

Les SMR : le nouveau mirage de l'industrie nucléaire

Enquête sur les petits réacteurs nucléaires SMR

mars 2024

Auteur: Antoine Bonduelle, E&E Consultant 

Contact : contact@ee-consultant.fr

Site: www.ee-consultant.fr

E&E Consultant SARL, bureau d'études énergie et environnement
SARL au CAPITAL SOCIAL de 60000€ - SIRET 484 599 014 00012 - RCS Dunkerque - TVA FR 48484599014

Résumé en français

Les petits réacteurs modulaires SMR font l'objet d'un engouement médiatique peu en rapport avec leur réalité ou même leurs perspectives. Ils symbolisent **l'espoir d'une relance du nucléaire** sur de nouvelles bases. Ils renouent pour cela avec des concepts abandonnés depuis la guerre froide il y a soixante ans.

(1) La grande majorité des projets proposés sont aujourd'hui **à l'état d'esquisse**, à l'exception de quatre prototypes en Chine et en Russie. Le rapport propose une typologie des projets de réacteur, avec tout d'abord les réacteurs à eau, proches des équipements utilisés dans les sous-marins, mais aussi des systèmes au gaz, au métal liquide ou aux sels fondus, tous encore à développer. (2) Les SMR sont proposés pour remédier aux **coûts élevés et aux retards** des grands réacteurs nucléaires. En réalité, leur coût initial de développement puis de construction est très élevé. Un abaissement de ces coûts par un effet de série est illusoire. Construire un petit réacteur nucléaire reste **un projet lié au site, et pas un produit industriel de série**. Pour développer des prototypes de SMR, les financements envisagés en France et dans le monde se comptent en milliards d'Euros. Mais ces sommes ne représenteraient qu'une fraction de l'investissement nécessaire pour les rendre compétitifs à long terme.

(3) Tant aux Etats-Unis qu'en France, les promoteurs des petits réacteurs SMR visent à **limiter les exigences réglementaires** contre les menaces internes (sûreté) ou externe (sécurité). Cet allègement pour la conception ou pour l'exploitation de réacteurs n'est pas justifié. En particulier, le risque de malveillance voire de terrorisme est loin d'être levé.

(4) Les SMR représentent un **risque accru de prolifération nucléaire**. La diffusion des technologies et des matériaux permettant la fabrication de bombes atomiques est multipliée dans l'hypothèse de leur déploiement large. Le fragile régime international protégeant le monde contre ce risque serait menacé par leur multiplication, et encore davantage si l'on implique **des petites entreprises start-up**. Des modèles commerciaux de vente de réacteurs nucléaires qui sous-traiteraient les combustibles et les déchets ajouteraient des risques. Enfin, la **surgénération**, proposée pour certains projets, représente des risques spécifiques.

(5) Les **accidents graves** provoqués par l'arrêt de l'alimentation en eau du cœur du réacteur ne sont toujours pas exclus. La taille de la chaudière nucléaire limite son inertie thermique en cas d'accident. Mais les équipements restent d'importance comparable, par exemple, au plus petit réacteur impliqué dans la catastrophe de Fukushima. Les autres projets de SMR, qui ne sont pas basés sur un circuit d'eau, **ne sont décrits que sommairement**. Leurs matériaux et leurs sous-systèmes n'ont pas été démontrés, voire n'ont pas encore été inventés. Pour autant, leur niveau d'irradiation, les contraintes thermiques et mécaniques, les risques de corrosion et

d'érosion suggèrent des risques très importants pour les transports, l'exploitation ou encore les démantèlements.

(6) Les petits réacteurs SMR demandent pour leur construction et leur fonctionnement **plus de matériaux de construction et d'ensembles métalliques** qu'un grand réacteur pour une production donnée. La géométrie même des réacteurs explique ces besoins plus importants.. La petite taille de la chaudière induit aussi une répartition des flux de neutrons moins optimale. La **consommation de combustible** nucléaire et la **production de déchets d'irradiation** sont nettement accrues.

(7) Le **marché potentiel** des SMR est très limité. Il représente lui-même une fraction du marché mondial du nucléaire. Les projets SMR proposés par les Etats-Unis, la France ou la Grande-Bretagne sont bien trop gros pour des sites isolés ou des îles. Ils ne peuvent pas remplacer à temps les centrales à charbon dans le cadre de la transition climatique. Les systèmes proposés pour alimenter directement des industries lourdes sont **hors-jeu économiquement** ; leur cadre légal ou assurantiel est inextricable. De même, l'utilisation du SMR pour produire de l'hydrogène se heurte à une réalité économique implacable face aux concurrents renouvelables et nucléaire. Enfin, les projets destinés à des sites miniers isolés ou l'exploitation d'hydrocarbures sont peu nombreux et liés à la prolongation de l'usage des énergies fossiles. Le développement de projets nucléaires industriels par des start-up se heurte aux contraintes induites par les risques spécifiques du nucléaire. Le **cycle de l'innovation, du développement et de l'industrialisation** de nouveaux réacteurs **prend des décennies**. Il ne s'agit pas d'une contrainte bureaucratique mais bien d'une **donnée intrinsèque du secteur nucléaire**, liée à ses risques.

(8) Le SMR procède aussi d'un dessein de **pérennisation de l'industrie nucléaire**. Les petits réacteurs ne sont pas stratégiques pour la relance du nucléaire souhaitée par le gouvernement français. Ils présentent un faible intérêt pour les industries françaises des réseaux électriques, du nucléaire ou des renouvelables. Celles-ci font face à des défis bien plus importants et urgents de financement et de recrutement. Les subventions au petit nucléaire SMR servent en réalité à pérenniser la position et le financement du Commissariat à l'Energie Atomique, et à financer les motoristes navals militaires.

(9) Le calendrier des petits réacteurs SMR, les placerait bien au-delà des échéances de la crise climatique, même si toutes leurs difficultés étaient levées. Ils sont donc hors-jeu et **ne constituent pas une option de décarbonisation**.

Abstract in English

Small Modular Reactors (SMRs) have been a focus of much media attention. The buzz for SMRs has little relation to their reality or potential. They symbolize the **hope of a revival of the nuclear industry**. They are reviving concepts that were abandoned for good reasons sixty years ago.

(1) The vast majority of the proposed projects are currently in an **early phase** of development, with the exception of four prototypes in China and Russia. The report proposes a typology of reactor projects, first of all water reactors, close to the equipment used in submarines, but also gas, liquid metal or molten salt systems, all of which need to be developed.

(2) SMRs are meant to address the **high costs and delays** of large nuclear reactors. In reality, their initial cost of development and construction is quite high. Lowering these costs by scale effects is illusory. Building a small nuclear reactor remains a **site-related project, not a mass-produced industrial** equipment. To develop SMR prototypes, the financing envisaged in France and worldwide is in billions of Euros. But these amounts would represent only a fraction of the investment needed to make them competitive in the long run.

(3) In both the United States and France, proponents of small SMR reactors aim **to limit regulatory requirements** against internal (safety) or external (security) threats. This relief for reactor design or operation is not justified. In particular, the threat of foul play or even terrorism is far from overcome.

(4) SMRs would bring **an increased risk of nuclear proliferation**. The diffusion of technologies and materials for the manufacture of atomic bombs is multiplied with the dispersion of sites. The fragile international regime protecting the world from this risk would be threatened by their multiplication, and even more so if we involve **small start-up companies**. Commercial models of nuclear reactor sales with offshoring of fuel and waste management are problematic. Finally, the **breeder generation** proposed for some projects, represents specific risks.

(5) **Serious accidents** caused by reactor core water supply shutdown are still not excluded. The size of the nuclear boiler limits its thermal inertia in the event of an accident. But the size of these reactors is comparable, for example, to the smallest reactor in the Fukushima accident. The other SMR projects, which are not based on a water circuit, are still **described only briefly**. Their materials and subsystems have not been demonstrated or even invented. However, their potential vulnerability to irradiation, thermal and mechanical stresses, the risks of corrosion and erosion suggest very significant risks for transport, operation or dismantling.

(6) Small SMR reactors require **more building materials and metals** in the parts and sub-systems for their construction and operation than a large reactor for a given production. The very geometry of the reactors explains these greater needs. The small size of the boiler also induces a less optimal neutron flux distribution. **The consumption of nuclear fuel and the amount of nuclear waste** are significantly increased.

7) The **potential market** for SMRs represents a small fraction of the global nuclear market. The SMR projects proposed by the United States, France or Great Britain are far too big for isolated sites or islands. They cannot replace coal-fired power in time for the necessary climate transition. The SMR systems proposed to directly supply electricity to heavy industries are **not viable economically**; their legal or insurance framework is inextricable. Similarly, the use of SMRs to produce hydrogen has no business case in the light of competition from cheap renewables. Finally, there are only few use cases for isolated sites, mainly related to extraction of fossil fuels (e.g. mining or hydrocarbon exploitation). The development of industrial nuclear projects by start-ups is constrained by the specific risks of nuclear power. The cycle of innovation, development and industrialization of new reactors takes **decades**. The duration is not a simple bureaucratic constraint that can be lifted by political will, but **an intrinsic fact of the nuclear sector**, linked to its specific risks.

(8) The promotion of SMRs aims at the **perpetuation the nuclear industry**. Small reactors are not strategic for the nuclear recovery desired by the French government. They are of little interest to the French electricity, nuclear or renewable industries. They face much more important and urgent funding and recruitment challenges. The subsidies for SMRs are in fact used to perpetuate the position and the public funding of nuclear laboratories and institutions, and in France to finance the development of nuclear naval engines for the military.

(9) The timetable for SMR reactors would put them well beyond the deadlines for decarbonizing our economies, even if all their difficulties were lifted. They are therefore offside and are **not an option for decarbonization**.

Zusammenfassung auf Deutsch

Kleine modulare Reaktoren (SMR) sind Gegenstand eines Medienhypes, der wenig mit ihrer Realität oder auch nur ihren Aussichten zu tun hat. Sie symbolisieren die Hoffnung auf eine Wiederbelebung der Kernenergie auf einer neuen Grundlage. Zu diesem Zweck knüpfen sie an Konzepte an, die seit dem Kalten Krieg vor 60 Jahren aufgegeben wurden.

