

# PETITS RÉACTEURS NUCLÉAIRES MODULAIRES ET AVANCÉS : UNE CONFRONTATION AVEC LA RÉALITÉ

Mémoire présenté au Comité de la science et de la recherche (SRSR) de la Chambre des Communes

Étude sur les programmes internationaux ambitieux  
22 novembre 2022

par M. V. Ramana

Professeur et titulaire de la chaire Simons sur le désarmement, la sécurité mondiale et humaine  
École de politique publique et d'affaires mondiales  
Université de la Colombie-Britannique, Vancouver  
[m.v.ramana@ubc.ca](mailto:m.v.ramana@ubc.ca)

Texte de l'article publié en 2021 dans la revue *IEEE Access* Vol 9 : 42090-99.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3064948>.

## I. INTRODUCTION

Des pays du monde entier ont exprimé leur intérêt pour le développement ou le déploiement de modèles de petits réacteurs modulaires ou de réacteurs nucléaires avancés. L'Agence internationale de l'énergie atomique recense 72 projets dans son rapport biennal sur les petits réacteurs modulaires (PRM) [1]. Bien que des efforts aient déjà été déployés pour mettre au point et commercialiser des PRM, ils n'ont pas été couronnés de succès [2]-[4]. Les promoteurs des PRM promettent que ces réacteurs représentent l'avenir de l'énergie nucléaire et qu'ils résolvent un grand nombre des problèmes qui ont freiné cette technologie [5]-[9]. Ils affirment également que les PRM sont particulièrement adaptés à l'évolution des marchés de l'énergie, en raison de caractéristiques techniques telles que les capacités de suivi de la charge et leur capacité à produire de la chaleur à haute température.

Cet article de perspective évalue certaines de ces affirmations, dans le contexte d'une contrainte importante : la compétitivité économique. Il commence par un bref aperçu de l'évolution historique de l'énergie nucléaire et des moteurs du développement des PRM. Il aborde ensuite les défis économiques auxquels sont confrontés les PRM, les modèles les plus susceptibles d'être construits dans un avenir proche ou à moyen terme. Nous examinons ensuite quelques-uns des autres arguments avancés par les partisans de ces technologies pour obtenir le soutien du gouvernement. Il se termine par quelques commentaires pronostiques sur les marchés pour ces modèles de réacteurs.

## II. SCÉNARIO HISTORIQUE ET ÉCONOMIQUE

La volonté de développer les PRM et les réacteurs nucléaires avancés s'explique par le déclin de l'énergie nucléaire au cours du dernier quart de siècle, dont la part est passée de 17,5 % de l'énergie électrique mondiale produite en 1996 à environ 10 % en 2019 [10], [11]. Le principal problème est d'ordre économique. Comme le dit sans ambages l'étude de 2003 du Massachusetts Institute of Technology, « aujourd'hui, l'énergie nucléaire n'est pas un choix économiquement compétitif » [12, p. 3]. La même étude a également relevé comme problèmes le risque d'accidents, la production de déchets radioactifs et le lien avec la production d'armes nucléaires.

Cette évaluation économique a été réalisée au moment où l'on disait que le marché mondial de l'énergie nucléaire était à la veille de ce que l'on a appelé une renaissance nucléaire [13]-[17], propulsée aux États-Unis par l'*Energy Policy Act* de 2005 qui offrait diverses garanties et incitatifs pour l'énergie nucléaire [18].

Cette renaissance espérée s'est évanouie en quelques années et, en 2012, John Rowe, ancien président-directeur général d'Exelon Corporation, alors le plus grand exploitant nucléaire des États-Unis, a candidement admis : « Permettez-moi d'affirmer sans équivoque que je n'ai jamais rencontré une centrale nucléaire que je n'aimais pas... Cela dit, permettez-moi également d'affirmer sans équivoque que les nouvelles centrales n'ont aucun sens à l'heure actuelle » [19]. Les nouvelles centrales dont Rowe parlait étaient les réacteurs AP1000 (Advanced Passive 1000) en cours de construction dans les États de la Géorgie et de la Caroline du Sud aux États-Unis.

Ces deux projets ont largement dépassé les estimations de coûts initiales, le projet Vogtle devant actuellement coûter 29 milliards de dollars, contre 14 milliards au début de la construction [20], [21]. Au début de la construction, la

la compagnie d'électricité responsable prévoyait que le premier des deux réacteurs en construction serait « mis en service en 2016 et le second en 2017 » [20]. En février 2021, aucun des deux réacteurs n'était encore entré en service.

L'autre projet nucléaire en Caroline du Sud a été abandonné en 2017 après que 9 milliards de dollars y aient été dépensés [22]. Cet échec a conduit Westinghouse, l'entreprise directement ou indirectement responsable de la conception de la majorité des réacteurs nucléaires dans le monde, à se placer sous la protection de la loi sur les faillites [23], [24].

Ce schéma de dépassement des coûts et des délais a également été observé dans d'autres pays. En France, le projet Flamanville 3 a « une décennie de retard » et « devrait coûter 12,4 milliards d'euros » [25], soit beaucoup plus que les 3,3 milliards d'euros prévus au début de la construction [26, p. 39]. Le coût de construction de la centrale russe NPP-2 de Leningrad est passé d'une estimation de 133 milliards de roubles à 244 milliards de roubles (environ 8 milliards USD) [27, p. 171]. Le coût des réacteurs indiens de Koodankulam était estimé en 2010 à 131,71 milliards de roupies [28], mais il est passé à 224,62 milliards de roupies (3,5 milliards de dollars) [29].

Certains pays, en particulier la Chine, ont continué à construire des centrales nucléaires. Mais dans tous les pays, la construction s'est considérablement ralentie par rapport aux plans antérieurs et les projections mondiales concernant la capacité électronucléaire ont diminué. La construction nucléaire en cours doit être considérée comme faisant partie de la stratégie adoptée par ces pays, qui consiste à développer de nombreuses sources d'énergie différentes plutôt que de se concentrer sur l'énergie nucléaire, et dans le contexte d'installations beaucoup plus importantes d'énergie solaire et éolienne [10].

C'est dans ce contexte qu'il faut considérer l'argument selon lequel si l'énergie nucléaire doit se développer, ce ne peut être que sur la base d'une nouvelle génération ou de nouveaux types de réacteurs nucléaires. Les petits réacteurs modulaires ou les réacteurs avancés font partie de ces solutions espérées.

### III. PETITS RÉACTEURS NUCLÉAIRES MODULAIRES ET AVANCÉS

Nous commençons par quelques clarifications sur la nomenclature. Les termes « petits », « modulaires » et « avancés » ne font pas référence à une ou plusieurs conceptions spécifiques et il existe un chevauchement considérable entre les différentes catégories. Il convient de noter que la quasi-totalité d'entre eux ne sont que des concepts et non des conceptions opérationnelles ou complètes. Bien que les modèles de PRM devraient posséder les deux caractéristiques explicitement incluses dans leur nom, à savoir « petit » et « modulaire » (définies plus loin), la catégorie des réacteurs nucléaires avancés est assez vague et, en principe, tout modèle de réacteur actuel peut prétendre être avancé. En effet, bon nombre des réacteurs nucléaires construits dans le monde aujourd'hui sont le résultat de programmes mis en œuvre dans les années 1980 et 1990 pour développer des modèles « avancés », notamment des réacteurs à eau légère avancés [30]-[33]. En outre, de nombreux modèles de réacteurs peuvent être considérés comme des réacteurs avancés ou des réacteurs à eau légère, ou les deux. Par exemple, le réacteur à haute température Xe-100 est considéré comme un PRM par l'Agence internationale de l'énergie atomique [1], mais a reçu 80 millions de dollars en 2020 du programme de démonstration de réacteurs avancés du département américain de l'Énergie.

Au début des années 2000, un effort de recherche international a été organisé pour développer ce que l'on appelle les systèmes d'énergie nucléaire de génération IV, qui devaient apporter des améliorations considérables en termes d'économie, de sécurité, de durabilité et de résistance à la prolifération [34]. Les réacteurs de génération IV peuvent être petits ou grands. Quelle que soit leur taille, diverses caractéristiques des réacteurs de génération IV s'appliquent à de nombreux modèles de PRM et de réacteurs nucléaires avancés.

La plus pertinente de ces caractéristiques pour notre discussion est leur état de préparation technologique, ou leur manque de préparation. Lorsque cette initiative a été créée en 2000 « dans le but de favoriser la recherche et le développement nécessaires pour étayer le développement d'une nouvelle génération de systèmes d'énergie nucléaire », l'objectif était « un déploiement commercial d'ici 2020-2030 » [35, p. 4323]. Cette échéance a été repoussée, et la mise à jour de 2018 du forum Génération IV a conclu que « l'état de préparation pour le déploiement commercial du parc » a été repoussé à « environ 2045 (pour les premiers systèmes) » [36].

