tout d'abord des applications militaires du fait de la Seconde Guerre mondiale, qui accéléra leur passage de la théorie à la pratique. Les années 1950 virent un tournant avec l'ébauche d'applications civiles et pacifiques, tant pour l'accès à l'Espace que pour l'utilisation de l'Atome. Aux yeux du grand public, énergie nucléaire et conquête de l'Espace incarnaient alors la promesse du progrès, tout en étant aussi pour les États un symbole de prestige et d'influence. Dans les deux filières, les décennies 1960 et 1970 furent celles des grands programmes nationaux : programme Apollo américain pour l'Espace, plan Messmer français dans le nucléaire, chacun coûtant durant une décennie plusieurs pourcents de la dépense publique chaque année. Pierre Messmer n'hésitait

¹ CROMBRUGGHE (DE) G. (2022), "Is the nuclear industry on the verge of its NewSpace moment?", LinkedIn.

² SCHERER K. (2022), "What nuclear energy can learn from space technology advancement", Maddynews.

³ RAUCH J. (2023), "Nuclear energy looks to SpaceX, Tesla, and Apple for inspiration", *Australian Financial Review*.

alors pas à comparer son programme nucléaire au programme Apollo, qui partageait les mêmes facteurs de succès : une volonté politique forte et constante, un investissement massif et une organisation industrielle hors-pair⁴.

Le dynamisme des industries spatiales et nucléaires atteignit néanmoins ses limites, et dès les années 1980, les deux filières connurent une sorte de plateau technologique, du moins en Occident. Les raisons furent multiples : ralentissement économique, augmentation du coût des crédits, rigueur budgétaire, mais aussi inertie industrielle et absence de nouvelle innovation de rupture. Ce ralentissement, qui toucha la filière nucléaire encore jusqu'à récemment, fut perceptible dans le spatial jusque dans les années 2000 ; l'aboutissement de l'assemblage de la Station spatiale internationale et l'échec du programme Constellation fit prendre conscience des impasses organisationnelles et financières du secteur. C'est à partir de cette période qu'apparaît un début de renouveau du spatial, avec l'émergence de nouveaux acteurs privés conjointement à un changement des politiques publiques, apportant de nouvelles méthodes qui allaient donner un nouveau souffle à la filière. Le *New Space* était né.

Comment caractériser le *New Space* ?

Le phénomène du *New Space* peut être défini comme la convergence de trois facteurs contribuant à son succès : une nouvelle approche technologique, un cadre politique spécifique, et une ambition économique.

En matière industrielle, le *New Space* partit du constat que l'accès à l'espace était limité par la complexité et la spécialisation des systèmes utilisés. L'approche du *New Space* a consisté en une simplification, une standardisation, et, autant que possible, la réutilisation des plateformes, satellites ou lanceurs, pour disposer de moyens plus nombreux et moins chers. En bénéficiant des progrès de la simulation numérique et de la miniaturisation des équipements, le *New Space* a pu rendre les technologies spatiales plus industrialisables et ainsi passer à grande échelle.

Pour ce qui est du cadre politique, l'approche couramment retenue aujourd'hui est la délégation aux entreprises par les agences spatiales non plus seulement de la fabrication des systèmes, mais aussi de la définition de la solution et sa conception dans le cadre de contrats commerciaux de service. En ne développant pas par elle-même de remplaçant à la navette spatiale, mais en confiant au privé, SpaceX, Orbital ATK (acquis par Northrop Grumman) et Boeing la desserte de l'ISS, la NASA a défini un nouveau schéma, rapidement adopté des deux côtés de l'Atlantique pour des missions civiles et militaires de surveillance satellitaire (Copernicus...) ou de télécommunications.

Enfin, le *New Space* est également caractérisé par une nouvelle donne économique. Les *start-up* spatiales

bénéficient, comme dans d'autres secteurs de la tech, du soutien des fonds de capital-risque (venture capital) qui assurent l'essentiel des coûts de développement. Les financements publics demeurent le socle des industries spatiales nationales, mais sont désormais fléchés dans des contrats commerciaux, sécurisant les investisseurs sur le long terme tout en contraignant les entreprises à passer des étapes clés de mise en service pour en bénéficier. Cette dialectique entre stratégies institutionnelles et structures privées plus légères et plus agiles sont les clés du succès de la révolution *New Space*.