(1) Die große Mehrheit der vorgeschlagenen Projekte, mit Ausnahme von vier Prototypen in China und Russland, befindet sich aktuell im Entwurfsstadium. Der Bericht schlägt eine Typologie für Reaktorprojekte vor, die zunächst Wasserreaktoren umfasst, die den in U-Booten verwendeten Anlagen nahe kommen, aber auch Gas-, Flüssigmetall- oder Salzschnmelzsysteme berücksichtigt, die noch entwickelt werden müssen.

(2) SMRs werden vorgeschlagen, um den hohen Kosten und Verzögerungen bei großen Kernreaktoren entgegenzuwirken. Tatsächlich sind ihre anfänglichen Kosten für die Entwicklung und den Bau allerdings sehr hoch. Eine Senkung dieser Kosten durch einen Serieneffekt ist illusorisch. Der Bau eines kleinen Kernreaktors bleibt ein standortbezogenes Projekt und kein industrielles Serienprodukt. Für die Entwicklung von SMR-Prototypen werden in Frankreich und weltweit Finanzmittel in Höhe von

mehreren Milliarden Euro erwartet. Diese Summen würden jedoch nur einen Bruchteil der Investitionen ausmachen, die nötig wären, um sie wettbewerbsfähig zu machen.

(3) Sowohl in den Vereinigten Staaten als auch in Frankreich zielen die Befürworter kleiner SMR-Reaktoren darauf ab, die regulatorischen Anforderungen gegen interne und externe Bedrohungen zu begrenzen. Diese Erleichterung für die Entwicklung oder den Betrieb von Reaktoren ist nicht gerechtfertigt. Insbesondere die Gefahr böswilliger Handlungen oder gar die Terrorismusgefahr ist noch lange nicht gebannt.

(4) SMRs stellen ein erhöhtes Risiko der nuklearen Proliferation dar. Die Verbreitung von Technologien und Materialien, die die Herstellung von Atombomben ermöglichen, vervielfacht sich im Falle ihrer Verbreitung. Das fragile internationale System, das die Welt vor diesem Risiko schützt, wäre durch ihre Vermehrung gefährdet, und dies umso mehr, wenn kleine Start-up-Unternehmen involviert wären. Geschäftsmodelle für den Vertrieb von Kernreaktoren ohne Eingreifen des Kunden oder des betreffenden Landes sind problematisch. Schließlich stellt die für bestimmte Projekte vorgeschlagene Nutzung von in Brutreaktoren ein besonderes Risiko dar.

(5) Schwerwiegende Unfälle, die durch die Unterbrechung der Stromversorgung des Reaktorkerns verursacht werden, sind weiterhin nicht ausgeschlossen. Die Größe des Nuklearkessels begrenzt seine thermische Trägheit im Falle eines Unfalls. Aber die Strukturen sind nach wie vor von vergleichbarer Größenordnung wie beispielsweise der kleinste Fukushima-Reaktor. Die anderen SMR-Projekte, die nicht auf einem Wasserkreislauf basieren, werden nur dürftig beschrieben. Ihre Materialien und Subsysteme wurden noch nicht demonstriert bzw. teilweise noch gar nicht erfunden. Aufgrund ihrer Strahlungsintensität, thermischen und mechanischen Einschränkungen sowie Korrosions- und Erosionsrisiken lassen sich jedoch erhebliche Risiken für den Transport, den Betrieb und sogar die Demontage erkennen.

(6) Kleine SMR-Reaktoren erfordern für ihre Konstruktion und ihren Betrieb mehr Baumaterialien und Metallbaugruppen als ein großer Reaktor für eine bestimmte Produktion. Die Geometrie der Reaktoren erklärt diesen größeren Bedarf. Im Fall des französischen NUWARD-Projekts werden diese erhöhten Einheitenanforderungen nicht durch die technische Wahl eines am Kernkern befestigten Titanaustauschers ausgeglichen. Die geringe Größe des Kessels führt auch zu einer weniger optimalen Verteilung der Neutronenflüsse. Der Verbrauch an Kernbrennstoff und die Produktion von Strahlungsabfällen nehmen deutlich zu.

(7) Der potenzielle Markt für SMR ist sehr begrenzt. Er macht nur einen Bruchteil des weltweiten Nuklearmarktes aus. Die von den Vereinigten Staaten, Frankreich oder Großbritannien vorgeschlagenen SMR-Projekte sind viel zu groß für isolierte Standorte oder Inseln. Sie können die Kohleenergie im Rahmen des Klimawandels nicht rechtzeitig ersetzen. Die für die direkte Versorgung der Schwerindustrie vorgeschlagenen Anlagen sind wirtschaftlich nicht vertretbar, und ihr rechtlicher bzw. versicherungstechnischer Rahmen ist unzureichend. Auch die Nutzung von Kernkraftwerken zur Wasserstofferzeugung ist angesichts der Konkurrenz durch erneuerbare und nukleare Energieträger wirtschaftlich nicht vertretbar. Schließlich gibt es nur wenige Projekte für isolierte Bergbaustandorte oder die Nutzung von Kohlenwasserstoffen, und diese hängen mit der Ausweitung der Nutzung fossiler Brennstoffe zusammen. Die Entwicklung industrieller Nuklearprojekte durch

Neugründungen wird durch die spezifischen Risiken der Kernenergie eingeschränkt. Der Zyklus von Innovation, Entwicklung und Industrialisierung neuer Reaktoren dauert Jahrzehnte. Dies ist kein bürokratischer Zwang, sondern eine dem Nuklearsektor innewohnende Tatsache, die mit seinen Risiken zusammenhängt.

(8) Der SMR geht auch von einem versteckten Plan zur Aufrechterhaltung der Atomindustrie aus. Kleine Reaktoren sind für die von der französischen Regierung angestrebte Wiederbelebung der Kernkraft nicht von strategischer Bedeutung. Sie sind für die französische Elektrizitäts-, die Nuklear- und erneuerbaren Energien-Industrie von geringem Interesse. Sie stehen vor viel wichtigeren und dringlicheren Finanzierungs- und Einstellungsproblemen. Die Subventionen für die kleinen Kernkraftwerke werden tatsächlich dazu verwendet, die Position und die Finanzierung des Commissariat à l'Énergie Atomique zu sichern und die militärischen Marinemotoren zu finanzieren.

(9) Der Zeitplan für SMR-Reaktoren würde sie weit über die Fristen der Klimakrise hinausschieben, selbst wenn alle ihre Schwierigkeiten beseitigt würden. Sie stehen daher im Abseits und sind keine Option für die Dekarbonisierung.

Provisoire / Draft

Table des matières

Résumé en français	ii
Abstract in English	iv
Zusammenfassung auf Deutsch	v
Table des matières	1
Introduction	4
Un engouement médiatique important	4
Retour vers le futur.....	4
Une relance inespérée pour reconstruire une nouvelle légitimité	5
1. Les SMR : un vieux mythe	7
1) Qu'est-ce qu'un SMR ?.....	7
2) Quel est l'état de ces projets ?	8
3) Les petits réacteurs à eau et les autres	9
4) Les autres types de SMR dits « avancés »	10
5) Le prétexte de la pénurie en uranium.....	12
Quelques exemples de projets SMR	17
2. Les petits réacteurs : plus chers par kWh et payés par des fonds publics 21	
1) Remédier aux échecs économiques passés des plus grands réacteurs.....	22
2) Une impossible industrialisation à grande échelle des SMR	23
3) Un coût incertain	26
4) Pas d'effet de série pour les SMR.....	27
5) Des coûts récurrents supplémentaires à ne pas négliger	29
6) Des SMR de plus en plus grands pour limiter les coûts	30
7) Des budgets trop réduits pour créer une filière.....	31
8) Des fonds privés limités.....	32
9) Un financement très difficile	33
10) Des projets non bancables.....	34
3. Les SMR : moins de contraintes de sûreté et de sécurité	36
1) Réduction des périmètres de sûreté.....	36
2) Sécurité : diminuer le gardiennage	37
3) Éviter ou retarder les démantèlements	37
4) Le défaut d'assurance accident continue.....	38
5) Un plafond de dommages faible en cas d'accident nucléaire	39



6) Absence de démonstration de la sûreté des SMR en « vraie grandeur »	40
4. Les SMR : un risque accru de prolifération nucléaire	42
1) Le système de non-prolifération actuel va freiner le déploiement des SMR	42
2) Les SMR peuvent menacer ce régime essentiel pour notre sécurité	43
3) Une prestation sans intervention de l'État client est illusoire	44
4) Les SMR ne peuvent pas faire l'objet d'un commerce ordinaire	45
5) Le danger spécifique de la surgénération	46
5. Les SMR : le risque d'accident ne disparaît pas	49
1) La fusion du cœur a des conséquences similaires avec les grands réacteurs	49
2) Des risques très élevés pour les réacteurs dits « avancés »	50
3) Un système de sûreté semi-passif qui ne suffit pas	50
4) Un risque plus élevé dans le cas de multiples réacteurs sur un même site	51
5) Des composants plus compacts mais pas plus sûrs	52
6) Plus de soudures et de points critiques pour les pièces essentielles	52
7) Problèmes d'usure et d'étanchéité	53
8) Le caractère mobile des SMR induit plus de sollicitations mécaniques et augmente les risques	54
9) Risque accru dans les transports pour les matières nucléaires	54
10) Un client « main propre » qui ne peut faire face aux situations accidentelles	55
6. Les SMR : plus de matériaux et plus de déchets	57
1) Des cuves similaires à celles des réacteurs classiques, mais à puissance plus faible	57
2) Davantage de matériaux nécessaires pour le reste de la centrale	59
3) Des proportions en défaveur des SMR pour le génie civil et les dalles de béton	63
4) Besoins en matériaux des autres types de réacteurs	65
5) Quelle résistance des SMR aux neutrons ?	66
6) Une empreinte carbone supérieure à celle des réacteurs plus grands ?	67
7) Géométrie : la fuite des neutrons et ses conséquences	68
8) Des déchets plus dangereux	70
9) Un démantèlement plus difficile	72
10) Des déchets plus difficiles à gérer au niveau international	72
7. Les SMR : une fiction industrielle	74
1) Les SMR ne représenteraient qu'une micro-fraction du mix énergétique mondial	74
2) Des systèmes trop gros pour les sites isolés ou les îles	76
3) Des SMR inadaptés pour les industries grandes consommatrices d'énergie	78
4) Production d'hydrogène : pas d'avenir pour les SMR	81