Cet allongement du délai s'explique par le fait que ces modèles de réacteurs dits avancés sont incomplets, avec des défis technologiques majeurs à surmonter avant de pouvoir être considérés comme prêts à être déployés. En 2015, l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN) a examiné ces modèles de réacteurs et a conclu que « parmi les différents systèmes nucléaires envisagés par le GIF [Forum international Génération IV], seul le système SFR [réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium] présente une maturité suffisante pour que la réalisation d'un prototype de réacteur de quatrième génération soit envisageable dans la première moitié du XXI<sup>e</sup> siècle; la mise en œuvre de ce scénario nécessite toutefois l'aboutissement d'études et de développements technologiques déjà identifiés » [37].

Il convient de noter que l'échéance de la « première moitié du XXI<sup>ème</sup> siècle » dépasse de loin les échéances requises pour relever les défis les plus ambitieux en matière d'atténuation des changements climatiques définis par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat et d'autres agences internationales et nationales. L'expérience a montré que les SFR, le seul modèle de quatrième génération présenté par l'IRSN comme relativement mature, sont coûteux, sujets à des accidents et à des problèmes opérationnels [38].

Passons maintenant aux PRM. Comme leur nom l'indique, ces réacteurs sont conçus pour produire des quantités d'énergie relativement faibles par rapport au parc de réacteurs nucléaires actuel, une petite puissance étant définie comme inférieure à 300 mégawatts (MW) d'électricité. Le terme modulaire est utilisé pour faire référence, en partie, à l'idée qu'un réacteur nucléaire de grande puissance est remplacé par de nombreux réacteurs de plus petite puissance. L'autre sens dans lequel le terme modulaire est utilisé est pour souligner que, au lieu d'essayer de construire toute la centrale nucléaire sur le site à partir de zéro, le réacteur est assemblé sur place à partir de divers modules qui ont été fabriqués dans des usines.

Les termes « petit » et « modulaire » ne sont que deux caractéristiques de la conception et il existe toute une gamme de combustibles, de modérateurs et de réfrigérants qui pourraient être utilisés dans différents types de PRM [1], [39]. En fonction du modèle choisi, la taille physique de ces centrales peut être petite ou grande, sans grand rapport avec la capacité de production.

#### IV. LES CONSÉQUENCES ÉCONOMIQUES DE LA RÉDUCTION DE LA PRODUCTION

Les petits réacteurs, qu'ils soient modulaires ou non, devraient être plus chers par unité de production en raison de ce que les économistes savent depuis des décennies et appellent les économies d'échelle [40]-[42]. Les réacteurs plus grands (ou d'autres centrales électriques d'ailleurs) sont moins chers par mégawatt car leurs coûts d'investissement et d'exploitation, qui représentent les besoins en matériaux et en travail, n'évoluent pas de façon linéaire avec la capacité de production. Cela se reflète dans une règle empirique générale suivie en génie industriel qui utilise une loi de puissance pour relier les coûts d'investissement d'installations de production de différentes capacités, avec un exposant généralement choisi comme étant de 0,6 [43, p. 421]. D'autres études utilisent des chiffres différents pour l'exposant (par exemple, 0,55 utilisé dans une étude des Laboratoires nucléaires canadiens [44]), mais aucune d'entre elles ne prévoit que l'exposant sera égal à un. Avec un exposant de 0,6, s'il y a deux centrales de taille  $S_1$  et  $S_2$ , le rapport de leurs coûts d'investissement  $K_1$  et  $K_2$  est donné par :

$$K_1 = S_1^{0.6} \quad \text{\# \%}$$

$$K_2 = S_2^{0.6} \quad \text{\$ "S.,\&}$$

Cette formule implique que, toutes choses étant égales par ailleurs, un PRM d'une puissance de 200 MW aurait un coût de construction d'environ 40 % du coût de construction d'un réacteur de 1 000 MW, alors qu'il ne produirait que 20 % de l'électricité. Ainsi, le PRM de 200 MW a un coût par MW de capacité environ deux fois plus élevé. De même, l'exploitation d'un PRM sera également plus coûteuse par MW de capacité par rapport à un grand réacteur en raison des déséconomies d'échelle. Ces deux facteurs entraîneront un coût plus élevé par unité d'électricité produite.

Les concepteurs de petits réacteurs modulaires et de réacteurs nucléaires avancés s'opposent souvent à l'application de ces lois d'échelle car, selon eux, leurs conceptions sont si différentes des réacteurs actuels qu'elles invalident l'échelle. Bien que cela puisse avoir une part de vérité et que ces lois de puissance ne puissent être considérées comme des moyens exacts de calculer les coûts, le principe général des pertes économiques dues à une taille plus petite reste valable.

En outre, deux corollaires découlent de cet argument sur les différences de conception. Premièrement, le manque d'expérience avec ces conceptions signifie que les estimations de coût et de temps de construction sont beaucoup plus incertaines, et qu'elles souffriront probablement des énormes dépassements qui caractérisent les projets innovateurs [45]-[47]. Deuxièmement, les nouvelles conceptions signifient que le processus d'obtention des autorisations de sécurité devrait être plus exigeant, du moins dans tout système réglementaire bien conçu et fonctionnant correctement, et donc plus coûteux. Pour donner une idée de l'ampleur des dépenses en jeu, le développement de la conception du PRM NuScale a coûté 957 millions de dollars jusqu'en mars 2020, dont 314 millions de dollars apportés par le gouvernement américain [48]. On s'attend à ce que 500 à 700 millions de dollars supplémentaires soient dépensés avant que la conception ne reçoive l'approbation réglementaire pour que la construction puisse commencer [49], [50]. Le coût total de la recherche et du développement, qui s'élève à environ 1,5 milliard de dollars, concerne un réacteur à eau légère à échelle réduite, le modèle de réacteur nucléaire le plus répandu dans le monde.

Les conceptions entièrement nouvelles envisagées par les développeurs de réacteurs nucléaires avancés et certains développeurs de PRM devraient coûter encore plus cher pour passer de la conception à la licence de construction. Le

secteur privé n'a tout simplement pas envie de financer des investissements aussi risqués. Une bonne illustration est celle de Bill Gates qui a dépensé des milliards de dollars dans divers efforts philanthropiques mais qui cherche toujours des subventions gouvernementales pour son projet nucléaire [51]-[53].

## V. L'APPRENTISSAGE PEUT-IL COMPENSER ?

Les partisans des petits réacteurs modulaires affirment qu'ils peuvent compenser les économies d'échelle perdues en réalisant des économies grâce à la fabrication en série et modulaire dans des usines et à l'apprentissage qui en résulte [54]-[60]. Dans ce contexte, l'apprentissage fait principalement référence à la réduction du coût avec l'augmentation de la construction. Il est souvent quantifié par un taux d'apprentissage, qui est défini comme le pourcentage de réduction des coûts associé à un doublement des unités produites [61].

L'argument économique en faveur des PRM repose essentiellement sur un apprentissage rapide. Que savons-nous de l'apprentissage? Au début du siècle, une étude de l'Université de Chicago a conclu que « la fourchette raisonnable des taux d'apprentissage futurs dans l'industrie nucléaire américaine est de 3 à 10 % » [61, pp. 4-24]. Même l'estimation supérieure est faible par rapport à la plupart des autres technologies énergétiques [62]-[64].

En outre, pour des taux d'apprentissage tels que ceux prévus pour l'industrie nucléaire, le même modèle de PRM devra être fabriqué par milliers pour que le coût de l'électricité produite par les PRM atteigne le seuil de rentabilité par rapport au coût correspondant de l'électricité produite par les grands réacteurs [39]. Il est peu probable qu'il existe un marché pour un si grand nombre de PRM à prix élevé; ces unités ne seront même pas compétitives par rapport aux grandes centrales nucléaires, sans parler des autres sources d'électricité. Les évaluations d'experts des coûts prévus des PRM confirment le pronostic selon lequel l'apprentissage ne compensera pas suffisamment les déséconomies d'échelle [72], [73].

Un apprentissage durable nécessiterait également qu'une ou deux conceptions de réacteurs standard soient choisies pour être construites en si grandes quantités. Cependant, comme nous l'avons mentionné précédemment, environ six douzaines de modèles de réacteurs PRM sont à différents stades de développement dans plusieurs pays [1]. Il est très peu probable qu'un ou même quelques modèles soient choisis de manière coordonnée par différents pays et entités privées, écartant ainsi la grande majorité des modèles dans lesquels on investit actuellement.

Dans le cas des grands réacteurs nucléaires, de nombreuses conceptions très différentes sont en cours de construction, même aujourd'hui, après des décennies d'expérience dans ce domaine. Les PRM et les réacteurs avancés en cours de développement ont actuellement des conceptions très différentes et cherchent à exploiter des niches différentes. De telles différences ne favorisent pas la normalisation.