Aux États-Unis, l'émergence d'un *New Nuclear* calqué sur le *New Space*

Le début du renouveau nucléaire américain a été amorcé vers la fin des années 2000 avec la création des premières *start-up* du secteur, TerraPower (2006), NuScale (2007) ou encore X-Energy (2009). À cette époque, le nucléaire ne figurait pas encore en tête de liste parmi les priorités du Department of Energy (DoE), l'Amérique connaissant la révolution des gaz de schistes et avec elle l'abondance et l'autonomie énergétique. C'est davantage au milieu des années 2010 que les Américains réalisèrent l'importance de relancer leur filière nucléaire par la conjonction de trois facteurs : les échecs du nucléaire traditionnel, symbolisés par la faille de Westinghouse et les dépassements budgétaires de son AP1000 ; la prise de conscience de l'enjeu écologique ; et, peut-être encore plus important aux yeux des Américains, le retard technologique accumulé face à la Chine et la Russie en matière de nucléaire civil dit de quatrième génération. Le réveil nucléaire américain fut spectaculaire, avec une augmentation de 50 % du budget du DoE envers le nucléaire entre 2016 et 2020⁵.

Plus intéressant encore, c'est la méthode du DoE qui rompt avec les pratiques habituelles de la filière nucléaire. Celui-ci alloue effectivement des crédits importants aux différents acteurs privés du nucléaire civil, mais selon des méthodes très similaires à celles... du *New Space* ! L'approche retenue consiste en effet à mettre en place des contrats de service, subventionnant indirectement, mais efficacement, le développement de petits réacteurs modulaires. Dans ce schéma, le public se constitue client du privé, en lui laissant une large marge de manœuvre quant aux propositions techniques et au *design*. Cette approche a été calquée, volontairement, sur le *New Space*. Comme la Nasa avec l'ISS, le DoE utilise ses laboratoires nationaux comme des bacs à sable pour les acteurs privés. C'est notamment le cas de l'Idaho National Lab, qui accueille le Molten Chloride Reactor Experiment (MCRE) de TerraPower et Core Power, et, jusqu'à son annulation en novembre 2023, du Carbon Free Power Project (CFPP) de NuScale, dont le client était une agence inter-locale de réseaux électriques municipaux.

⁴ BEZAT J.-M. (2023), Nucléaire : le « plan Messmer », un programme Apollo à la française, *Le Monde*.

⁵ MERLIN C. (2020), « Le renouveau du secteur nucléaire aux États-Unis. De Make America Great Again à l'Energy Dominance », Études de l'Ifri.

Inspiré par la nouvelle approche du DoE et aussi par ses expériences de contrats passés avec des acteurs du *New Space*, le Department of Defense (DoD) s'intéresse également au nouveau nucléaire pour ses propres besoins en électricité. En 2020, BWXT, X-Energy et Westinghouse ont reçu un contrat afin de développer un nano-réacteur de 1 à 5 MW, de moins de 40 tonnes et transportable pour ses opérations extérieures. De façon encore plus proche du nucléaire civil, en 2023 la *start-up* Oklo a été gratifié par l'US Air Force d'un contrat pour fournir de l'électricité à sa base aérienne d'Eielson, en Alaska. Tout comme pour ses lancements spatiaux, le DoD cherche à ne pas dépendre d'un seul fournisseur en matière de nucléaire et fait désormais jouer la concurrence.