5) Des très petits réacteurs pour développer ou transformer les hydrocarbures en zone isolée ?	83
6) Les SMR : les illusions perdues des start-up et de milliardaires mal inspirés	85
7) Les SMR ne sont pas pertinents pour remplacer les centrales à charbon	89
8) Pas de marché magique.....	90
9) Un monopole sinon rien ?	91
8. Les SMR : le dessein caché de l'industrie nucléaire	93
1) Les SMR présentent un faible intérêt pour l'industrie française.....	93
2) Bercy participe au discours de soutien en faveur des SMR	97
3) Maintenir à flot le secteur de la recherche française sur le nucléaire	97
4) Pérenniser les motoristes navals militaires.....	99
9. Les SMR : hors sujet face à la crise climatique	101
1) « Trop tard, trop cher, trop risqué, trop incertain »	101
2) Une chronologie qui néglige les inerties et les règles des mises au point industrielles	102
Conclusion	112
Bibliographie.....	113
Principaux rapports et synthèses	113
Documents et références	113
Articles à comité de lecture	114
Acronymes.....	115
Crédits et remerciements.....	117
L'auteur	118



Introduction

Les SMR font la une de l'actualité. Présentés comme la solution miracle pour lutter contre le réchauffement climatique, ils sont surtout une diversion qui tombe à point nommé pour l'industrie nucléaire. Celle-ci cherche à faire oublier sa stagnation, ses surcoûts et ses retards, notamment avec les EPR de Hinkley Point en Grande-Bretagne, de Flamanville en Normandie, ou de Olkiluoto en Finlande. Les responsables de ces échecs sont les mêmes qui défendent aujourd'hui des réacteurs plus petits, qui seraient parés de toutes les vertus absentes des modèles actuels. Loin d'être une solution d'avenir, les SMR s'inspirent d'une collection de prototypes dessinés lors de la guerre froide. Ils présentent de nombreux défauts, mis en lumière par la présente étude.

Un engouement médiatique important

Les petits réacteurs nucléaires modulaires, (en anglais « SMR » pour Small Modular Reactors) font l'objet d'un foisonnement d'annonces et d'affirmations, sur des centaines d'articles et de vidéos. Ces documents sont présentés par des industriels, des influenceurs, des chaînes TV. Pour certains, les petits réacteurs pourraient résoudre les problèmes économiques épineux de l'énergie nucléaire car ils seraient une innovation "fiable, sûre" déployable "sans les coûts importants et la complexité de l'énergie nucléaire traditionnelle".

Nous faisons face à un amalgame d'avantages imaginaires, que l'on retrouve en France par exemple dans un rapport de membres de l'Académie des Sciences expliquant de potentiels retours sur investissement intéressants, une sûreté intrinsèque, une acceptation sociale facilitée, etc. Pourtant ce document conclut que ces réacteurs sont encore loin d'être opérationnels.

De même aux États-Unis, le discours enthousiaste sur les SMR contraste avec la stagnation de l'industrie nucléaire dans ce pays. qui a peu ou prou renoncé à la construction nucléaire à grande échelle. Selon des chercheurs de l'Université Carnegie Mellon, il est peu probable que de nouvelles constructions nucléaires significatives voient le jour aux États-Unis dans un futur proche.

En réalité, la fonction essentielle des SMR, aux États-Unis, comme en Europe est de maintenir le mythe, la flamme d'un secteur nucléaire conquérant qui survivrait, mais surtout prendrait l'ascendant sur les autres énergies.

Retour vers le futur

Le contexte des SMR s'inscrit dans les projections les plus extrêmes, qui visent à remplacer toutes les énergie fossiles par du nucléaire. La boîte à idées est ouverte, nous dit la Société Française de l'Energie Nucléaire, (la SFEN): « le SMR est une idée disruptive par rapport à ce que le secteur a fait jusqu'à présent ».

Ce discours, largement relayé sur internet et les réseaux sociaux, est furieusement daté, avec une vision du nucléaire des années 50 "qui peut tout faire" : production

électrique, mais aussi avion¹, fusée ou satellite. De tous ces mirages, seul le satellite nucléaire a vu le jour, comme le satellite espion (Cosmos 954) qui s'est écrasé en 1978 au Canada, dispersant derrière lui 65kg de déchets radioactifs.

En somme, cette vision du nucléaire nous ramène notamment à la période de la guerre froide, époque des navires à propulsion atomique. Aujourd'hui, environ 250 navires à propulsion nucléaire, de puissances comprises entre 50 et 350 MW, sont encore en fonctionnement. Le nouveau récit occulte l'irresponsabilité passée de ces projets militaires. Ainsi, les cimetières nucléaires de l'Arctique russe comprennent environ 197 sous-marins hors service, encore chargés de combustible nucléaire, selon la fondation norvégienne Bellona². Deux de ces sous-marins sont encore immergés. Les militaires des États-Unis ont aussi leur passif sur les déchets anciens³.

Une relance inespérée pour reconstruire une nouvelle légitimité

Le journaliste Mark Cooper explique dès 2014 ce cycle d'enthousiasme⁴. Il estime que les fournisseurs et les institutions académiques qui étaient les supporters enthousiastes de la "renaissance nucléaire" des années 2000, produisant des estimations optimistes des réacteurs à l'époque, sont les mêmes qui produisent désormais des études extrêmement favorables au SMR. Nous vivons actuellement un cycle d'engouement médiatique⁵ : les vendeurs proposent des coûts bas. Les blogueurs et les lobbies offrent des explications théoriques pour justifier que les SMR seront compétitifs. Les autorités gouvernementales ensuite prennent ces estimations pour justifier des études par des équipes amies de ces technologies.

Le sociologue de Barcelone, Markku Lehtonen⁶ décrit le fonctionnement en boucle des tenants des petits réacteurs lors d'une conférence à Atlanta. Après 50 ans de crise, l'industrie nucléaire veut croire en son renouveau. Cette fois, ce sera différent, estiment les interlocuteurs du chercheur, qui mettent leurs espoirs dans la décarbonation, la guerre en Ukraine, et les petits réacteurs. Selon Lehtonen, les promesses de nouveautés technologiques et le battage médiatique autour de machines - même encore à l'état de plans - fondent une légitimité. Celle-ci va ensuite justifier l'aide financière ou le soutien institutionnel des États.

De telles conférences, sans confrontations ni contradictions, accentuent un problème général du nucléaire : son absence de remise en cause, tant face à des défis techniques, d'organisation ou de relations avec le public. Le nucléaire n'a toujours pas surmonté ces défis douze ans après Fukushima, selon des spécialistes de sécurité

¹ Polmar N (2024) *Atomic Powered Aircraft*. Naval History Magazine [site internet]

<https://www.usni.org/magazines/naval-history-magazine/2024/april/atomic-powered-aircraft>

² Digger C. (2022) *War puts cleanup of Russia's radioactive wrecks on ice*, Bulletin of Nuclear Scientists. <https://thebulletin.org/2022/11/war-puts-cleanup-of-russias-radioactive-wrecks-on-ice/>

³ Mizokami K. (2023) *Trench 94: Everything You Need to Know About the Navy's Nuclear Graveyard* [article de presse] <https://www.popularmechanics.com/military/a46065875/trench-94-naval-reactor-disposal-site/>

⁴ Cooper M. (2014), *The Economic Failure of Nuclear Power and the Development of a Low-Carbon Electricity Future: Why Small Modular Reactors Are Part of the Problem, Not the Solution*, <https://www.nirs.org/wp-content/uploads/reactorwatch/newreactors/cooper>

⁵ The Economist (2021). *This time it is different* [article presse] Magazine The Economist 13 novembre <https://www.economist.com/leaders/2021/11/13/the-discreet-charm-of-nuclear-power>

⁶ Lehtonen M. (2022). *Building promises of small modular reactors – one conference at a time*. Bulletin of the Atomic Scientists. <https://thebulletin.org/2022/12/building-promises-of-small-modular-reactors-one-conference-at-a-time/>

nucléaire de Harvard et du fonds Stanton de la Rand Corporation⁷.L'étude ci-après vise à produire une série d'arguments remettant en cause le bien-fondé des SMR, afin de déconstruire les mythes entretenus par une filière organisée pour se pérenniser.

Provisoire / Draft

⁷ Aditi Verma A. et al (2021). *Nuclear energy, ten years after Fukushima*. Nature Comment. 591, 199-201. <https://www.nature.com/articles/d41586-021-00580-4>



1. Les SMR : un vieux mythe

Bien que l'on parle des Small Modular Reactor (SMR) depuis des décennies, la grande majorité des projets proposés ne sont encore aujourd'hui qu'à l'état d'esquisses. Ce chapitre vous propose un tour d'horizon des projets de SMR à travers le monde.

1) Qu'est-ce qu'un SMR ?

L'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (AIEA-IAEA) recense 83 projets de SMR (Small Modular Reactors) sur 350 pages⁸, presque tous à l'état d'esquisses⁹, avec quelques prototypes en cours de dessin détaillé ou de construction¹⁰. Ces projets se définissent par leur taille, entre cinq et vingt fois plus petite que les centrales nucléaires traditionnelles. Les auteurs distinguent d'une part des réacteurs de taille moyenne¹¹, huit à dix fois plus petits que les centrales classiques (jusqu'à 300 MWe¹² maxi), et de réacteurs encore huit à dix fois plus petits (jusqu'à 30 MWe). Les cycles des chaudières nucléaires et différentes familles de machines sont décrits plus loin. Par définition, les réacteurs nucléaires sont basés sur la fission¹³ d'une masse critique d'éléments lourds fissiles et radioactifs.

Les SMR se distinguent aussi des réacteurs nucléaires classiques par leur aspect modulaire¹⁴. Cela signifie que la partie nucléaire du réacteur a vocation à être posée ou retirée en un ou plusieurs blocs. Ces parties sont transportées depuis une future usine de fabrication, et conçus pour être assemblées sur le site même à partir de modules fabriqués en usine.

