

# Les réacteurs modulaires ne sont soutenus que par l'idéologie

## La fin du rêve énergétique d'Oppenheimer

Allison Macfarlane

Source : <https://iai.tv/articles/the-end-of-oppenheimers-energy-dream-auid-2549>, le 21 juillet 2023

Traduction et notes de bas de page :

Francis Leboutte, Liège-Décroissance ([liege.decroissance.be](http://liege.decroissance.be))

Le 8 août 2023 – Mis à jour le 15 août 2023

Allison Macfarlane est directrice de l'École des politiques publiques et des affaires mondiales de l'Université de la Colombie-Britannique et ancienne présidente de la Commission de réglementation nucléaire des États-Unis.

*L'énergie nucléaire est à la fois louée en tant qu'énergie de base renouvelable et décriée en tant que technologie risquée, coûteuse et dépassée. Les petits réacteurs modulaires<sup>1</sup> ont bénéficié de milliards de capital-risque et d'une attention médiatique sans précédent, mais cette fascination ne procède-t-elle pas d'un leurre plutôt que de la science ? La professeure Allison Macfarlane explore le piètre état actuel de la technologie, ses lacunes et la logique qui suscite l'intérêt pour cette technologie peu prometteuse.*

Depuis qu'Oppenheimer a commencé à exploiter la puissance de l'atome, d'abord comme arme de guerre, puis comme moyen de production d'énergie à des fins pacifiques, l'énergie nucléaire est à la fois porteuse de promesses et de périls. Alors que les grandes centrales nucléaires peinent à rivaliser avec les énergies renouvelables et le gaz naturel du point de vue de la rentabilité, les petits réacteurs modulaires (SMR) promettent de sauver la filière de l'énergie nucléaire. Ces dernières années, les investisseurs, les gouvernements nationaux et les médias ont accordé une grande attention aux petits réacteurs nucléaires modulaires, qu'ils considèrent comme la solution aux coûts et aux longs délais de construction des centrales nucléaires traditionnelles, ainsi qu'aux inconvénients esthétiques et d'emprise au sol des énergies renouvelables. En explorant les défis auxquels est confrontée la technologie des petits réacteurs modulaires, je démontrerai que cette résurgence de l'énergie nucléaire relève de l'imagination populaire, plutôt que de la concrétisation d'une véritable innovation technologique.

La semaine dernière, on a appris qu'Oklo, une entreprise qui a élaboré un projet de SMR, allait entrer en bourse par le biais d'une fusion avec *AltC Acquisition Corporation*. Sam Altman, cofondateur d'AltC Acquisition et président du conseil d'administration d'Oklo, espère lever 500 millions de dollars grâce à cette opération. La nouvelle d'Oklo est un exemple du déferlement d'excitation autour du potentiel des petits réacteurs modulaires (SMR) pour aider à atténuer le changement climatique.

Mais le peuvent-ils ?

L'histoire d'Oklo est intrigante, car sa demande de licence pour construire et exploiter son concept de réacteur *Aurora* a été purement et simplement rejetée par la *Nuclear Regulatory Commission des États-Unis* (NRC), l'organisme de réglementation de la sûreté

<sup>1</sup> Les petits réacteurs modulaires (SMR, *Small Modular Reactor*) sont des réacteurs nucléaires à fission dont la puissance est inférieure à 300 MWe (à mettre en regard des réacteurs conventionnels dont la puissance est de l'ordre de 1 GWe). Ils sont composés de modules fabriqués en usine pour être assemblés sur le site de production, ce qui est promotionné comme avantageux en termes de coût de production de l'électricité.

– MWe : mégawatt (million de watts) électrique.

– GWe : gigawatt (milliard de watts) électrique.

<sup>2</sup> Eau légère : eau ordinaire, par opposition à l'eau lourde (où les atomes d'hydrogène sont du deutérium). Les réacteurs à eau légère (ou réacteurs conventionnels) se divisent en réacteurs à eau pressurisée (REP) et réacteurs à eau bouillante (REB). Les réacteurs belges et français sont des REP.

nucléaire du pays (pour information : j'ai été présidente de la NRC de 2012 à 2014). Notez qu'un tel rejet relève de l'exploit : la NRC rejette rarement une demande de manière catégorique, préférant travailler avec les détenteurs de licences jusqu'à ce qu'elle obtienne les modifications requises ou que l'auteur du projet décide d'abandonner. Dans le cas présent, Oklo a refusé de combler les « lacunes en matière d'information » liées aux « systèmes et composants de sécurité ».