Le pronostic concernant la réduction des coûts est encore pire. Si l'on examine les données historiques, on constate qu'au niveau du parc, l'énergie nucléaire pourrait même avoir ce que l'on appelle un taux d'apprentissage négatif. Aux États-Unis et en France, les deux pays qui possèdent les plus grands parcs de réacteurs nucléaires, les réacteurs construits plus tard ont en fait coûté plus cher que ceux construits plus tôt [65]-[71]. Si ce schéma se vérifie pour les PRM, cela signifierait qu'un petit réacteur ne rattrapera jamais le coût d'un grand réacteur de conception similaire.

## VI. LA CONSTRUCTION MODULAIRE PEUT-ELLE AIDER ?

Comme mentionné précédemment, les promoteurs des PRM soulignent l'importance de la « construction modulaire », dans laquelle de nombreux composants du réacteur sont fabriqués en usine et assemblés sur le site, afin de réduire les coûts. Cette méthode est devenue une pratique courante dans une grande partie de la fabrication actuelle, par exemple dans la construction de maisons. Cette pratique a également été intégrée à la fabrication des réacteurs nucléaires pendant un certain temps, notamment par Westinghouse.

Westinghouse a mis l'accent sur cette pratique dans la conception du réacteur AP1000 et celle du réacteur modulaire à lit de galets proposé, mais jamais construit, en Afrique du Sud [74, p. 1860], [75]. Mais l'expérience des réacteurs AP1000 construits aux États-Unis et en Chine montre que cette stratégie est également problématique, bien que d'une manière différente de la fabrication conventionnelle. Plus important encore, les réacteurs nucléaires construits de manière modulaire ne sont pas épargnés par la malédiction des coûts d'investissement élevés. Comme l'a déclaré au *Wall Street Journal* un ancien membre de la Georgia Public Service Commission, l'autorité des services publics de l'État qui supervise la centrale nucléaire de Vogtle aux États-Unis, « la construction modulaire n'a pas été la solution promise par les services publics » [76].

Un exemple spécifique de la façon dont la construction modulaire n'a pas aidé concerne l'un des paramètres importants qui détermine l'économie d'un projet nucléaire : la durée de construction d'une centrale nucléaire. La construction d'une grande centrale nucléaire, depuis la première coulée de béton jusqu'à ce qu'elle puisse alimenter les foyers et les bureaux,

prend environ dix ans [10]. Face à cette réalité historique, la construction modulaire était censée, selon ses partisans, réduire considérablement ce délai. En 2014, par exemple, un haut responsable de Westinghouse affirmait que « la conception de l'AP1000 permet d'économiser de l'argent et du temps avec une période de construction accélérée d'environ 36 mois, du coulage du premier béton au chargement du combustible » [77]. En revanche, le projet Haiyang en Chine a mis environ 9 ans pour passer du début de la construction à la déclaration de commercialisation [78]. Les coûts de construction ont également augmenté de façon spectaculaire. Les réacteurs AP1000 en construction aux États-Unis ont connu des résultats encore plus mauvais.

L'AP1000 n'est en aucun cas un cas unique. Il existe une longue tradition de sous-estimation du temps nécessaire à la construction d'une centrale nucléaire dans le monde. En effet, une étude sur les dépassements de coûts de construction a montré que 175 des 180 projets nucléaires examinés avaient des coûts finaux dépassant le budget initial, en moyenne de 117 %; ils ont pris en moyenne 64 % plus de temps que prévu [47], [79]. La particularité de l'AP1000 est qu'il était censé être une exception à ce schéma en raison de sa « construction modulaire » – et qu'il a fini par devenir un exemple de plus de ce schéma.

Les petits réacteurs modulaires ont eux aussi connu des dépassements de coûts et de délais. Par exemple, le réacteur russe KLT-40S, destiné à être déployé sur une barge en tant que centrale nucléaire flottante, a pris environ quatre fois plus de temps que prévu au départ. Les projections initiales de 2006 prévoyaient que la centrale serait construite en trois ans environ, mais il a fallu plus de 12 ans pour qu'elle soit connectée au réseau [10]. Les estimations de coûts ont quadruplé. Il n'y a pas eu de nouvelles commandes pour le KLT-40S.

Face aux défis économiques associés aux PRM et aux réacteurs nucléaires avancés, les défenseurs de ces technologies recourent à un certain nombre d'autres arguments pour persuader les décideurs politiques de leur apporter leur soutien. Dans ce qui suit, nous examinons quelques-uns de ces arguments.

## **VII. LES PETITS RÉACTEURS NUCLÉAIRES MODULAIRES ET AVANCÉS SERONT-ILS D'IMPORTANTES CRÉATEURS D'EMPLOIS?**

L'une des raisons fréquemment avancées pour expliquer pourquoi les gouvernements devraient soutenir le développement des PRM est que l'investissement dans les PRM entraînera la création d'emplois [80]-[83]. Bien sûr, l'investissement dans les PRM créera des emplois. Il s'agit là d'une observation futile. La véritable question est de savoir si le nombre d'emplois créés en investissant une certaine somme d'argent dans les PRM dépasse le nombre d'emplois créés en investissant la même somme d'argent dans une technologie énergétique différente mais comparable.

Bien qu'il n'existe pas de données sur les emplois créés par les PRM – parce que les PRM n'ont pas été déployés à un niveau significatif pour mesurer le nombre d'emplois – la documentation indique clairement que l'énergie nucléaire génère moins d'emplois que les énergies renouvelables comme l'énergie solaire et l'énergie éolienne par unité d'énergie produite [84], [85]. Dans la mesure où l'on peut faire des pronostics sur le nombre d'emplois qui pourraient être créés par les réacteurs nucléaires avancés et les petits réacteurs modulaires, les perspectives seraient encore plus sombres. La plupart de ces conceptions visent à réduire le nombre d'opérateurs, car le principal défi que doit relever l'énergie nucléaire est le coût. Certains envisagent même des réacteurs nucléaires fonctionnant de manière totalement automatisée (par exemple [86]) ou avec un minimum d'opérateurs (par exemple [87]). On peut donc s'attendre à ce que les PRM et les réacteurs avancés génèrent moins d'emplois par unité d'électricité produite (en mégawattheures) que les autres technologies énergétiques.

Inversement, comme les emplois nucléaires sont très rémunérateurs, les coûts d'exploitation des centrales nucléaires seront très élevés. Par exemple, le développeur de réacteurs nucléaires Oklo aux États-Unis a déclaré qu'il prévoyait « 15 emplois à temps plein et bien rémunérés » qui sont « disponibles pour les résidents locaux ayant un niveau d'études secondaires » pour sa centrale de 1,5 MW [88]. Le document ne définit pas ce que signifie « bien rémunéré ». Selon le Bureau of Labor Statistics des États-Unis, le salaire annuel des opérateurs, distributeurs et répartiteurs de centrales nucléaires américains en 2019 était de 85 950 \$ [89]. (Notez qu'il s'agit du salaire d'une personne ayant un diplôme d'études secondaires ou une qualification équivalente au moment de l'entrée, et non d'un ingénieur nucléaire hautement qualifié, qui peut gagner plus de 120 000 \$). Si l'on considère l'ensemble de ces éléments, le coût opérationnel de l'électricité produite par un réacteur Oklo s'élèvera à 109 dollars par mégawattheure si le réacteur fonctionne à un facteur de capacité de 90 %, ce qui est une hypothèse optimiste pour un site éloigné où la centrale nucléaire devra faire varier sa production en fonction des changements de la demande ou de la charge. En d'autres termes, même si le coût d'investissement du réacteur et le coût du combustible sont nuls, le coût de l'électricité produite par une hypothétique centrale Oklo sera près de trois fois supérieur à celui des nouvelles centrales solaires ou éoliennes [90]. Il convient de

noter qu'il ne s'agit que du coût de production à la centrale et que les coûts de transmission et de distribution doivent également être intégrés pour être comparés aux coûts résidentiels.

Étant donné que le coût de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne est en baisse, la différence sera encore plus grande au moment où le réacteur Oklo passera de la proposition théorique à une conception autorisée et constructible. Cette grande différence de coûts implique que les PRM seraient probablement beaucoup plus chers, même après avoir pris en compte les coûts de système des autres moyens de gérer la variabilité de l'énergie solaire et éolienne, comme l'ajout de stockage. L'aspect économique peu reluisant d'Oklo signifie que si l'on en construit effectivement, ce sera grâce à d'importantes subventions gouvernementales. Compte tenu de cette dépendance au financement public, on peut s'attendre à ce que, même dans le meilleur des cas, seuls quelques réacteurs de ce type soient construits, ce qui signifie que le nombre d'emplois générés sera minuscule.

#### **VIII. LES PRM PEUVENT-ILS SOUTENIR LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES AVEC DE GRANDES FRACTIONS D'ÉNERGIES RENOUVELABLES AVEC FONCTIONNEMENT EN SUIVI DE CHARGE ?**

La capacité d'ajuster la production d'électricité d'une centrale pour répondre aux variations de la demande d'électricité est appelée fonctionnement en suivi de charge. Plusieurs partisans ont affirmé que les PRM sont capables de répondre à la charge [56], [91]-[94]. Certains de ces auteurs font référence à la capacité de modifier la production sur des périodes de temps relativement longues, par exemple entre la nuit et le jour. Cependant, avec l'augmentation de la part des sources d'électricité variables (ce que l'on appelle parfois intermittentes) telles que l'énergie éolienne ou photovoltaïque, certains concepteurs nucléaires ont mis l'accent sur la capacité des PRM à modifier rapidement leur production en réponse aux changements de la production des centrales éoliennes ou solaires (par exemple [94]). Le fonctionnement en suivi de charge serait essentiel pour le déploiement des conceptions PRM « hors réseau » dans les régions éloignées.