Une partie de ces projets sont assez similaires aux grands réacteurs « classiques » fonctionnant à l'uranium enrichi et à l'eau. Mais pour les autres, le cycle nucléaire peut aussi être plus original. Le fonctionnement visé peut être par exemple à très haute température, avec des matières fissiles ou des fluides inflammables à l'air ou à l'eau, ou encore prévoir des

⁸ AIEA (2023) *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments* IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) 2022 Edition https://aris.iaea.org/Publications/SMR_booklet_2022.pdf

⁹ Schneider et al. (2022). *The World Nuclear Industry Status Report 2022*, Résumé en français (WNISR) sur www.worldnuclearreport.org

¹⁰ IAEA (2020) *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments* Agence Internationale de l'Énergie https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf

¹¹ WNA (2023). Small Nuclear Power Reactors. World Nuclear Power Reactors. World Nuclear Association [site internet consulté le 30 octobre 2023] <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>

¹² **MWe : Mégawatt électrique.** 1 MWe correspond à une production de puissance électrique soit 1.000 kiloWatts électriques et un million de fois l'unité de puissance du Système International, le watt (W).

¹³ La **fission** est la cassure des atomes -de l'uranium ou des éléments lourds artificiels- qui se brisent sous le choc de neutrons. Ces neutrons sont des particules sub-atomiques, issus soit de la cassure d'un autre atome lourd, soit émis spontanément par ces éléments radioactifs. Tous ces réacteurs doivent donc pour fonctionner disposer d'une masse minimale de ces éléments lourds, appelée **masse critique**. Leur objectif est de fournir de la chaleur, la plupart du temps pour alimenter une turbine à vapeur et parfois pour fournir de la vapeur à un processus industriel.

¹⁴ Note : L'AIEA nomme **SMR** à l'origine pour « **Small and Medium Reactors** » les projets de petits réacteurs, tandis que l'appellation « **Small Modular Reactor** » se généralise ensuite.



cycles d'utilisation et des matériaux encore à élaborer. On parle alors de « cycles avancés » ou d'AMR pour « Advanced Modular Reactors » (réacteurs modulaires avancés).

Les petits réacteurs nucléaires civils se distinguent aussi des petits réacteurs expérimentaux ou militaires, qui n'ont pas vocation à produire de l'énergie à titre commercial. Ces derniers ont été utilisés notamment depuis la guerre froide, pour la propulsion des sous-marins ou de porte-avions par les puissances détentrices de l'arme nucléaire.

2) Quel est l'état de ces projets ?

Dans le monde, seuls quatre réacteurs existants entrent dans la catégorie SMR, en Russie et en Chine. En Russie il s'agit de deux réacteurs de 35 MWe de puissance, embarqués sur une barge à remorquer depuis un chantier naval. Ces systèmes embarqués sont destinés à alimenter des villes minières dans le Grand-Nord Sibérien. Lancés avec neuf ans de retard, ils avaient en 2021 une performance plutôt médiocre, soit respectivement 45% et 18% de facteur de charge¹⁵ après un an de mise en service.

En Chine, deux petits réacteurs « à haute température » sont formellement en service dans la centrale de Shidao Bay. Leur turbine commune a une puissance nominale de 210 MW électriques¹⁶. Cependant le premier réacteur n'a fonctionné que quelques jours en 2021¹⁷, tandis que son jumeau est en cours de démarrage après cinq ans de retard. Aucune information n'a été donnée pour ces difficultés¹⁸. Un autre réacteur de 100 MWe à eau, plus classique, est en construction depuis 2021 sur l'île de Hainan. Selon l'ouvrage annuel de l'état de l'industrie nucléaire World Nuclear Industry Status Report (WNISR), on peut aussi prendre en compte le pilote chinois de réacteur à neutrons rapides (CEFR pour « China Experimental Fast Reactor ») de puissance 25 MW et de fabrication russe. Il est relié au réseau depuis 12 ans mais n'a plus produit d'énergie après seulement trois jours de mise en service. Peu d'information circule sur ce réacteur expérimental.

Le graphe suivant présente l'état des projets (source AIE 2022¹⁹)

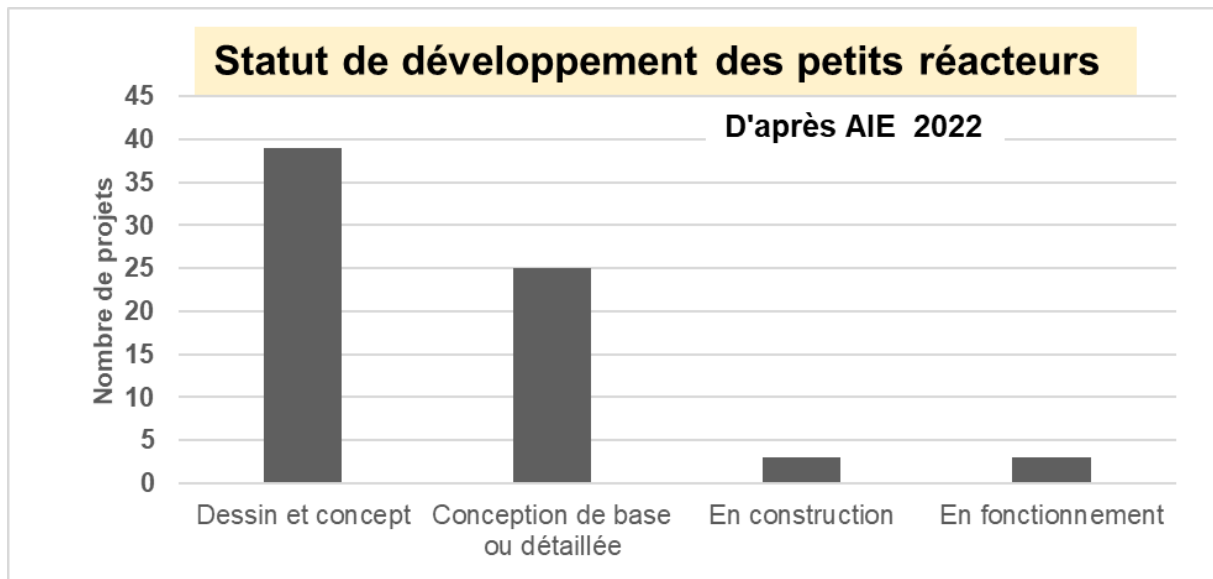
¹⁵ Note : le **facteur de charge**, également appelé **facteur de capacité**, correspond à l'énergie produite par un réacteur divisée par l'énergie **productible**, c'est-à-dire l'énergie que le réacteur produite s'il fonctionnait à sa puissance nominale (puissance de référence d'une tranche) pendant toute l'année.

¹⁶ WNN (2023) *China's demonstration HTR-PM enters commercial operation*, World Nuclear News (WNN) [article de presse] <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Chinese-HTR-PM-Demo-begins-commercial-operation>

¹⁷ AIEA (2023), *Power Reactors Information System 2022* Agence Internationale de l'Energie Atomique (p. 957 et 1111) <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/ReactorDetails.aspx?current=957>

¹⁸ Schneider M. et al. (2022). *The World Nuclear Industry Status Report 2022*, Résumé en français (WNISR) www.worldnuclearreport.org

¹⁹ IEA (2022) *Global number of small modular reactor projects by status of development, 2022*, Agence Internationale de l'Energie <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-number-of-small-modular-reactor-projects-by-status-of-development-2022>



3) Les petits réacteurs à eau et les autres

Les projets de petits réacteurs à eau pressurisée (REP) ou « PWR » (Pressurized Water Reactor), ressemblent à ceux des centrales françaises d'EDF en plus petit et en plus compact. Une variante plus simple est le réacteur à eau bouillante « BWR » (Boiling Water Reactor), qui n'a pas besoin de générateur de vapeur. Dans ces centrales, la *fission nucléaire* est produite par les atomes d'uranium qui éjectent des neutrons en se fissionnant.

Les petits réacteurs à eau fonctionnent ainsi de façon très similaire à celle des centrales actuelles. L'eau y joue un rôle de modérateur pour ralentir les neutrons libérés lors de la fission nucléaire. Ceux-ci sont trop énergétiques pour provoquer efficacement une nouvelle fission²⁰. L'eau est aussi le vecteur de transfert de la chaleur vers les circuits secondaires et les turbines à vapeur. L'eau radioactive du circuit primaire absorbe et transmet cette énergie via un échangeur ou un générateur de vapeur à un circuit secondaire (là aussi de l'eau). Celui-ci fait tourner une turbine à vapeur et une génératrice qui produisent l'électricité. Ce principe n'a pas changé depuis le moteur du sous-marin nucléaire Nautilus, lancé par l'US Navy en 1954.

Les petits réacteurs à eau ont quelques caractéristiques spécifiques par rapport aux grands réacteurs. Par exemple ils peuvent être immergés dans une piscine, ou bien utiliser pour partie une circulation naturelle par thermosiphon²¹ pour donner au réacteur une plus grande résistance à l'accident.

Par ailleurs, le petit réacteur ne peut pas être une simple réduction homothétique²² des dimensions du réacteur. Quatre paramètres sont en effet influencés par la taille d'un réacteur :

²⁰ CEA (2016) *Les réacteurs nucléaires* [site internet]

<https://www.cea.fr/comprendre/Pages/energies/nucleaire/fonctionnement-reacteur-nucleaire.aspx?Type=Chapitre&numero=2>

²¹ Note : Le principe du **thermosiphon** permet la circulation de l'eau dans un circuit par le simple effet de la dilatation thermique. En quelque sorte, l'eau chaude va surnager, l'eau plus froide va s'enfoncer, et entraîner ainsi l'eau du circuit sans l'action d'une pompe.

²² **Homothétique** signifie que l'on ne peut pas réaliser une simple transformation à proportions et angles identiques.

- 1) Il faut que la disposition du combustible respecte une géométrie précise pour assurer au combustible nucléaire un fonctionnement critique en permanence.
- 2) La chaleur est produite dans un volume de combustible, mais doit être transférée par une surface d'échange thermique : ces deux grandeurs ne conservent pas leur proportion si on change la taille du réacteur.
- 3) L'émission de chaleur de la réaction va se poursuivre longtemps après l'arrêt du réacteur, là aussi de façon différenciée selon la taille. Enfin, la concentration des radiations suivant la géométrie et le type de combustible va influencer la production des déchets.

Même avec ces spécificités, les choix de réacteurs à eau pressurisée ou bouillante correspondent à une stratégie « prête rapidement »²³. L'équipe Andlinger de l'Université Princeton nomme ces projets « prêts à construire »²⁴ : ils relèvent d'un développement technique lourd et d'une complexité d'autorisation, mais ils n'ont pas de barrière fondamentale en recherche. Cette stratégie vise mettre au point un ou des prototypes en une décennie, bien plus vite que pour les autres types de petits réacteurs.