Il existe de nombreuses nouvelles entreprises spécialisées dans les SMR aux États-Unis, au Canada, au Royaume-Uni, dans l'UE, en Chine et ailleurs. Les conceptions sont très variées : il existe des versions plus petites des réacteurs à eau légère existants<sup>2</sup>, comme ceux en exploitation aux États-Unis, en France, au Japon et ailleurs. Il existe des modèles dits « avancés », tels que les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium<sup>3</sup> (comme ceux d'Oklo et Terrapower, la société de Bill Gate), les réacteurs à gaz à haute température et les réacteurs à sels fondus.

La plupart de ces projets ne sont que des projets. Très peu des SMR proposés ont fait l'objet d'une démonstration et aucun n'est disponible sur le marché, et encore moins autorisé par un organisme de réglementation nucléaire. En ingénierie, les nouvelles technologies passent de la phase de conception à la phase de démonstration (habituellement en petite échelle), puis à la phase de commercialisation (en vraie grandeur). Au cours de chaque phase, des modifications sont apportées à la conception sur la base du retour d'information concernant ce qui a fonctionné et ce qui n'a pas fonctionné.

Une entreprise américaine, NuScale, est le seul projet de SMR aux États-Unis à avoir reçu une « certification de conception » de la part de la NRC. NuScale a conclu un accord avec UAMPS, un consortium de compagnies d'électricité, pour construire les premiers réacteurs NuScale dans l'Idaho aux États-Unis. Mais NuScale ne construira pas le modèle déjà certifié dans l'Idaho ; l'entreprise a déposé une nouvelle demande auprès de la NRC pour construire un modèle de réacteur plus grand et vraisemblablement plus économique. Néanmoins, les estimations de coûts pour le réacteur sont passées de 55 USD/mégawatt électrique (MWe) en 2016 à 89 USD/MWe<sup>4</sup> en 2023, selon l'Institute for Energy Economics and Financial Analysis (Institut pour l'économie de l'énergie et l'analyse financière).

De nombreux types de SMR non à eau légère seront probablement encore plus coûteux, d'après des analyses récentes. Une étude récente du Massachusetts Institute of Technology suggère que le coût des SMR sera nettement plus élevé que celui des grands réacteurs à eau légère, en premier lieu pour les coûts « overnight » par MW (coût si le réacteur était construit du jour au lendemain) de même que pour les coûts d'exploitation et de maintenance.

L'expérience récente en matière de construction aux États-Unis et en Europe ne laisse pas présager un succès pour les nouvelles constructions de SMR. Les deux réacteurs EPR (evolutionary power reactor) de conception française ont largement dépassé le budget et le calendrier. L'EPR de Finlande devait initialement coûter 3 milliards d'euros et démarrer en 2009. Il a finalement commencé à produire de l'électricité en 2023, pour un coût de 11 milliards d'euros. La situation est similaire en France, où l'EPR de Flamanville devait entrer en service en 2012 pour un coût de 3,5 milliards d'euros. Au lieu de cela, il est toujours en construction et les coûts ont grimpé à 12,4 milliards d'euros<sup>5</sup>.

L'Europe est la règle et non l'exception. Le réacteur AP-1000 de Westinghouse (États-Unis), dont la conception robuste est dotée de dispositifs de sécurité passifs, a souffert des mêmes difficultés. Les deux unités en construction en Caroline du Sud ont été abandonnées

<sup>3</sup> Des surgénérateurs similaires dans leur principe à Superphénix en France, un réacteur commandé en 1976, mis en service en 1984, arrêté en 1998 et toujours en cours de démantèlement. Superphénix a produit moins de 10 % de l'électricité qu'il aurait dû produire, pendant la période où il a été en service.