Des passerelles entre les deux mondes

Le développement du *New Nuclear* suit les préceptes adoptés par l'industrie spatiale pour accélérer le temps de développement et ainsi diminuer les coûts. La *start-up* de fusion nucléaire Avalanche Energy définit par exemple une double approche dite *fast-to-test* et *test-fail-fix*, censée être plus efficiente en capital et permettant d'intégrer des innovations de rupture qui arriveraient au cours de son cycle de développement⁶. Cette méthode, dite approche itérative, est aussi pratiquée dans la fission par Kairos Power qui réalise à différentes échelles des maquettes fonctionnelles de son réacteur. En Europe, cette approche est également pratiquée par des *start-up* comme Newcleo, qui testera sa boucle au plomb sur une maquette non nucléaire en Italie, ou Naarea qui a annoncé en octobre 2023 avoir testé un prototype de boucle en carbure de silicium avec des sels non-radioactifs.

D'une certaine manière, le nucléaire est désormais considéré aux États-Unis comme un secteur de la tech comme les autres. Son premier cycle décennal de venture capital arrive d'ailleurs à son terme, conclu par des introductions en bourse *via* des SPAC, comme celle de NuScale en 2022 ou actuellement en cours pour X-Energy et Oklo, malgré un contexte financier morose. De Bill Gates (TerraPower, Commonwealth) à Sam Altman (Oklo), fondateur d'OpenAI (Chat GPT), nombreux sont aujourd'hui les entrepreneurs et financeurs du *New Nuclear* issus de la Silicon Valley, mais aussi, élément intéressant, du *New Space*. Parmi ceux-ci, on citera notamment les co-fondateurs d'Avalanche, le CEO Robin Langtry et le COO Brian Riodan, issus de Blue Origin, mais aussi l'ancien ingénieur de SpaceX Doug Bernauer, fondateur de Radiant Nuclear, ou encore l'homme d'affaires Kam Ghaffarian, co-fondateur d'Axiom et d'Intuitive Machines dans le spatial, mais aussi d'X-Energy.

On retrouve ces interconnexions chez les financeurs, notamment en capital-risque. Le fonds C5 Ventures, habitué aux *deals* spatiaux (Axiom...) a rejoint le tour de table d'X-Energy. L'inverse est aussi possible,

puisque le fonds Breakthrough Energy Ventures mené par Bill Gates, ordinairement dédié aux *cleantechs*, a investi chez le fabricant de fusées 100 % réutilisables Stoke Space. Les Européens ne sont pas non plus en reste : en France, le gestionnaire d'actifs Audacia, fondé par Charles Beigbender, vient de créer un fonds dédié au nouveau nucléaire, Isospin Exergon, après en avoir établi un précédent, Geodesic Expansion, pour le spatial. Autre fonds VC nucléaire en Europe, le belge Nuketech compte parmi ses fondateurs Guerric de Crombrugge, ancien directeur de ScanWorld et passé par l'ESA.

Quelles leçons tirer de la révolution du *New Space* pour le nucléaire ?

Si le *New Space* n'est déjà plus si nouveau, avec des acteurs désormais bien établis, le *New Nuclear*, lui, n'a pas encore atteint sa phase de pleine maturité aux États-Unis et encore bien moins en Europe. À ce titre, le retour d'expérience du *New Space* peut profiter au renouveau du nucléaire à plusieurs égards.

Parmi les points-clefs à retenir pour le nucléaire, on citera en premier lieu le « mode *start-up* », permettant d'aboutir à des innovations de rupture en avançant plus vite, avec moins d'argent, et en se libérant de l'inertie propre aux trop grandes organisations. Le recours aux capitaux privés pour financer en fonds propres le développement des *start-up* est indispensable, de la même manière que l'ensemble de la tech. Il faudra s'assurer de la disponibilité en France de ces ressources, allant de l'amorçage (*pre-seed*, *seed*) avec des incubateurs, jusqu'aux levées de fonds plus tardives (Séries B, C...), qui font encore souvent défaut dans le spatial français. En parallèle de l'apport d'argent privé, le rôle de l'État, dans le spatial comme le nucléaire, demeure indispensable. Celui-ci doit définir un cadre attractif pour les investisseurs, en apportant une vision et un cadre réglementaire de long terme, et faciliter l'installation de sites de tests et de prototypes. En matière d'utilisation d'argent public, l'exemple du spatial montre que les contrats d'achat de long terme d'acteurs institutionnels sont plus efficaces que les subventions directes au développement, car d'une part ils motivent les *start-up* à aboutir réellement à un résultat, et d'autre part ils créent un marché, indispensable pour attirer les financeurs. Le retour d'expérience de l'industrie spatiale démontre également qu'être performant à l'export est impossible sans un marché intérieur qui permet de faire ses preuves. La domination de SpaceX sur le marché des lancements mondiaux, y compris des satellites européens, a été possible parce que cette société a pu bénéficier d'un volume de commande conséquent de la Nasa, mais aussi, et surtout, du DoD ; ce qui fait d'ailleurs défaut à Arianespace en Europe. Enfin, autre enjeu institutionnel majeur, sans doute encore plus critique dans le nucléaire que dans le spatial, celui de la certification et de la sûreté. Le rôle de l'Agence de Sûreté Nucléaire est amené à considérablement évoluer dans les prochaines années, ne devant plus seulement contrôler les installations des opérateurs,