Ces réacteurs inspirés des cycles existants comprennent les projets les plus avancés de petits réacteurs en France, au Royaume-Uni, et même aux États-Unis. Ils utilisent le plus souvent de l'uranium enrichi à moins de 5%²⁵.

4) Les autres types de SMR dits « avancés »

Ces réacteurs, dits aussi de Génération IV²⁶, font appel à des combustibles différents et moins maîtrisés, et même parfois à des matériaux anti-corrosion encore inexistantes. On en trouve en particulier de quatre types²⁷ :

- 1) **Les réacteurs à neutrons rapides.** Ils fonctionnent à moindre pression que les réacteurs à eau, autour de 600°C. Malgré l'investissement important consenti par le passé, comme en France les réacteurs Phénix et Superphénix à Malville (Isère), ces réacteurs n'ont pas souvent bien fonctionné. Ils risquent notamment des fuites de sodium fondu, un produit inflammable à l'air et explosif au contact avec l'eau. De plus il faut que le liquide soit toujours assez chaud même à l'arrêt du réacteur. Trois variantes sont envisagées :
 - **GFR** (Gas-cooled Fast Reactor), réacteur à neutrons rapides refroidi au gaz
 - **SFR** (Sodium-cooled Fast Reactor), réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium

²³ Glaser et al. (2015) *Family 1: Ready to Build*, Andlinger Technology Distillates <https://acee.princeton.edu/distillates/small-modular-reactors/>

²⁴ Glaser et al. (2015) *Families of Small Modular Reactors : Succeeding the Second Time Around* Andlinger Center Princeton. <https://acee.princeton.edu/distillates/small-modular-reactors/#families>

²⁵ ARIS-AIEA (2020). *Status Report – NuScale SMR* (NuScale Power LLC) (pp.3-6). https://aris.iaea.org/PDF/NuScale-NPM200_2020.pdf

²⁶ Connaissance des Energie (2020) *Réacteurs de 4^{ème} génération*. Fiches pédagogiques (consulté le 20 mai 2023) (<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/reacteurs-de-4e-generation>)

²⁷ Buongiorno J. et al.(2018) *The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World*, an interdisciplinary MIT study.(fig.3.2 p.63) <https://energy.mit.edu/research/future-nuclear-energy-carbon-constrained-world/>

- **LFR** (Lead-cooled fast Reactor), réacteur à neutrons rapides refroidi au plomb
- 2) **Les réacteurs à haute et très haute température (HTR)** pour High Temperature Reactor). Le combustible est utilisé sous forme de boulets ou de cylindres entourés d'une gangue de produits très résistants et ignifuges à base céramique. L'énergie des neutrons est modulée par du graphite. L'énergie produite entre 700 et 950°C est évacuée par un gaz comme de l'hélium.
 - 3) **Les réacteurs à eau supercritique (SCWR)** pour « Supercritical Water-cooled Reactor ». Ici, l'utilisation de l'eau supercritique (>221 bars, > 374°C) dans laquelle vapeur et liquide sont indissociables vise à pousser les rendements des réacteurs au-delà des 30% actuels.
 - 4) Enfin, dans **les réacteurs à sels fondus** (MSR pour « Molten Salts Reactors ») le combustible n'est pas conservé dans le cœur lui-même. Il est dissous dans le liquide chaud et corrosif circulant dans le système. Ce mélange transmet la chaleur à un circuit secondaire et à une turbine. La température serait de 600 à 850°C ce qui pose ici aussi des problèmes redoutables de résistance des matériaux²⁸. Le mélange de combustible nucléaire avec des produits chimiques fluorés ou chlorés est très agressif. Il doit être traité en continu pour éliminer des produits de la fission comme les actinides²⁹. Ceux-ci sont nocifs à terme pour la réaction nucléaire. Ils peuvent être insolubles dans le mélange. Ce système a pour intérêt de viser une production faible de déchets lourds à longue durée de vie, voire d'en éliminer. Il combine cependant un fonctionnement neutronique innovant avec une installation chimique de purification en continu. Du point de vue de la sûreté, une fusion du cœur du réacteur serait moins probable car en cas d'avarie et de surchauffe, le combustible (liquide) s'échapperait du cœur pour limiter la réaction nucléaire. Pour cela, des sortes de bouchons sont prévus pour fondre et laisser s'échapper le liquide vers des réservoirs adaptés. Par contre, le risque vient plutôt de la criticité nucléaire des déchets liquides concentrés³⁰. Cela signifie qu'aucune accumulation de liquide ne doit se produire lors des vidanges prévues ou accidentelles, sinon la réaction en chaîne peut s'emballer à nouveau. Un tel accident s'est produit à Tokai-mura au Japon en 1999 : en manipulant des déchets liquides, les opérateurs ont réuni dans un récipient assez de matière fissile pour créer une réaction en chaîne, causant deux morts.

²⁸ IAEA (2023) *Technical Reports Series No. 489, Status of molten salt reactor technology*, AIEA (pp.214-231)https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/STI-DOC-010-489_web.pdf

²⁹ Note : les **actinides** sont des éléments lourds à vie longue comme l'americium, produits dans le réacteur. Ils polluent à terme la réaction nucléaire

³⁰ IRSN (2019) *L'accident de criticité de Tokai-Mura (Japon - 1999)* Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire [fiche sûreté consultée le 20 mai 2023] <https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/surete/laccident-criticite-tokai-mura-japon-1999>



A la poignée de réacteurs en construction ou phase de dessin, il faut ajouter une ribambelle d'esquisses encore dans les cartons ou au stade d'avant-projets. Ainsi, la plupart des réacteurs SMR sont des projets, plus ou moins aboutis et portés par des pays comme le Canada, Royaume-Uni, la Chine...

5) Le prétexte de la pénurie en uranium

La question de la ressource en uranium est un déterminant essentiel du débat sur les filières dites « avancées ». Cet argument est important pour comprendre l'insistance des politiques sur les petits réacteurs, et la confusion qui règne parfois entre ces propositions. Le terme « cycles avancés » suggère en effet qu'il s'agit de s'abstraire de la fourniture d'uranium en le remplaçant par d'autres combustibles. Il est proposé de produire ces combustibles dans le réacteur lui-même par surgénération. En particulier, l'affirmation non étayée d'une « pénurie prochaine de l'uranium » entraînée par le développement effréné du nucléaire épuiserait bientôt les réserves voire les ressources disponibles en uranium.

Selon le rapport interdisciplinaire du MIT sur le nucléaire³¹, à l'aube de l'industrie nucléaire des années 50, les prévisions suggéraient que les stocks d'uranium seraient vite épuisés au niveau mondial. Ce fut la motivation principale pour le développement du surgénérateur -en plus de ses caractéristiques utiles au secteur militaire. Mais le MIT ajoute que cette raison a disparu il y a longtemps, avec de grandes quantités d'uranium découvertes et des perspectives limitées pour l'industrie. On va même de plus en plus chercher à éliminer des déchets plutôt que de produire des quantités supplémentaires de plutonium.

Le raisonnement de la pénurie d'uranium part souvent du fait qu'une relance du nucléaire dans les prochaines décennies serait si importante que les moyens actuels en uranium n'y suffiraient pas. Pourtant, les prévisions les plus optimistes de l'AIEA de Vienne (Agence Internationale de l'Énergie Atomique) dont la mission est de développer l'énergie nucléaire, se limitent à 880 réacteurs dans le monde à l'horizon de 2050. Cette prévision -révisée déjà à la hausse en 2023- est optimiste, car elle suppose que chacun des pays étudiés fasse le plein de réacteurs neufs, et que les réacteurs anciens soient prolongés, également dans toutes les zones concernées. D'autres propositions encore moins réalistes ont été formulées, comme le triplement à terme du parc mondial, promu par la France à la COP-climat de Dubaï en 2023³².

Même dans le cas d'un tel triplement peu probable du parc, les réserves en uranium permettent de voir venir sur une soixantaine d'années avant de passer à des minerais moins riches ou des ressources légèrement plus chères. Le risque de pénurie d'uranium s'est aussi éloigné grâce à de nouveaux gisements (tels que Cigar Lake au

³¹ Buongiorno J. et al.(2018) *The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World, an interdisciplinary MIT study*.(p. 82) <https://energy.mit.edu/research/future-nuclear-energy-carbon-constrained-world/>

³² Inchauspé I. et al.(2023) *A-t-on les moyens de tripler le nucléaire mondial d'ici à 2050* L'Opinion [article de presse] <https://www.lopinion.fr/economie/a-t-on-les-moyens-de-tripler-le-nucleaire-mondial-dici-a-2050>



Canada) et une construction limitée de réacteurs dans le monde depuis trente ans. La projection de référence de BP sur les demandes de combustibles nucléaires est du même ordre que les prévisions AIEA, soit de +14% à +59% d'ici 2050. Cela reste modeste avec moins de 10% de la production électrique mondiale.³³

Combien reste-t-il d'uranium ? L'annuaire des ressources de l'agence nucléaire de l'OCDE³⁴ considère une réserve totale de 10 millions de tonnes d'uranium à bas coût. Les ressources additionnelles « raisonnablement assurées » se montent à 7,3 millions de tonnes et les ressources non conventionnelles à 39 millions de tonnes. La consommation des réacteurs existants s'élève à 60,1 ktU/an mais pourrait, selon l'agence, augmenter à 108 ktU/an à l'horizon de 2050. Il y aurait donc, selon l'agence de l'OCDE, assez de ressources en uranium à coût accessible pour 130 années de consommation. Si l'on considère non pas la réserve à prix limité mais l'ensemble des ressources dites « classiques », ce chiffre dépasse alors 250 ans.

Si l'on intègre les ressources non-conventionnelles, la ressource au sens large assurerait cinq à neuf siècles d'approvisionnement pour le parc nucléaire existant ou projeté. Ces durées sont beaucoup plus élevées que pour d'autres ressources minières, et elles expliquent aussi le peu d'intérêt pour de nouvelles prospections.