<sup>4</sup> USD/MWe : dollar étasunien par mégawatt (million de watts) électrique. 89 USD/MWe, un tarif qui ne sera certainement pas tenu et est presque le double du solaire et de l'éolien disponible aujourd'hui.

<sup>5</sup> Selon un rapport émis en 2020 par la Cour des comptes, la mise en service de l'EPR de Flamanville devrait coûter 19,1 milliards d'euros. Depuis 2020, d'autres défauts sont apparus...

en 2017, après un investissement de 9 milliards de dollars. Les deux unités AP-1000 en Géorgie devaient démarrer en 2016/2017 pour un prix de 14 milliards de dollars. L'une des unités a démarré en avril 2023, la seconde devrait démarrer en 2023. Le coût total s'élève désormais à plus de 30 milliards de dollars.

Les concepteurs de SMR font appel à la construction en usine pour éviter certains des écueils de la construction de grands réacteurs (d'où le terme « modulaire » dans SMR). Mais l'AP-1000 devrait constituer une mise en garde : il s'agit également d'une conception modulaire et une usine de Lake Charles, en Louisiane, n'a pas réussi, pendant des années, à produire des modules correctement soudés et a été confrontée à des problèmes de main-d'œuvre. La centrale nucléaire de Géorgie a dû construire sa propre installation de soudage de modules pour ressouder les modules qui arrivaient, ce qui a entraîné des dépassements de coûts et des retards.

L'une des raisons pour lesquelles les SMR coûteront plus cher est liée au coût du combustible. La plupart des SMR non à eau légère nécessitent du combustible de type HALEU<sup>6</sup>, c'est-à-dire du combustible enrichi en isotope 235 entre 10 et 19,99 %, juste en dessous du niveau de ce que l'on appelle l'« uranium hautement enrichi », qui convient pour les bombes nucléaires. À l'heure actuelle, aucune entreprise d'enrichissement en dehors de la Russie n'est en mesure de produire du combustible HALEU, d'où le problème de l'œuf et de la poule : une entreprise d'enrichissement souhaite obtenir l'assurance des vendeurs de réacteurs pour investir dans le développement de la production de combustible HALEU. Mais comme les SMR à l'échelle commerciale ne seront probablement pas construits avant des décennies et pour autant qu'ils soient viables, il y a un risque à le faire. L'utilisation du combustible HALEU entraînera également des exigences accrues en matière de sécurité et de garanties, ce qui augmentera encore le coût des SMR.

Le combustible HALEU est nécessaire pour compenser la taille réduite du cœur des SMR, car elle entraîne une augmentation des fuites de neutrons – et les neutrons sont les initiateurs des réactions de fission qui libèrent de la chaleur finalement convertie en électricité. Les réacteurs de plus petite taille peuvent également produire un volume de déchets proportionnellement plus important que les grands réacteurs à eau légère existants. En fait, une analyse récente de l'Académie nationale des sciences des États-Unis a noté que les réacteurs avancés ne résolvent pas le problème des déchets nucléaires et peuvent même l'exacerber. Certains types de SMR produiront beaucoup plus de déchets de haute activité en volume que les réacteurs à eau légère actuels tandis que d'autres types de SMR produiront des déchets qui nécessiteront un traitement chimique avant d'être éliminés. Les problèmes de ce genre sont relativement peu examinés et viendront alourdir le prix final des SMR.

Compte tenu de tous ces inconvénients et retards potentiels, pourquoi investir dans une entreprise de construction de SMR ? J'ai posé la question à Ray Rothrock, un investisseur en capital-risque, lors d'une réunion d'un comité de l'Académie nationale d'ingénierie qui étudiait le potentiel de ces nouveaux réacteurs (et dont j'étais membre). Si ces réacteurs ne sont pas commercialisés avant une décennie ou plus, comment les investisseurs peuvent-ils gagner de l'argent ? Sa réponse : « avant même de vendre [de l'électricité], ils entrent en bourse et c'est ainsi que les premiers investisseurs gagnent de l'argent... cela correspond au modèle – l'entreprise n'a pas gagné d'argent, mais les investisseurs en ont gagné ». Il poursuit en disant que l'entrée en bourse ouvre la porte à beaucoup plus d'argent que nécessaire.