Bien que les centrales nucléaires soient capables de fonctionner en mode suivi de charge, ce qui a été fait dans certains pays, notamment en France et en Allemagne, les réacteurs nucléaires ont des limites techniques qui restreignent leur capacité à fonctionner en mode suivi de charge [95], [96]. D'un point de vue technique, l'arrêt, le redémarrage ou la variation de la puissance de sortie sont tous plus difficiles pour les centrales nucléaires, en particulier les réacteurs refroidis à l'eau, que pour les autres sources d'électricité. Les changements fréquents et brutaux de température accélèrent les interactions entre le combustible nucléaire et la gaine métallique, ce qui, avec le temps, peut conduire à la rupture de la gaine et à la libération de produits de fission. De tels changements peuvent réduire la durée d'exploitation et augmenter les coûts de maintenance.

En raison de ces préoccupations en matière de sécurité, les organismes de réglementation exigent que le taux de variation de la puissance soit confiné dans des marges précises. Dans les technologies nucléaires actuellement déployées, la marge des taux de variation de puissance autorisés se situe entre 1 et 5 % de la puissance nominale par minute. Le document European Utilities Requirements (EUR) exige la capacité de fonctionner entre 50 et 100 % de la puissance nominale de la centrale sur une journée, avec un taux de variation de la production électrique de 3 à 5 % de la puissance nominale par minute [95]. Cette capacité limitée à modifier la production des réacteurs nucléaires pourrait ne pas être assez rapide pour compenser les changements potentiellement rapides de la production des centrales éoliennes et solaires.

Bien que le fonctionnement en suivi de charge soit techniquement possible, l'exploitation des réacteurs dans ce mode diminuerait leur compétitivité économique. Le problème vient du fait que les centrales nucléaires ont des coûts fixes (capital) élevés. Il est donc plus judicieux, d'un point de vue économique, de les faire fonctionner en permanence près de leur capacité maximale afin d'améliorer le retour sur investissement. En revanche, les centrales de pointe au mazout ou au gaz sont mieux utilisées pour couvrir les pics de demande d'électricité en raison de leur faible coût en capital et de leur coût élevé en combustible. L'exploitation des réacteurs nucléaires en mode suivi de charge réduirait le facteur de capacité, ce qui augmenterait le coût de l'électricité produite dans ces derniers.

Lorsqu'elles sont déployées sur un réseau en conjonction avec une part importante de sources d'énergie renouvelables, les centrales nucléaires ne fonctionneront pas avec les facteurs de capacité habituels de 90 à 95 % qui sont généralement pris en compte dans les analyses économiques de ces sources d'énergie. Si le facteur de capacité diminue, le coût de production augmentera car les coûts d'investissement et d'exploitation devront être répartis sur moins de kilowattheures. Dans le cas du PRM NuScale, le coût de production de l'électricité augmente d'environ 20 % si le facteur de capacité est réduit de 95 % à 75 % [50]. Étant donné les perspectives économiques déjà médiocres des PRM, cette pénalité exclut essentiellement le déploiement de ces technologies en mode suivi de charge.

Les partisans des petits réacteurs modulaires proposent que l'énergie qui n'est pas utilisée pour produire de l'électricité soit utilisée à d'autres fins, comme le dessalement [97]-[99], ou la cogénération d'hydrogène [91], [100]. De telles

stratégies sont également proposées par les défenseurs des sources d'énergie renouvelables [101]-[107]. Pour la plupart des PRM, l'hydrogène est produit en utilisant de l'électricité pour électrolyser de l'eau, comme dans le cas des énergies renouvelables. La principale différence est que les coûts de l'énergie nucléaire, en particulier ceux des PRM, sont prohibitifs et en augmentation, alors que les coûts des énergies renouvelables sont faibles et en baisse. Plus précisément, les énergies renouvelables bénéficient des coûts marginaux presque nuls de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne, car elles ne nécessitent aucun coût de combustible et les coûts d'exploitation sont minimales. Quelques modèles de PRM et de réacteurs avancés qui n'utilisent pas d'eau pour le refroidissement pourraient être en mesure de réaliser une électrolyse à haute température avec des rendements plus élevés. Cependant, comme nous l'avons vu plus haut, ces conceptions sont loin d'être prêtes et il n'est pas possible de réaliser des analyses économiques significatives à leur sujet pour le moment.

## **IX. LES PRM RÉDUISENT-ILS LA PROBABILITÉ D'ACCIDENTS GRAVES, PRODUISENT-ILS MOINS DE DÉCHETS RADIOACTIFS OU DIMINUENT-ILS LE RISQUE DE PROLIFÉRATION?**

Les partisans affirment que les PRM et les réacteurs avancés ont amélioré la sécurité, réduit la production de déchets radioactifs et augmenté la résistance à la prolifération. Avant d'aborder la véracité de cette affirmation, il convient de rappeler que les réacteurs PRM et les réacteurs nucléaires avancés souffrent également de ces problèmes, bien qu'à des degrés différents des grands réacteurs à eau légère standard. Ainsi, la construction de PRM ou de réacteurs avancés exposera également les citoyens à ces risques.

Comme les PRM et les réacteurs avancés englobent un grand nombre de conceptions disparates, il n'est pas possible de faire des déclarations généralisées. Par exemple, les PRM basés sur des technologies de réacteur rapide produiront une quantité plus faible de déchets nucléaires par unité d'électricité produite, tandis que les PRM basés sur des technologies de réacteur à eau légère produiront plus de déchets par unité d'électricité produite; mais les deux présentent des risques de prolifération plus élevés par rapport aux grands réacteurs à eau légère [117]. (La différence entre les PRM basés sur les technologies des réacteurs rapides et ceux basés sur les réacteurs à eau légère est le taux de combustion; les premiers envisagent généralement la régénération et la combustion *in situ* pour maximiser le taux de combustion du combustible, tandis que les seconds adoptent généralement un schéma simplifié de gestion du cœur « tout ou rien » qui réduit le taux de combustion; dans les deux cas, la taille réduite des réacteurs contribue à réduire le taux de combustion, car davantage de neutrons s'échapperont du cœur par rapport aux réacteurs plus grands).

Le volume des déchets n'est pas toujours la variable la plus pertinente; la taille du dépôt géologique nécessaire pour l'enfouissement des déchets dépend de la production de chaleur et de la composition des déchets [118]. Les déchets provenant des réacteurs rapides et d'autres formes de PRM non basés sur la technologie des réacteurs à eau légère peuvent être corrosifs et/ou pyrophoriques. Le traitement de ces formes de déchets est plus compliqué et le traitement nécessaire avant l'élimination peut finir par augmenter le volume [119]. De nombreux modèles de PRM et de réacteurs nucléaires avancés sont alimentés en plutonium, ce qui nécessite le traitement du combustible usé, souvent dans une usine de retraitement; les usines de retraitement pourraient produire des quantités accrues de différents types de déchets radioactifs [120], [121].

En ce qui concerne les risques d'accident, toutes choses étant égales par ailleurs, un réacteur plus petit pourrait être plus sûr en raison de l'inventaire plus réduit de matières radioactives et de la plus faible quantité d'énergie disponible à libérer en cas d'accident. Cependant, toutes choses sont rarement égales par ailleurs. Les projets de petits réacteurs modulaires impliquent souvent la construction de plusieurs réacteurs sur un même site pour tenter de réduire les coûts en tirant parti d'éléments d'infrastructure communs. NuScale, par exemple, propose de construire douze modules de réacteurs sur chaque site. La multiplicité des réacteurs sur un site augmente le risque qu'un accident survenant dans une unité puisse provoquer des accidents dans d'autres réacteurs ou rendre plus difficile la prise de mesures préventives dans d'autres. Il est également possible que plusieurs unités subissent simultanément des accidents si la raison sous-jacente de l'accident est commune à tous les réacteurs, par exemple un tremblement de terre. Avec plusieurs réacteurs, les inventaires radioactifs combinés peuvent être comparables à ceux d'un grand réacteur.

Plus généralement, les caractéristiques techniques des PRM ne leur permettent pas de résoudre simultanément tous ces problèmes [122]. Lorsqu'on les examine en détail, les conceptions de PRM et de réacteurs nucléaires avancés qui sont en cours de développement se révèlent être des choix quant au problème sur lequel se concentrer et des compromis entre les caractéristiques souhaitées. Les conceptions qui optimisent un paramètre, par exemple le volume des déchets, peuvent rendre d'autres problèmes, tels que le risque d'accidents graves, plus aigus.