Cette disponibilité de la ressource en uranium mondial est niée en France. C'est le seul pays du monde où le plutonium séparé des combustibles usés est considéré comme une matière première pouvant servir à un usage ultérieur. L'argument fallacieux d'une pénurie prochaine d'uranium sert ainsi avant tout à justifier le passage aux réacteurs surgénérateurs fonctionnant au plutonium ou au thorium.

Ces questions de réserves et de ressources d'uranium n'empêchent pas les problèmes liés aux capacités industrielles et à la géopolitique. C'est en particulier le cas pour la France. Selon Bernard Laponche et Jean-Claude Zerbib, la dépendance de la France reste importante vis-à-vis de la Russie, tant pour l'enrichissement de l'uranium, la fabrication du combustible ou le retraitement³⁵. Ainsi, non seulement l'uranium est importé à 100% en France, mais aussi son enrichissement et la fabrication du combustible sont produits à environ 40% à l'étranger.

Des technologies peu matures qui présentent des risques

Cette partie des projets de petits réacteurs inclut la promesse d'une énergie disponible pour des siècles. Ils utiliseraient des combustibles dangereux tels que le plutonium, et reposeraient sur des cycles complexes de retraitement des matières combustibles. Les matériaux nécessaires pour leur construction doivent encore être mis au point pour faire face à des conditions de température ou de radioactivité très supérieures. Ces

³³ BP (2023) *2023 edition of the bp Energy Outlook 2050* [tables consommation nucléaire] <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2023.pdf>

³⁴ OCDE/NEA (2023). *Uranium 2022, Resources, Production and Demand*. Nuclear Energy Agency N°7634. https://read.oecd-ilibrary.org/nuclear-energy/uranium-2022_2c4e111b-en#page6

³⁵ Laponche B. & Zerbib J-C (2023). *La triple dépendance française en combustible nucléaire*. Global Chance. <https://www.global-chance.org/La-triple-dependance-francaise-en-combustible-nucleaire>

divers projets sont plus nombreux³⁶ que les autres SMR proposés, mais ont un horizon encore plus incertain et lointain. Ils peuvent avoir des caractères très différents en termes de température, de fluides utilisés, mais relèvent tous de technologies aujourd'hui inexistantes. Leurs combustibles et les matériaux nécessaires sont plus difficiles encore à mettre au point, notamment à cause des niveaux d'irradiation élevés envisagés³⁷. Sur le papier, certains sont des « incinérateurs » de déchets nucléaires, d'autres sont des « surgénérateurs » dont le fonctionnement augmente au final les quantités de matière fissile. Malgré leur diversité -décrite par ailleurs- ces cycles ont des caractéristiques communes :

- Ils demandent des matériaux spécifiques, souvent encore à mettre au point, tant les irradiations prévues sont importantes (céramiques, alliages spéciaux...).
- Leur horizon de réalisation et d'autorisation est si lointain que leurs créateurs - parfois des start-up privées- sont obligés de bluffer sur le délai de réalisation des prototypes ou d'industrialisation des filières³⁸.
- Ils Ces projets permettent d'énoncer des affirmations, par exemple sur leur coût, les risques d'accident, ou la consommation de combustible, sans risquer d'être contredits à court terme puisque leur horizon est très lointain.

Cette relance des concepts de cycles exotiques restés parfois des décennies dans les cartons ne plaît pas forcément aux spécialistes nucléaires de la NEA, l'Agence Nucléaire de l'OCDE. Selon elle, en termes de coûts, les réacteurs avancés, dits de « génération IV » semblent encore moins compétitifs que les réacteurs nucléaires traditionnels. Ceci est notamment dû à la complexité de ces cycles, au besoin de disposer d'une filière spécifique pour ces réacteurs, et aux procédés de combustibles associés³⁹. Pourtant, le débat sur les petits réacteurs est souvent assimilé à celui sur les « cycles avancés »⁴⁰.

L'exemple du surgénérateur

L'utilisation du plutonium dans un réacteur civil pose plusieurs difficultés majeures : prolifération, retraitement, risque de sécurité, ou encore l'usage de cycles complexes et dangereux tels que celui au sodium fondu du surgénérateur Superphénix (1985-1997). Ce métal liquide utilisé comme caloporteur brûle en effet à l'air et explose en présence d'eau.

³⁶ AIEA (2023) *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments* IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) 2022
Edition https://aris.iaea.org/Publications/SMR_booklet_2022.pdf

³⁷ Buongiorno J. et al.(2018) *The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World, an interdisciplinary MIT study*.(fig.3.2 p.63) <https://energy.mit.edu/research/future-nuclear-energy-carbon-constrained-world/>

³⁸ Naarea Partners (2022) *Naarea poursuit son développement ambitieux* [site internet] (consulté le 30 juillet 2023) <https://www.naarea.fr/fr/france-2030-naarea-accelere-dans-le-nucleaire-durable-et-poursuit-son-developpement-ambitieux>

³⁹ IEA and NEA, (2015), 'Projected Costs of Generating Electricity: [rapport conjoint] <https://webstore.iea.org/projected-costs-of-generating-electricity-2015>

⁴⁰ Green J. (2019) *Small modular reactors: an introduction and an obituary* Nuclear Monitor #872-873. [site consulté le 20 mai 2023] <https://wiseinternational.org/nuclear-monitor/872-873/small-modular-reactors-introduction-and-obituary>

La France a dépensé une cinquantaine de milliards de francs (7,7 Mds€) sur ce réacteur de quatrième génération, selon la Cour des Comptes. Creys-Malville, lancé en 1977, a été démarré en 1985. Près de quarante ans plus tard, le démantèlement se poursuit, il faut neutraliser les milliers de m³ de sodium radioactifs⁴¹. Entre 1985 et 1997 la production du réacteur n'est que de 8 TWh contre 120 TWh de productibles (7% de charge), suite à de nombreux incidents.

Le projet Astrid à Cadarache avait pris la suite pour l'utilisation du sodium et du plutonium⁴². Le projet a été lancé sous Jacques Chirac en 2006. Il a reçu (déjà!) un milliard d'euros sous le quinquennat Sarkozy pour développer un successeur à Superphénix [sodium fondu, plutonium, couverture fertile d'uranium]. Il est abandonné en 2019⁴³. Un tel réacteur est en effet vain faute de besoin même à long terme en combustible nucléaire.

Selon le rapport du MIT de 2018⁴⁴, l'échec du réacteur franco-italien Superphénix durant ses six ans de fonctionnement vient pour partie des difficultés avec les régulateurs, mais aussi et surtout d'incidents techniques à répétition. En particulier, le « sas » de recharge de combustible en continu (« barillet ») n'a pas bien fonctionné. Le combustible baigne dans le sodium liquide du circuit primaire radioactif, opaque et corrosif, ce qui a multiplié la difficulté.

Sur l'utilisation du sodium et l'échec du surgénérateur, le témoignage d'un ancien de la société franco-italienne NERSA, conceptrice de Superphénix, l'Italien Stephano Bueno, détonne. Il est le PDG de la start-up Newcleo, qui promeut son propre petit réacteur. Il se propose de concevoir des réacteurs de 30 MW et de 200 MW fonctionnant au plomb fondu pour éviter les écueils du sodium -et donc de Superphénix- et ses problèmes de sécurité et de compétitivité. Le projet se présente comme héritier des recherches du Forum international Generation IV. Dans une vidéo citée en référence, monsieur Bueno propose de consommer du combustible uranium-plutonium (MOx), et donc de ne pas produire de plutonium. Selon lui, la transmutation -centrale dans le projet de surgénérateur- est devenue son handicap⁴⁵ (« liability ») pour le nucléaire, car « son stockage est très coûteux » alors « qu'aucune filière à neutron rapide ne s'est développée ». Les temps ont changé, estime le PDG de Newcleo. Selon lui, il y a trop de plutonium déjà stocké, par exemple 140 tonnes au Royaume-Uni, issues du retraitement, qu'il faudra enfouir dans quelques décennies. Dans cette même vidéo, Paul Gauthé, un responsable du CEA expose les difficultés

⁴¹ Bergé C. (2005) *Superphénix, déconstruction d'un mythe*. Christine Bergé, La Découverte

⁴² CEA (2012) 4th Generation Sodium-cooled Fast Reactors – The ASTRID Technological Demonstrator <https://www.cea.fr/english/Documents/corporate-publications/4th-generation-sodium-cooled-fast-reactors.pdf>

⁴³ B. Dessus (2019) *Réacteur Astrid, l'effondrement brutal d'un mythe*, Global Chance [site internet] <https://www.global-chance.org/Reacteur-Astrid-l-effondrement-brutal-d-un-mythe#article>

⁴⁴ Buongiorno J. et al. (2018) *The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World, an interdisciplinary MIT study*. (chap.3 p. 59-95) <https://energy.mit.edu/research/future-nuclear-energy-carbon-constrained-world/>

⁴⁵ Faudon V. (2022) *Réacteurs innovants : session 3 Nuwcleo* [Webinaire SFEN] (min. 14'45) <https://www.sfen.org/evenement/reacteurs-innovants-nouveaux-acteurs-nouvelles-technologies-3/>

de la filière plomb et notamment la corrosion et l'abrasion. Mais surtout, il refuse viscéralement que le plutonium devienne formellement un déchet⁴⁶, ce qui illustre bien la position de son organisme dans le débat sur les combustibles. De cette définition du plutonium en tant que « ressource future » dépend en effet l'idée même de « recyclage » à La Hague.

Utiliser des combustibles usés dans les petits réacteurs ?

Les choix de la France gaulliste ont été décrits dans le « "complexe atomique" de Bertrand Goldschmidt⁴⁷, un ancien responsable du CEA et ancien participant du projet Manhattan. Il faut en effet remonter à la position précaire de la France après la seconde guerre mondiale et au traumatisme de la défaite de 1940, décrits par Gabrielle Hecht⁴⁸. Un legs de cette période est le choix spécifiquement français de retraiter les combustibles usés en séparant le plutonium, les actinides et les autres déchets des combustibles usés. Cet héritage vient aussi des contradictions du passé entre EDF et le CEA. Ces deux entités étaient respectivement partisans de la filière REP Westinghouse contre la filière nationale graphite-gaz UNGG, puis par l'échec du surgénérateur. Ces divergences sont arbitrées depuis cinquante ans par l'État via des équilibres coûteux, qui aboutissent à la prolongation des filières au plutonium et au maintien du retraitement des déchets.