Mais tout cela est à venir. Si les SMR ne sont pas prêts à être déployés dans les dix prochaines années, quelles en seront les conséquences ? Il y en a deux importantes. La première est que, compte tenu des délais de développement de ces nouveaux modèles de

<sup>6</sup> HALEU (High-Assay Low-Enriched Uranium), un type de combustible nucléaire plus enrichi en isotope d'uranium-235 (entre 5 et 20 %) que le combustible conventionnel faiblement enrichi en uranium (LEU – 3 à 5 %) utilisé dans les réacteurs à eau pressurisée et à eau bouillante.

<sup>7</sup> Cependant, à la suite de la propagande très efficace de l'AIEA (Agence internationale pour l'énergie atomique) et du lobby du nucléaire, l'intérêt du nucléaire comme source d'électricité bas carbone est surévalué. Une évaluation sérieuse des émissions de GES tout au long de la chaîne des nombreux processus qui se succèdent dans le cycle de vie du nucléaire

réacteurs, il est peu probable qu'ils aient un impact significatif sur les réductions d'émissions de CO<sub>2</sub> avant des décennies, ce qui réduit leur pertinence pour l'argument climatique.

Plus important encore, si, comme l'a montré une étude récente, les SMR sont nettement plus chers que le solaire photovoltaïque (PV), l'éolien terrestre et même la géothermie, à quoi ressemblera le marché dans 20 ou 30 ans, lorsque les énergies renouvelables seront vraisemblablement encore moins chères ?

Il est certain que les centrales nucléaires existantes jouent un rôle important dans la réduction des gaz à effet de serre et qu'elles continueront à le faire<sup>7</sup>. Mais les promesses des SMR sont discutables et nécessiteront des investissements massifs pour avoir un impact significatif sur le changement climatique.

Alors pourquoi tant de battage autour de nouvelles technologies nucléaires qui, pour l'instant, n'existent pas et seront probablement très coûteuses ? La nécessité de décarboner la production d'énergie joue un rôle, attirant des militants écologistes tels que Michael Schellenberger et Stewart Brand. L'arrivée de grandes quantités de capital-risque au cours de la dernière décennie est un autre facteur. Un analyste m'a dit : « Il y a beaucoup d'argent stupide qui circule en ce moment [pour investir] ».

La culture libertaire du « tech bro »<sup>8</sup>, qui valorise les nouvelles technologies, déteste la réglementation et s'intègre pleinement au libre marché, a engendré une nouvelle génération de « nuclear bros » (frères du nucléaire), selon le Washington Post. Naomi Oreskes note que l'appel à l'énergie nucléaire pour répondre à nos besoins énergétiques dans un monde qui se réchauffe reflète notre « technofétichisme », c'est-à-dire la foi dans le fait que la technologie résoudra nos problèmes. Les médias sont devenus une chambre d'écho où la surenchère est de mise et les grands avantages de l'énergie nucléaire sont vantés dans un langage trompeur qui laisse supposer que cette technologie est déjà entièrement éprouvée.

Dans l'ambiance de célébration du nucléaire du moment, il y a peu de patience ou de volonté politique pour que des voix mesurées discutent de la réalité, à savoir que les nouveaux réacteurs nucléaires n'auront pas d'impact mesurable sur le changement climatique avant plusieurs décennies – si tant est qu'ils n'en aient jamais un.

Allison Macfarlane

21 juillet 2023

aboutit à plus de 100 g de CO<sub>2</sub>e/kWh, tout en devant faire l'impasse sur les incertitudes liées au démantèlement et la gestion des déchets à très long terme. Sans parler non plus de l'énorme contribution d'un accident grave toujours possible...

<sup>8</sup> « Bro », abréviation de *brother* (frère). Tech Bro : personne, généralement un homme, qui travaille dans le secteur de la technologie numérique, en particulier aux États-Unis, et qui est parfois considérée comme n'ayant pas de bonnes aptitudes sociales et comme étant trop confiante en ses propres capacités (définition du Cambridge Dictionary).