## **X. Existe-t-il un marché pour les PRM?**

Jusqu'à présent, il semble qu'il y ait peu de demande pour les PRM. Les PRM développés en Russie (KLT-40S), en Chine (HTR-PM) et en Corée du Sud (SMART) n'ont pas trouvé de clients [10]. Aux États-Unis, le premier projet de

PRM, impliquant la construction d'un réacteur NuScale, a connu des difficultés, de nombreuses compagnies d'électricité qui s'étaient engagées dans le projet ayant choisi d'abandonner le processus lorsque le coût élevé est devenu plus manifeste [108]-[110].

Bien que de nombreux pays en développement affirment être intéressés par les PRM, peu d'entre eux semblent vouloir investir dans la construction d'un tel réacteur. Les cas de la Jordanie, du Ghana et de l'Indonésie en sont de bons exemples. Tous ces pays ont été présentés comme des marchés prometteurs pour les PRM, mais aucun d'entre eux n'en a acheté un [111]-[113].

Les marchés de niche, par exemple les mines et les collectivités éloignées qui ne sont pas desservies par le réseau et qui sont actuellement électrifiées au moyen de centrales diesel dont le coût du combustible est très élevé, sont assez limités. En effet, même dans le meilleur des cas, où l'économie ne joue aucun rôle et où presque tous les utilisateurs potentiels de PRM achètent un petit réacteur modulaire, il a été démontré que la demande nette des mines et des communautés isolées du Canada était bien inférieure à la demande minimale nécessaire pour construire les usines nécessaires à la construction de ces réacteurs [114]. En outre, ces sites éloignés ont souvent offert des possibilités intéressantes en matière d'énergies renouvelables [123]-[125].

L'absence de demande adéquate, que ce soit sur les marchés de niche, les marchés connectés au réseau ou les pays en développement, est une contrainte majeure en raison de l'accent mis sur la construction modulaire par les concepteurs de PRM et de réacteurs nucléaires avancés. Comme l'a admis un concepteur de PRM, « un fournisseur devrait prévoir un marché suffisant pour investir dans des usines suffisamment grandes pour réaliser une économie de production de masse à partir de séries de production de plusieurs centaines d'usines clés en main » [115, p. 688].

S'il n'y a pas de marché pour l'installation d'une usine, les projets PRM se heurtent au problème de l'œuf et de la poule : sans usine, ils ne pourront jamais espérer réaliser les réductions de coûts théoriques qui sont au cœur de la stratégie visant à compenser l'absence d'économies d'échelle.

## XI. CONCLUSION

Les attentes selon lesquelles les petits réacteurs modulaires ou les réacteurs nucléaires avancés sauveront l'énergie nucléaire ont peu de chances d'être satisfaites. La plupart des modèles de réacteurs nucléaires avancés ne sont tout simplement pas prêts à être déployés ou commercialisés en raison de problèmes techniques. Les petits réacteurs modulaires, quant à eux, sont au départ moins économiques que les grands réacteurs en raison de leur puissance de sortie plus faible, sans coûts correspondants. Les diverses méthodes de modification des PRM et des réacteurs nucléaires avancés pour qu'ils puissent suivre la charge ou cogénérer de l'hydrogène ou dessaler de l'eau n'aident pas. Les défenseurs du nucléaire semblent s'accrocher à des brindilles en mettant l'accent sur ces options.

La poursuite du développement des PRM ne fera qu'aggraver le problème de la mauvaise rentabilité de l'énergie nucléaire et rendra plus difficile la concurrence de l'énergie nucléaire avec les sources d'électricité renouvelables. Le scénario est encore plus sombre à l'avenir, car d'autres sources d'approvisionnement en électricité, en particulier les combinaisons d'énergies renouvelables et de technologies de stockage telles que les batteries, deviennent rapidement moins chères.

Enfin, en l'absence de preuve d'une demande suffisante, il n'est pas financièrement viable de mettre en place les installations de fabrication nécessaires pour produire en masse des PRM et des réacteurs avancés. Tous ces problèmes pourraient bien finir par renforcer l'observation faite par le magazine *The Economist* au début du siècle : « L'énergie nucléaire, dont les premiers défenseurs pensaient qu'elle serait 'trop bon marché pour être mesurée', est plus susceptible de rester dans les mémoires comme trop coûteuse pour être importante » [116].

## RÉFÉRENCES

- [1] AIEA, *Advances in small modular reactor technology developments: A supplement to : advanced reactors information system (ARIS) 2020 edition*, Agence internationale de l'énergie atomique, Vienne, 2020.
- [2] J. R. Egan, *Small reactors and the 'second nuclear era'*, « Energy », vol. 9, n° 9-10, pp. 865-874, 1984, doi : 10.1016/0360-5442(84)90017- 3.
- [3] D. T. Ingersoll, *Deliberately small reactors and the second nuclear era*, « Prog. Nucl. Energy », vol. 51, n° 4-5, pp. 589-603, 2009.
- [4] M. V. Ramana, *The forgotten history of small nuclear reactors*, IEEE Spectrum, mai 2015.
- [5] J. Hansen, *'It's the future': How going small may fuel nuclear power's comeback*, CBC News, 25 juin 2019.
- [6] G. Black, M. A. Taylor Black, D. Solan et D. Shropshire, *Carbon free energy development and the role of small modular reactors: A review and decision framework for deployment in developing countries*, « Renew. Sustain. Energy Rev. », vol. 43, pp. 83-94, mars 2015, doi : 10.1016/j.rser.2014.11.011.
- [7] I. N. Kessides, *The future of the nuclear industry reconsidered: Risks, uncertainties, and continued promise*, « Energy Policy », vol. 48, pp. 185-208, 2012.