Faute de surgénérateur, la France utilise une petite partie du plutonium séparé à La Hague sous forme d'oxydes, appelés MOx. Ces combustibles ne permettent d'utiliser qu'une très faible partie du plutonium séparé, mais ils permettent d'éviter que le plutonium devienne formellement un déchet⁴⁹. La France déclare des stocks très importants de l'ordre de 90 tonnes de plutonium séparé⁵⁰, dont une bonne partie est stockées à La Hague. L'usage du MOx a de nombreuses conséquences sur les déchets à plus longue vie et sur la filière nucléaire française. De plus il n'économise pas vraiment l'uranium⁵¹ et n'aurait de sens qu'à partir d'une fourchette de prix de l'uranium de 750 à 1000\$/kg et même dans ce cas l'économie serait marginale.

Les États-Unis ont abandonné le retraitement dès 1974 en raison des coûts élevés et du risque de prolifération, résumés par exemple par le physicien Richard Garwin⁵². Les Anglais, quant à eux, ont eu de multiples accidents et ont abandonné le retraitement. Enfin, Russes et Chinois ont une structure industrielle très différente, liée à leur appareil militaro-industriel.

⁴⁶ Idem (min.38')

⁴⁷ Goldschmidt B. (1980) *Le complexe atomique*, Persée éditions

⁴⁸ Hecht G. (2009) *The Radiance of France*, Nuclear Power and National Identity after World War II. [seconde édition] MIT Press 2009

⁴⁹ Fuori A. (2018) *Comment la France multiplie les déchets nucléaires à La Hague* [article de presse] <https://reporterre.net/Comment-la-France-multiplie-les-dechets-nucleaires-dangereux>

⁵⁰ AIEA-INFCIRC (2020) *Communication Received from France Concerning Its Policies Regarding the Management of Plutonium*, Agence Internationale de l'Énergie. <https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/documents/infircs/1998/infirc549a5-24.pdf>

⁵¹ Dessus B. (2016) *Nucléaire : même l'avenir n'est plus ce qu'il était...* Alter Eco [article de presse] <https://global-chance.org/Nucleaire-meme-l-avenir-n-est-plus-ce-qu-il-etait>

⁵² Garwin R. (2009) *Reprocessing is not the answer*. The Bulletin of Nuclear Scientists <https://thebulletin.org/2009/08/reprocessing-isnt-the-answer/#post-heading>



Quelques exemples de projets SMR

Les projets de SMR russes

La Russie tient une place à part dans les projets de mini-réacteurs, car c'est elle qui domine la construction de réacteurs dans le monde. Selon le rapport WNISR de 2022⁵³, le constructeur russe Rosatom construit en effet cinq réacteurs en Russie et dix-neuf dans le reste du monde. Cette domination tient en bonne partie aux méthodes de vente russes, nettement moins regardantes que les autres puissances nucléaires sur le régime d'autorisations. À cette sûreté allégée s'ajoutent les livraisons intégrées de combustibles, et même le retrait des déchets nucléaires, et enfin les conditions de crédit pour des pays comme le Bangladesh ou l'Égypte. La Russie se veut aussi championne des petits réacteurs.

L'entreprise d'État Rosatom a ainsi annoncé qu'un réacteur de 200 MW sera construit en Yakoutie, en Extrême-Orient russe, sur le modèle du réacteur déjà en service sur une barge. Ces petits réacteurs correspondent à un effort volontariste de développement minier et pétrolier du grand-Nord, dans des sites où le coût du kWh est d'importance secondaire. Cet effort inclurait des brise-glaces nucléaires et des relais fixes sur les côtes arctiques de la Russie. La Russie développe aussi des réacteurs de type « neutrons rapides », avec le développement d'un pilote fonctionnant au plomb fondu, le BREST-300, pour un coût projeté de 1,4 milliard de dollars. Ce programme pilote, qui inclut deux autres réacteurs de cette famille, au sodium et au plomb-bismuth, aurait déjà une dizaine d'années de retard⁵⁴.

Au final, la Russie est le pays qui construit le plus de centrales nucléaires hors de ses frontières. Ce pays fait même des propositions commerciales concrètes sur des petits réacteurs. Les coûts de ces installations, les engagements financiers des pays clients ainsi que les obligations de Rosatom sur le long terme (maintenance, déchets...) restent très opaques. Il s'agit de plus d'un risque géopolitique car il s'agit parfois de pays sous sanctions comme l'Iran⁵⁵.

L'exemple américain

Les petits réacteurs d'Amérique du Nord ont souvent des noms évocateurs tels que « Terrestrial Energy » (Canada) ou « Ultrasafe » (États-Unis), ou encore le Hitachi/GE BWRX300, dérivé des réacteurs de General Electric à eau bouillante, courants aux États-Unis et au Japon. Examinons deux de ces projets, NuScale, et TerraPower/Natrium :

⁵³ Schneider et al. (2023). *The World Nuclear Industry Status Report 2023, (WNISR) (p.60-61)*
<https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/wnisr2023-v4-hr.pdf>

⁵⁴ Idem (p54-55)

⁵⁵ Idem (p158-159)

NuScale a longtemps été considéré comme le plus avancé, mais ce pilote fonctionnant à eau pressurisée REP a été abandonné à l'automne 2023. Il espérait bénéficier des garanties de financement de sociétés locales publiques de distribution d'électricité dans l'Ouest des États-Unis. Sa particularité est d'avoir soumis aux autorités des plans détaillés, mais de les avoir changés ensuite à plusieurs reprises faute d'aboutir à une économie satisfaisante⁵⁶ La société veut désormais vendre des unités de 77 MW chacune, pièce regroupées par 6 alors qu'à l'origine le projet comprenait 12 réacteurs de 40 MW. Ces petits réacteurs avaient un coût d'investissement très élevé. Ils auraient aussi consommé nettement plus d'uranium que les grands réacteurs par kWh produit.

Un autre exemple, emblématique du SMR aux États-Unis, est porté par la firme **Terra-Power** dont le conseil d'administration est présidé par Bill Gates. Elle compte ou a compté dans ses actionnaires des géants électriques comme Duke Power ou le fonds du milliardaire Warren Buffett. Aucun dossier d'autorisation officielle n'a été déposé et aucun chantier n'a démarré. Le projet consiste en une centrale électrique de 300 MWe, basée sur des neutrons rapides refroidis au sodium fondu à 550°C⁵⁷. La firme ajoute un stockage d'énergie thermique, sous forme d'une réserve de sels fondus (1 GWh). Il s'agit selon le constructeur de faire varier la puissance du réacteur de 30% pendant plusieurs heures de la journée.

Selon ses promoteurs, le réacteur serait un surgénérateur de géométrie particulière. Dans ce schéma, le combustible enrichi en matière fissile au cœur initial du réacteur est entouré par des barres d'uranium appauvri issu de la fabrication et l'enrichissement des combustibles. La transmutation en plutonium de cet uranium permettrait de prolonger le chargement initial du combustible pendant « 40 ou 60 ans ». Les barres irradiées dans la périphérie -et donc enrichies en plutonium- seraient régulièrement déplacées et substituées aux barres initiales, sans avoir à changer ou à retraiter le combustible. Cette proposition de « surgénération sans retraitement » est appelée *Travelling Wave Reactor* (TWR). Elle suppose de maîtriser l'évolution du combustible nucléaire dans les aspects physique, chimique, thermique, mécanique des mélanges d'isotopes irradiés dans la couverture d'uranium ou du thorium, de façon prédictive. Ce procédé est donc lié à une prouesse inédite de simulation numérique, permise par les promesses de ce champ des techniques.

Mais dans ses communications récentes, la société Terra-Power insiste moins sur cet angle. Il semble en effet difficile de démontrer aux autorités -puis à un futur client- une telle maîtrise, sans des expérimentations en vraie grandeur et durant des périodes très longues. Or ces promesses de rupture technologique sont associées dans le projet à l'annonce du lancement rapide d'un pilote opérationnel.

⁵⁶ Penn I. et al. (2023) *Nuclear Energy Project in Idaho Is Canceled* New York Times 8 nov. 2023 <https://www.nytimes.com/2023/11/08/business/energy-environment/nuclear-energy-idaho-nuscale.html>

⁵⁷ Terrapower (2022) *Terrapower Media Coverage* [site internet] (consulté le 20 mai 2023) <https://www.terrapower.com/cnbc-clean-energy-future/>

Terra-Power illustre bien l'objectif de disruption des start-up du nucléaire et leur principale contradiction : d'une part les technologies sont particulièrement innovantes compliquées à mettre au point, alors que le processus d'autorisations demande forcément du temps et de la transparence ; d'autre part, les demandes des investisseurs présents au capital de l'entreprise visent des réalisations rapides, voire le développement des ventes.

Les projets de SMR français

Les projets en lice en France sont basés sur les trois voies de réacteurs à eau, au plutonium-sodium, et à combustibles liquides dissous dans des sels fondus. Une caractéristique de ce bouquet est la domination du Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA), à la fois arbitre des choix techniques et budgétaires, et principal candidat. Comme le présente le Président Macron dans le discours de Belfort⁵⁸ : « Nous avons déjà des start-up qui se lancent [...] Le CEA, qui a joué un rôle décisif dans la naissance de la filière nucléaire française, appuiera et accompagnera la montée en puissance de ces nouveaux acteurs. » Le CEA avait même lancé un appel interne à idées et sélectionné deux pistes sur cinq proposées. Il a donc choisi ses propres start-up éligibles parmi ses équipes⁵⁹, présentées ci-dessous.

Le projet **Hexana** veut développer un réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium, une technologie déjà mise en œuvre dans les années 80 dans les projets Phénix et Superphénix. Le projet consiste à développer une paire de petits réacteurs de 150 MWe chacun, couplés à un réservoir de stockage thermique à base de sels fondus. L'intérêt est de proposer un réacteur très flexible, capable de fournir de l'électricité, mais aussi de stocker et de fournir de la chaleur aux industriels en fonction de leurs besoins. Le combustible serait un dérivé des Mox, un mélange intégrant des combustibles déjà irradiés dans le parc français.