⁶ WESOFF E. (2023), "Avalanche raises \$40M to pursue vision of tiny nuclear fusion reactor", Canary Media.

mais désormais analyser et valider des *designs* de fabricants en série. L'ASN pourrait s'inspirer de l'organisation d'agences aéronautiques et spatiales comme l'EASA ou la FAA, qui émettent des certificats de types pour les aéronefs.

On peut aujourd'hui estimer à une petite dizaine d'années le décalage entre le *New Space* et le *New Nuclear*, qui est en 2023 dans une situation proche de celle de la filière spatiale au tournant des années 2010. Le renouveau du nucléaire doit désormais gagner en maturité. Ainsi, parmi les différences importantes qui demeurent entre les deux filières, l'aspect sécuritaire, ainsi que la compréhension et l'acceptation par le grand public demeurent plus complexes dans le cas du nucléaire. Aussi, il est intéressant de noter que le *New Space* s'est aujourd'hui étoffé, avec de nombreuses relations clients-fournisseurs à l'intérieur même de cet écosystème désormais industrialisé. À l'inverse, les *start-up* du *New Nuclear* travaillent encore trop en « silos », et celles-ci s'appuient encore pour l'essentiel sur la *supply chain* existante des industriels traditionnels. Toutefois, la mécanique est désormais enclenchée, avec les États-Unis en fers de lance, qui, forts de leur législation, de l'agilité de leur secteur public et de leurs financeurs issus de la tech, ont établi des codes du *New Nuclear* très fortement basés sur ceux du *New Space*.

Alors, qu'en retenir pour la France ? Qu'il faudra aller vite, selon le schéma tester-industrialiser-commercialiser, en bousculant les normes établies. Développement itératif et répliquabilité (fabrication en série, plateformes standardisées...) seront les clefs du nucléaire

de demain. Le secteur public, État, EDF, CEA, ASN, et même Armée, devront donner toutes les cartes en main aux acteurs privés pour qu'ils mettent en œuvre leurs solutions en maîtrisant leur risque financier ; tout en étant parcimonieux pour leurs propres dépenses en stimulant le recours au capital privé. Enfin, le nucléaire devra aussi savoir sortir de son isolement et de sa zone de confort, et savoir s'adapter aux besoins et aux méthodes de ses clients non-nucléaires. Tout comme l'industrie spatiale a su le faire, en adressant des services clefs-en-main d'observation de la Terre ou de connectivité à des clients non-spatiaux, le nucléaire devra aussi produire de l'hydrogène, décarboner de la chaleur, ou faire fonctionner des *data centers*. Tout comme le *New Space* a adopté un fonctionnement matriciel, les *start-up* du nouveau nucléaire devront aussi trouver leur voie et tisser des liens, entre développeurs technologiques, fabricants, équipementiers, porteurs de projet et exploitants. Tous ces éléments, ajoutés à la motivation des entrepreneurs et travailleurs du nucléaire, devraient ainsi permettre son essor et engendrer un vrai impact pour la transition énergétique et le climat.