- [8] R. Rosner et S. Goldberg, *Small modular reactors - key to future nuclear power generation in the U.S.*, Energy Policy Institute of Chicago, Chicago, États-Unis, nov. 2011.
- [9] B. K. Sovacool et M. V. Ramana, *Back to the future: Small modular reactors, nuclear fantasies, and symbolic convergence*, « Science, Technology, & Human Values », vol. 40, n° 1, pp. 96-125, 2015, doi : 10.1177/0162243914542350.
- [10] M. Schneider et A. Froggatt, *The world nuclear industry status report 2020*, Mycle Schneider Consulting, Paris, septembre 2020. [En ligne]. Disponible à l'adresse suivante : <https://www.worldnuclearreport.org/>.
- [11] BP, *Statistical review of world energy 2020*, BP, Londres, juin 2020. Consulté le : 17 juin 2020. [En ligne]. Disponible à l'adresse suivante : <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.
- [12] S. Ansolabehere et coll., *The future of nuclear power*, Massachusetts Institute of Technology, 2003. Consulté le : 7 juin 2017. [En ligne]. Disponible à l'adresse suivante : <http://web.mit.edu/nuclearpower/> [TRADUCTION].
- [13] S. Squassoni, *Nuclear renaissance: Is it coming? Should it?*, Carnegie Endowment for International Peace, Washington, D.C., 2008.
- [14] NUKEM, *Nuclear renaissance: U. S. A. Coping with the new NPP sticker shock*, NUKEM Market Report, pp. 1-43, avril 2008.
- [15] A. Bhatt, *We cannot afford to miss nuclear renaissance: Manmohan, Hindu*, 1<sup>er</sup> septembre 2007.
- [16] B. K. Sovacool, *Questioning a Nuclear Renaissance*, Global Public Policy Institute, Berlin, Allemagne, « GPPi Policy Paper 8 », 2010.
- [17] A. N. Stulberg et M. Fuhrmann, éditeurs, *The nuclear renaissance and international security*. Stanford, Calif: Stanford University Press, 2013.
- [18] CBO, *Nuclear power's role in generating electricity*, United States Congressional Budget Office, Washington, D. C., 2008.
- [19] J. McMahon, *Exelon's 'nuclear guy': no new nukes*, Forbes, 29 mars 2012 [TRADUCTION].
- [20] S. Hargreaves, *First new nuclear reactors OK'd in over 30 years*, CNNMoney, 9 février 2012 [TRADUCTION].
- [21] NIW, *Conventional nuclear newbuild projects (generation III+ or earlier) currently under construction*, « Nuclear Intelligence Weekly », vol. 14, n° 38, p. 6, 18 septembre 2020.
- [22] A. Lacy, *South Carolina spent \$9 billion to dig a hole in the ground and then fill it back in*, The Intercept, 6 février 2019.
- [23] D. Cardwell et J. Soble, *Westinghouse files for bankruptcy, in blow to nuclear power*, The New York Times, 29 mars 2017.
- [24] T. Hals et E. Flitter, *How two cutting edge U.S. nuclear projects bankrupted Westinghouse*, Reuters, 2 mai 2017.
- [25] D. Vidalon et G. D. Clercq, *EDF warns Flamanville weld repairs to cost 1.5 billion euros*, Reuters, 9 octobre 2019 [TRADUCTION].
- [26] EDF, *Rapport annuel 2005*, Électricité de France, Paris, 2005. Consulté le : 28 décembre 2020. [En ligne]. Disponible à l'adresse suivante : [https://www.edf.fr/sites/groupe/files/contrib/groupe-edf/espaces-dedies/espace-finance-fr/informations-financieres/publications-financieres/rapport-annuels/2005/ra2005\\_full\\_vf.pdf](https://www.edf.fr/sites/groupe/files/contrib/groupe-edf/espaces-dedies/espace-finance-fr/informations-financieres/publications-financieres/rapport-annuels/2005/ra2005_full_vf.pdf)
- [27] A. Diakov, *Status and prospects for Russia's fuel cycle*, « Sci. Glob. Secur. », vol. 21, n° 3, pp. 167-188, 2013.
- [28] MoSPI, *Project implementation status report of central sector projects costing Rs. 150 crore & above (April-June, 2010)*, Ministry of Statistics and Programme Implementation, New Delhi, 2010.
- [29] MoSPI, *Project implementation status report of central sector projects costing Rs. 150 crore & above (January-March, 2015)*, Ministry of Statistics and Programme Implementation, New Delhi, 2015.
- [30] OTA, *Nuclear power in an age of uncertainty*, U.S. Congress. Office of Technology Assessment, Washington, D. C. OTA-E-216, 1984.
- [31] A. Y. Gagarinski, V. V. Ignatiev, V. M. Novikov, et S. A. Subbotin, *Advanced light-water reactor: Russian approaches*, « IAEA Bull », vol. 34, n° 2, pp. 37-40, 1992.
- [32] NRC, *Policy, technical, and licensing issues pertaining to evolutionary and advanced light-water reactor (ALWR) designs*, Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., SECY-93-087, avril 1993.
- [33] P. A. David et G. S. Rothwell, *Measuring standardization: An application to the American and French nuclear power industries*, « Eur. J. Polit. Econ ». vol. 12, n° 2, pp. 291-308, septembre 1996, doi : 10.1016/0176-2680(95)00018-6.
- [34] GIF, *A technology roadmap for generation iv nuclear energy systems*, U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and Generation IV International Forum, GIF-002-00, 2002.
- [35] T. Abram et S. Ion, *Generation-IV nuclear power: A review of the state of the science*, « Energy Policy », vol. 36, pp. 4323-4330, 2008 [TRADUCTION].
- [36] GIF, *GIF R&D outlook for generation IV nuclear energy systems: 2018 update*, Generation IV International Forum, 2018. Consulté le : 18 juin 2020. [En ligne]. Disponible à l'adresse suivante : [https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2019-06/7411\\_gif\\_r\\_and\\_d\\_outlook\\_update\\_web.pdf](https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2019-06/7411_gif_r_and_d_outlook_update_web.pdf) [TRADUCTION].
- [37] IRSN, *Examen des systèmes nucléaire de 4<sup>ème</sup> génération*, Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, Paris, avril 2015. Consulté le : 23 mai 2015. [En ligne]. Disponible à l'adresse suivante : [https://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports\\_expertise/surete/Pages/Rapport-Generation-IV\\_04-2015.aspx#.Y5H8I7MJPY](https://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/surete/Pages/Rapport-Generation-IV_04-2015.aspx#.Y5H8I7MJPY).
- [38] IPFM, *Fast breeder reactor programs: History and status*, International Panel on Fissile Materials, Princeton, 2010.
- [39] A. Glaser, M. V. Ramana, A. Ahmad et R. Socolow, *Small modular reactors: A window on nuclear energy*, Andlinger Center for Energy and the Environment at Princeton University, Princeton, N.J., An Energy Technology Distillate, juin 2015. Consulté le : 30 août 2020. [En ligne]. Disponible à l'adresse suivante : <https://acee.princeton.edu/distillates/small-modular-reactors/>.
- [40] J. Haldi et D. Whitcomb, *Economies of scale in industrial plants*, « J. Polit. Econ ». vol. 75, n° 4, pp. 373-385, 1967.
- [41] H. I. Bowers, L. C. Fuller et M. L. Myers, *Trends in nuclear power plant capital-investment cost estimates - 1976 to 1982*, Oak Ridge National Lab, Oakridge, TN, NUREG/CR--3500, 1983.
- [42] R. Cantor et J. Hewlett, *The economics of nuclear power: Further evidence on learning, economies of scale, and regulatory effects*, « Resour. Energy », vol. 10, pp. 315-335, 1988.
- [43] National Research Council, *Nuclear wastes: Technologies for separations and transmutation*. Washington, D.C. : National Academy Press, 1996.
- [44] M. Moore, *The economics of very small modular reactors in the North*, présenté à la 4<sup>e</sup> réunion technique internationale sur les petits réacteurs (ITMSR-4), Ottawa, nov. 2016, consulté le : 9 octobre 2018. [En ligne]. Disponible à l'adresse suivante : [https://www.cns-snc.ca/conf\\_papers/paper\\_1835](https://www.cns-snc.ca/conf_papers/paper_1835).
- [45] E. W. Merrow, *Industrial megaprojects - Concepts, strategies, and practices for success*. Hoboken, NJ : Wiley, 2011.
- [46] B. Flyvbjerg, *What you should know about megaprojects and why: An overview*, « Proj. Manag. J. », vol. 45, n° 2, p. 6-19, 2014, doi : <https://doi.org/10.1002/pmj.21409>.
- [47] B. K. Sovacool, A. Gilbert, et D. Nugent, *Risk, innovation, electricity infrastructure and construction cost overruns: Testing six hypotheses*, « Energy », vol. 74, pp. 906-917, septembre 2014, doi : 10.1016/j.energy.2014.07.070.

- [48] J. L. Hopkins, *Building a 100 percent clean economy: Advanced nuclear technology's role in a decarbonized future*, présenté au House Committee on Energy and Commerce Subcommittee on Energy, Washington, D. C., 3 mars 2020, consulté le 23 juin 2020. [En ligne]. Disponible à l'adresse suivante : <https://docs.house.gov/meetings/IF/IF03/20200303/110640/HHRG-116-IF03-Wstate-HopkinsJ-20200303.pdf>.
- [49] P. Chaffee, *DOE agrees major new commitment to NuScale*, « Nuclear Intelligence Weekly », vol. XIV, n° 8, pp. 6-7, 21 février 2020.
- [50] M. V. Ramana, *Eyes wide shut: Problems with the Utah associated municipal power systems proposal to construct NuScale small modular nuclear reactors*, Oregon Physicians for Social Responsibility, Portland, OR, septembre 2020. Consulté le : 13 octobre 2020. [En ligne]. Disponible à l'adresse suivante : [https://www.oregonpsr.org/small\\_modular\\_reactors\\_PRMs](https://www.oregonpsr.org/small_modular_reactors_PRMs).
- [51] T. Gardner, *Bill Gates' nuclear venture plans reactor to complement solar, wind power boom*, Reuters, 28 août 2020.
- [52] K. Houser, *Bill Gates: U.S. leaders must embrace nuclear energy*, Futurism, 31 décembre 2018.
- [53] N. Aschoff, *The new prophets of capital*. Londres ; Brooklyn, NY : Verso, 2015.
- [54] M. Carelli, B. Petrovic, C. W. Mycoff, P. Trucco, M. E. Ricotti et G. Locatelli, *Economic comparison of different size nuclear reactors*, Cancun, 2007.
- [55] M. Carelli et coll., *Economic features of integral, modular, small-to-medium size reactors*, « Prog. Nucl. Energy », vol. 52, n° 4, pp. 403-414, 2010.
- [56] D. Shropshire, *Economic viability of small to medium-sized reactors deployed in future European energy markets*, « Prog. Nucl. Energy », vol. 53, n° 4, pp. 299-307, 2011.
- [57] G. Locatelli, C. Bingham, et M. Mancini, *Small modular reactors: A comprehensive overview of their economics and strategic aspects*, « Prog. Nucl. Energy », vol. 73, pp. 75-85, 2014, doi : 10.1016/j.pnucene.2014.01.010.
- [58] S. Boarin et M. E. Ricotti, *An evaluation of PRM economic attractiveness*, « Sci. Technol. Nucl. Install. », vol. 2014, 2014, doi : 10.1155/2014/803698.
- [59] B. Mignacca et G. Locatelli, *Economics and finance of Small Modular Reactors: A systematic review and research agenda*, « Renew. Sustain. Energy Rev. », vol. 118, février 2020, doi : 10.1016/j.rser.2019.109519.
- [60] C. Lloyd, A. R. M. Roulstone, et C. Middleton, *The impact of modularisation strategies on small modular reactor cost*. American Nuclear Society, 2018.
- [61] UC, *The economic future of nuclear power*, University of Chicago, Chicago, États-Unis, 2004 [TRADUCTION].
- [62] A. McDonald et L. Schratzenholzer, *Learning rates for energy technologies*, « Energy Policy », vol. 29, pp. 255-261, 2001.
- [63] E. S. Rubin, I. M. L. Azevedo, P. Jaramillo et S. Yeh, *A review of learning rates for electricity supply technologies*, « Energy Policy », vol. 86, pp. 198-218, novembre 2015, doi : 10.1016/j.enpol.2015.06.011.
- [64] I. Mauleón, *Photovoltaic learning rate estimation: Issues and implications*, « Renew. Sustain. Energy Rev. », vol. 65, pp. 507-524, novembre 2016, doi : 10.1016/j.rser.2016.06.070.
- [65] N. Boccard, *The cost of nuclear electricity: France after Fukushima*, « Energy Policy », vol. 66, pp. 450-461, mars 2014, doi : 10.1016/j.enpol.2013.11.037.
- [66] A. Grubler, *The French pressurised water reactor programme*, dans « Energy Technology Innovation: Learning from Historical Successes and Failures », A. Grubler et C. Wilson, éditeurs. Cambridge: Cambridge University Press, 2013, p. 146-162.
- [67] A. Grubler, *The costs of the French nuclear scale-up: A case of negative learning by doing*, « Energy Policy », vol. 38, n° 9, pp. 5174-5188, 2010.
- [68] N. E. Hultman, J. G. Koomey, et D. M. Kammen, *What history can teach us about the future costs of U.S. nuclear power*, « Environ. Sci. Technol. », vol. 40, n° 7, pp. 2088-94, 2007.
- [69] J. G. Koomey et N. E. Hultman, *A reactor-level analysis of busbar costs for US nuclear plants, 1970-2005*, « Energy Policy », vol. 35, pp. 5630-5642, 2007.
- [70] L. E. Rangel et F. Lévéque, *Revisiting the cost escalation curse of nuclear power*, IAEA Newsletter, vol. Third Quarter, Third Quarter 2013.
- [71] P. Eash-Gates, M. M. Klemun, G. Kavlak, J. McNerney, J. Buongiorno et J. E. Trancik, *Sources of cost overrun in nuclear power plant construction call for a new approach to engineering design*, « Joule », vol. 4, n° 11, pp. 2348-2373, Nov. 2020, doi : 10.1016/j.joule.2020.10.001.
- [72] A. Abdulla, I. L. Azevedo et M. G. Morgan, *Expert assessments of the cost of light water small modular reactors*, « Proc. Natl. Acad. Sci. », vol. 110, n° 24, p. 9686-9691, 2013.
- [73] L. D. Anadón, V. Bosetti, M. Bunn, M. Catenacci et A. Lee, *Expert judgments about RD&D and the future of nuclear energy*, « Environ. Sci. Technol. », vol. 46, n° 21, pp. 11497-11504, 2012, doi : 10.1021/es300612c.
- [74] R. A. Matzie, *AP1000 will meet the challenges of near-term deployment*, « Nucl. Eng. Des. », vol. 238, pp. 1856-1862, 2008.
- [75] E. Wallace, R. Matzie, R. Heiderd et J. Maddalena, *From field to factory-Taking advantage of shop manufacturing for the pebble bed modular reactor*, « Nucl. Eng. Des. », vol. 236, pp. 445-453, 2006.
- [76] R. Smith, *Prefab nuclear plants prove just as expensive*, Wall Street Journal, 27 juillet 2015 [TRADUCTION].
- [77] N. Shulyak, *Westinghouse AP1000® pwr : Meeting customer commitments and market needs*, présenté à la 10<sup>e</sup> conférence internationale : Nuclear Option in Countries with Small and Medium Electricity Grids, Zadar, Croatie, 1<sup>er</sup> juin 2014, consulté le : 31 mars 2017. [En ligne]. Disponible à l'adresse suivante : [http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/46/136/46136339.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/46/136/46136339.pdf) [TRADUCTION].
- [78] AIEA, *Power reactor information system (PRIS) database*, <http://www.iaea.org/programmes/a2/>.
- [79] B. K. Sovacool, A. Gilbert et D. Nugent, *An international comparative assessment of construction cost overruns for electricity infrastructure*, « Energy Res. Soc. Sci. », vol. 3, pp. 152-160, septembre 2014, doi : 10.1016/j.erss.2014.07.016.
- [80] P. Lyons, *Challenges: Nuclear power today and megawatt size reactors*, présenté lors de l'atelier Workshop on Safe and Secure Megawatt-Size Nuclear Power Workshop, mars 2016, consulté le : 23 juillet 2018. [En ligne]. Disponible à l'adresse suivante : <https://arpa-e.energy.gov/?q=workshop/safe-and-secure-megawatt-size-nuclear-power-workshop>.
- [81] EPI, *Economic and employment impacts of small modular reactors*, Energy Policy Institute, Boise, Idaho, juin 2010.
- [82] M. Bowen, *Enabling nuclear innovation: Leading on PRMs*, Nuclear Innovation Alliance, octobre 2017. Consulté le : 30 décembre 2020. [En ligne]. Disponible à l'adresse suivante : <https://www.nuclearinnovationalliance.org/new-report-calls-reforms-support-small-modular-reactor-development>.

- [83] Expert Finance Working Group on Small Reactors, *Market framework for financing small nuclear*, Department for Business, Energy & Industrial Strategy, Londres, 2018. Consulté le : 10 juin 2019. [En ligne]. Disponible à l'adresse suivante : <https://www.gov.uk/government/publications/market-framework-for-financing-small-nuclear>.
- [84] Z. Kis, N. Pandya et R. H. E. M. Koppelaar, *Electricity generation technologies: Comparison of materials use, energy return on investment, jobs creation and CO2 emissions reduction*, « Energy Policy », vol. 120, pp. 144-157, septembre 2018, doi : 10.1016/j.enpol.2018.05.033.
- [85] M. Wei, S. Patadia et D. M. Kammen, *Putting renewables and energy efficiency to work: How many jobs can the clean energy industry generate in the US*, « Energy Policy », vol. 38, n° 2, pp. 919-931, février 2010, doi : 10.1016/j.enpol.2009.10.044.
- [86] E. Teller, M. Ishikawa et L. Wood, *Completely automated nuclear reactors for long-term operation*, Lawrence Livermore National Lab, UCRL-JC--122708, 1996. Consulté le : 30 décembre 2020. [En ligne]. Disponible à l'adresse suivante : [http://inis.iaea.org/Search/search.aspx?orig\\_q=RN:27063138](http://inis.iaea.org/Search/search.aspx?orig_q=RN:27063138).
- [87] R. Carper et S. D. Schmid, *The little reactor that could?*, « Issues in Science and Technology », vol. 27, n° 4, pp. 82-89, 2011.
- [88] Oklo, *Aurora environmental report-Combined license stage*, Nuclear Regulatory Commission, Rockville, MD, 2020. Consulté le : 17 décembre 2020. [En ligne]. Disponible à l'adresse suivante : <https://www.nrc.gov/docs/ML2007/ML20075A004.pdf> [TRADUCTION].
- [89] BLS, *Nuclear power reactor operators*, U.S. Bureau of Labor Statistics, 6 juillet 2020. <https://www.bls.gov/oes/current/oes518011.htm> (consulté le 30 décembre 2020).
- [90] Lazard, *Lazard's levelized cost of energy-Version 14.0*, Lazard, New York, octobre 2020. Consulté le : 30 décembre 2020. [En ligne]. Disponible à l'adresse suivante : <https://www.lazard.com/media/451419/lazards-levelized-cost-of-energy-version-140.pdf>.
- [91] G. Locatelli, S. Boarin, A. Fiordaliso et M. E. Ricotti, *Load following of Small Modular Reactors (PRM) by cogeneration of hydrogen: A techno-economic analysis*, « Energy », vol. 148, pp. 494-505, avril 2018, doi : 10.1016/j.energy.2018.01.041.
- [92] D. Lee, *B&W mPowerTM program*, présenté à l'atelier IAEA SMR Technology, Vienne, Autriche, décembre 2011, [En ligne]. Disponible à l'adresse suivante : [http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloads/Technology/meetings/2011-Dec-5-9-WS-PRM/Day-2/14\\_USA\\_Lee\\_mPower\\_PRMDec2011.pdf](http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloads/Technology/meetings/2011-Dec-5-9-WS-PRM/Day-2/14_USA_Lee_mPower_PRMDec2011.pdf).
- [93] J. Surina et M. McGough, *The NuScale value proposition: Simple, safe, economic*, présentée au Platts, hôtel Mandarin Oriental, Washington, DC, 18 février 2015, consulté le : 27 mars 2019. [En ligne]. Disponible à l'adresse suivante : [https://newsroom.nuscalepower.com/sites/nuscalepower.newshq.businesswire.com/files/doc\\_library/file/Surina-McGough-NuScale-Platts-2015.pdf](https://newsroom.nuscalepower.com/sites/nuscalepower.newshq.businesswire.com/files/doc_library/file/Surina-McGough-NuScale-Platts-2015.pdf).
- [94] D. T. Ingersoll, C. Colbert, Z. Houghton, R. Snuggerud, J. W. Gaston et M. Empey, *Can nuclear power and renewables be friends?*, présenté au Congrès international 2015 sur les progrès des centrales nucléaires, Nice, France, mai 2015, consulté le : 20 avril 2020. [En ligne]. Disponible à l'adresse suivante : <https://www.nuscalepower.com/-/media/Nuscale/Files/Technology/Technical-Publications/can-nuclear-power-and-renewables-be-friends.ashx?la=en&hash=2A0EB3B5CA22BF25F90FF16BA060835A0B2DFDF2>.
- [95] AEN, *Technical and economic aspects of load following with nuclear power plants*, Agence pour l'énergie nucléaire, OCDE et Agence internationale de l'énergie atomique, Paris, 2011.
- [96] J. Persson et coll., *Additional costs for load-following nuclear power plants: Experiences from Swedish, Finnish, German, and French nuclear power plants*, Elforsk, Stockholm, Rapport 12.71, 2012.
- [97] S. Kim, Y.-D. Hwang, T. Konishi et H. Hastowo, *A preliminary economic feasibility assessment of nuclear desalination in Madura Island*, « Int. J. Nucl. Desalination », vol. 1, n° 4, pp. 466-476, 2005, doi : 10.1504/IJND.2005.007017.
- [98] G. Locatelli, S. Boarin, F. Pellegrino et M. E. Ricotti, *Load following with Small Modular Reactors (PRM): A real options analysis*, « Energy », vol. 80, pp. 41-54, février 2015, doi : 10.1016/j.energy.2014.11.040.
- [99] D. T. Ingersoll, Z. J. Houghton, R. Bromm et C. Desportes, *NuScale small modular reactor for Co-generation of electricity and water*, « Desalination », vol. 340, pp. 84-93, mai 2014, doi : 10.1016/j.desal.2014.02.023.
- [100] X. Yan et coll., *A small modular reactor design for multiple energy applications: HTR50S*, « Nucl. Eng. Technol. », vol. 45, n° 3, pp. 401-414, juin 2013, doi : 10.5516/NET.10.2012.070.
- [101] F. Calise, F. L. Cappiello, R. Vanoli et M. Vicidomini, *Economic assessment of renewable energy systems integrating photovoltaic panels, seawater desalination and water storage*, « Appl. Energy », vol. 253, p. 113575, novembre 2019, doi : 10.1016/j.apenergy.2019.113575.
- [102] A. Alkaisi, R. Mossad et A. Sharifian-Barforoush, *A review of the water desalination systems integrated with renewable energy*, « Energy Procedia », vol. 110, pp. 268-274, mars 2017, doi : 10.1016/j.egypro.2017.03.138.
- [103] T. S. Uyar et D. Beşikci, *Integration of hydrogen energy systems into renewable energy systems for better design of 100% renewable energy communities*, « Int. J. Hydrog. Energy », vol. 42, n° 4, pp. 2453-2456, janvier 2017, doi : 10.1016/j.ijhydene.2016.09.086.
- [104] G. Glenk et S. Reichelstein, *Economics of converting renewable power to hydrogen*, « Nat. Energy », vol. 4, n° 3, art. n° 3, mars 2019, doi : 10.1038/s41560-019-0326-1.
- [105] V. G. Gude, N. Nirmalakhandan et S. Deng, *Desalination using solar energy: Towards sustainability*, « Energy », vol. 36, n° 1, pp. 78-85, 2011, doi : 10.1016/j.energy.2010.11.008.
- [106] N. Ghorbani, A. Aghahosseini et C. Breyer, *Assessment of a cost-optimal power system fully based on renewable energy for Iran by 2050 - Achieving zero greenhouse gas emissions and overcoming the water crisis*, « Renew. Energy », vol. 146, p. 125-148, février 2020, doi : 10.1016/j.renene.2019.06.079.
- [107] A. Ahmad et M. V. Ramana, *Too costly to matter: Economics of nuclear power for Saudi Arabia*, « Energy », vol. 69, pp. 682-694, mai 2014, doi : 10.1016/j.energy.2014.03.064.
- [108] A. Cho, *Several U.S. utilities back out of deal to build novel nuclear power plant*, « Science », 4 novembre 2020.
- [109] S. Patel, *Shakeup for 720-mw nuclear PRM project as more cities withdraw participation*, « Power Magazine », 29 octobre 2020.
- [110] M. V. Ramana, *Is nuclear power Utah's future? Red flags raise doubt*, Deseret News, 27 octobre 2020.
- [111] M. V. Ramana et A. Ahmad, *Wishful thinking and real problems: Small modular reactors, planning constraints, and nuclear power in Jordan*, « Energy Policy », vol. 93, pp. 236-245, 2016.
- [112] M. V. Ramana et P. Agyapong, *Thinking big? Ghana, small reactors, and nuclear power*, « Energy Res. Soc. Sci. », vol. 21, pp. 101-113, novembre 2016, doi : 10.1016/j.erss.2016.07.001.
- [113] B. K. Cogswell, N. Siahaan, F. Siera R, M. V. Ramana et R. Tanter, *Nuclear power and small modular reactors in Indonesia: Potential and challenges*, Indonesian Institute for Energy Economics et Nautilus Institute for Security and Sustainability, Jakarta, Indonésie et Berkeley, CA, États-Unis, avril 2017. Consulté le : 29 avril 2017. [En ligne]. Disponible à l'adresse suivante : <http://liu.arts.ubc.ca/wp-content/uploads/2015/12/IEE-Nautilus-PRM-Report-Final-For-Publication-April2017.pdf>.
- [114] S. Froese, N. C. Kunz et M. V. Ramana, *Too small to be viable? The potential market for small modular reactors in mining and remote communities in Canada*, « Energy Policy », vol. 144, p. 111587, 2020, doi : 10.1016/j.enpol.2020.111587.

- [115] AIEA, *Status of small reactor designs without on-site refuelling*, Agence internationale de l'énergie atomique, Vienne, Nuclear Energy Series IAEA-TECDOC-1536, 2007 [TRADUCTION].
- [116] Economist, *A new dawn for nuclear power?*, The Economist, 17 mai 2001 [TRADUCTION].
- [117] A. Glaser, L. B. Hopkins et M. V. Ramana, *Resource requirements and proliferation risks associated with small modular reactors*, « Nucl. Technol. », vol. 184, pp. 121-129, 2013.
- [118] H. Feiveson, Z. Mian, M. V. Ramana et F. Von Hippel, *Managing spent fuel from nuclear power reactors: Experience and lessons from around the world*, International Panel on Fissile Materials, Princeton, 2011.
- [119] L. Krall et A. MacFarlane, *Burning waste or playing with fire? Waste management considerations for non-traditional reactors*, « Bulletin of the Atomic Scientists », 31 août 2018.
- [120] M. V. Ramana et F. Von Hippel, *Plutonium separation in nuclear power programs: Status, problems, and prospects of civilian reprocessing around the world*, International Panel on Fissile Materials, Princeton, 2015. Consulté le : 16 janvier 2017. [En ligne]. Disponible à l'adresse suivante : <http://fissilematerials.org/library/rr14.pdf>.
- [121] M. V. Ramana, *Technical and social problems of nuclear waste*, « Wiley Interdiscip. Rev. Energy Environ. », vol. 7, n° 4, p. e289, août 2018, doi : 10.1002/wene.289.
- [122] M. V. Ramana et Z. Mian, *One size doesn't fit all: Social priorities and technical conflicts for small modular reactors*, « Energy Res. Soc. Sci. », vol. 2, pp. 115-124, juin 2014, doi : 10.1016/j.erss.2014.04.015.
- [123] F. Boyse, A. Causevic, E. Duwe et M. Orthofer, *Sunshine for mines: Implementing renewable energy for off-grid operations*, Carbon War Room et The Johns Hopkins University School of Advanced International Studies, Washington, D. C., 2014. Consulté le : 21 février 2021. [En ligne]. Disponible à l'adresse suivante : [https://rmi.org/wp-content/uploads/2017/04/CWR14\\_MinesReport\\_singles.pdf](https://rmi.org/wp-content/uploads/2017/04/CWR14_MinesReport_singles.pdf).
- [124] Société d'énergie TUGLIQ, *Projet pilote de démonstration de réseau intelligent d'électricité renouvelable à la mine RAGLAN Glencore*, Initiative écoÉNERGIE sur l'innovation, Nunavik, Nord du Québec, 2016. Consulté le : 28 décembre 2019. [En ligne]. Disponible à l'adresse suivante : <https://tugliq.com/wp-content/uploads/2019/09/2016-11-11-tugliq-raglan-public-report-fr.pdf>.
- [125] RNCAN, *Étude initiale d'ingénierie et de conception : projet pilote de démonstration d'un micro-réseau et d'un réseau intelligent d'électricité renouvelable Raglan de Xstrata Nickel*, Ressources naturelles Canada, 15 août 2018. <https://www.nrcan.gc.ca/energy/funding/current-funding-programs/eii/16152> (consulté le 1<sup>er</sup> juin 2019).