Stellaria propose de son côté un réacteur à sels fondus, également d'une puissance de 150 MWe. Sa géométrie consiste en une cuve de 4 mètres de haut et 2 mètres de diamètre. Ce type de réacteur se veut flexible car il peut monter en puissance très rapidement. Ensuite, il pourrait utiliser différents types de combustibles : de l'uranium de retraitement, de l'uranium enrichi, du Mox, voire du thorium. Pour faire face au problème de la corrosion des circuits du réacteur par les sels fondus très chauds, le projet propose de faire une sorte d'échange standard tous les cinq ans. Selon ses promoteurs, il s'agit d'une technologie moins mature mais sur laquelle le CEA a de l'expérience.

Aramis-CNRS est aussi un réacteur à sels fondus que défendent des laboratoires nucléaires du CNRS, avec le CEA, Framatome et EDF. Aramis produirait 300 MWth, alimentés par des combustibles liquides, mélanges complexes de sels [NaCl, MgCl₂, PuCl₃, AmCl₃, UCl₃ à 800°C]. Le projet s'inscrit dans le cadre d'un prolongement du

⁵⁸ Macron E. (2022) *Reprendre en main notre destin énergétique*. [discours présidentiel] <https://www.elysee.fr/emmanuel-macron/2022/02/10/reprendre-en-main-notre-destin-energetique>

⁵⁹ Raynal J. (2023) *Interview de Laurence Petit (CEA)*, La Tribune, 23 mars 2023 [article de presse]. <https://www.latribune.fr/entreprises-finance/industrie/energie-environnement/c-est-la-premiere-fois-que-le-cea-essaime-des-startups-qui-developpent-des-reacteurs-nucleaires-innovants-laurence-petit-954617.html>

retraitement des combustibles à La Hague. Ses promoteurs imaginent un réacteur du futur plus sûr et ne produisant pas de plutonium. Selon le rapport d'un comité de l'Académie des Sciences⁶⁰ mené par Marc Fontecave, « *il reste cependant plusieurs décennies de recherches pour mettre au point et valider matériaux et technologies employés. Le cas des SMR est particulier car tout est à inventer dans les domaines cités ci-dessus. C'est notamment le cas du traitement du combustible de sels fondus, par fractions ou en continu, pour assurer le fonctionnement des réacteurs. Cela nécessite d'intégrer aux réacteurs des installations de génie chimique, ce qui n'a jamais été fait. Une attention toute particulière devra donc porter sur les problèmes de sûreté de coexistence d'une installation chimique et d'une installation nucléaire.* »

Newcléo, déjà cité plus haut, est un autre des petits réacteurs annoncés en France. C'est un héritier direct du réacteur Superphénix et de la coopération franco-italienne dans la société européenne NERSA. Newcléo propose une sorte de surgénérateur en modèle réduit, basé sur une technologie au plomb⁶¹. Ce groupe est basé à Londres, à Turin et en France. Il annonce l'implantation en France d'un petit réacteur (30 MWe) avant un plus gros (300 MWe). Son objectif serait l'inverse du surgénérateur puisqu'il s'agit d'y brûler du plutonium. Ces réacteurs au plomb ou au bismuth seraient cependant en difficulté vis-à-vis de la corrosion et de l'abrasion des aciers sous l'influence du plomb fondu à 440°C voire à 550°C. L'ancienne Ministre des Armées Florence Parly a été intégrée à son Conseil d'Administration.

Enfin, d'autres projets de petits réacteurs sont proposés par des start-up privées : **Naarea** (réacteur à sels fondus) et **Jimmy** (système de production de chaleur).

⁶⁰ Fontecave M. et al.(2022) *Les réacteurs nucléaires modulaires de faible puissance (SMR)*. Avis et rapport de l'Académie des Sciences (p.15-16). https://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/221020_SMR.pdf

⁶¹ Newcleo (2023) *France 2030 : newcleo lauréat de l'appel à projets « Réacteurs nucléaires innovants »* [communiqué] <https://www.newcleo.com/press-releases/france-2030-newcleo-laureat-de-lappel-a-projets-reacteurs-nucleaires-innovants/>

2. Les petits réacteurs : plus chers par kWh et payés par des fonds publics

Les SMR nous sont présentés comme des réacteurs nucléaires bon marché, mais en réalité, il n'en est rien, tant au regard des coûts de construction par unité de puissance que des coûts de fonctionnement par unité d'énergie produite. Les séries de construction envisagées sont limitées, même à l'échelle mondiale, et ne pourront donc compenser ces forts surcoûts initiaux. Créer et développer une filière de petits réacteurs demanderait des sommes élevées et un soutien public sur la longue durée, sans espoir de rentabilité à terme.

Quel serait le coût réel de l'électricité produite par les petits réacteurs s'ils étaient développés ? Pourraient-ils échapper à l'inflation des coûts qui touche les grands réacteurs nucléaires ?

Le coût d'investissement et d'exploitation des SMR repose sur une série de paramètres déjà connus pour leur difficulté à maîtriser :

- Il doit s'agir de machines construites en série voire en très grande série, sur la base d'un modèle standardisé voire identique.
- Leur marché doit être assez prévisible pour construire et amortir les usines de production des composants.
- Leur génie civil, les turbines, les bâtiments et structures associées doivent être construits dans les délais et de façon fiable.
- Le cycle du combustible et des déchets doit lui aussi être fiable et prévisible, voire proposé "clé en main" aux électriciens.

Ces quatre conditions demandent ainsi une grande confiance de la part des pays clients, de leurs régulateurs voire de leur opinion publique. Plusieurs écueils ont déjà été observés dans les constructions nucléaires classiques, en particulier les défauts génériques coûteux, les changements de dessin ou d'exigence dus aux régulateurs et aux circonstances mondiales, les défauts lors de la construction du génie civil, de l'électromécanique ou de l'îlot nucléaire.

L'industrie nucléaire nous vend ainsi aujourd'hui des SMR qui seraient compétitifs sur le plan économique. Cela proviendrait de leur caractère « différent » des autres grands projets : ils seraient produits en grande série et bénéficieraient des avantages de l'industrialisation. En réalité, ni la construction ni l'exploitation des petits réacteurs ne peuvent égaler les coûts de leurs homologues de grande taille, eux-mêmes désormais largement distancés par les énergies renouvelables électriques.

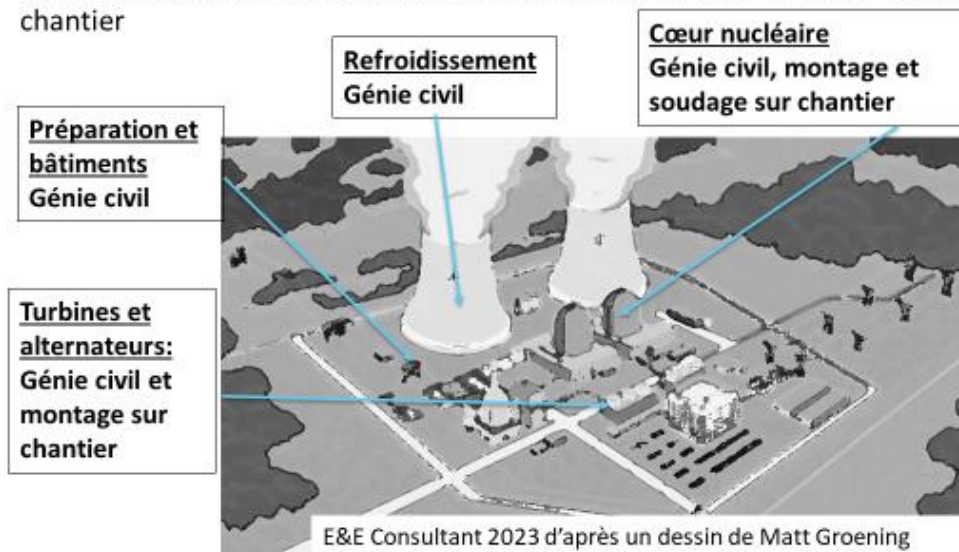
1) Remédier aux échecs économiques passés des plus grands réacteurs

Pour Renaud Crassous, ancien responsable des petits réacteurs chez EDF, désormais président exécutif du projet NUWARD, filiale notamment d'EDF, du CEA et des chantiers navals militaires DCN: « *dans les grandes centrales, nous cherchons à atteindre la compétitivité par des économies d'échelle. Pour les petits réacteurs, la compétitivité réside dans la simplicité du design et dans l'économie de série, où un maximum d'éléments pourront être produits dans les usines, rendant les chantiers très simples à reproduire* »⁶²

Le point de départ de cet argument vient de la crise de la construction des réacteurs neufs, tant en Europe (Flamanville, Hinckley Point, Oilikuto...) qu'aux États-Unis (Floride, Géorgie...). On y observe qu'une grande part de l'inflation provient de l'augmentation des coûts sur le chantier et leur allongement. Dans le monde entier, les retards et les surcoûts du nucléaire ont en effet des origines similaires, avec en premier la part élevée (>50%) de la valeur ajoutée réalisée sur le chantier. La présence de nombreux sous-traitants en cascade aggrave les difficultés et impose des conditions de travail complexes en intempéries, température, transports. Elle demande aussi une coordination particulièrement renforcée qui faisait défaut, selon le rapport Folz, au chantier du réacteur EPR⁶³ de Flamanville.

Schéma des principaux postes de surcoût d'un chantier nucléaire

Chaque partie de la construction représente un **cortège de sous-traitants**, parfois en cascade multiple, dont la **majorité des tâches** sont effectuées sur le chantier



Représentation des principaux postes du chantier nucléaire (E&E Consultant 2023)

La question de la fabrication industrielle des petits réacteurs est au cœur du projet du secteur de sortir le nucléaire de son cycle actuel de dérive des coûts. L'industrie

⁶² Fortin P. (2022) *EDF se lance dans la course aux «mini» réacteurs nucléaires*. Les Echos 27-9-2022 [article de presse] <https://planete.lesechos.fr/solutions/edf-se-lance-dans-la-course-aux-mini-reacteurs-nucleaires-14970/>

⁶³ Folz J-M. (2019) *La construction de l'EPR de Flamanville*. Rapport au PDG d'EDF <https://www.economie.gouv.fr/rapport-epr-flamanville>

nucléaire doit en effet convaincre de sa viabilité, malgré les problèmes de la construction des grands réacteurs de EDF (EPR de Flamanville dans le Cotentin), de AREVA (EPR de Oilokuto en Finlande) ou encore de Westinghouse-Toshiba (AP-1000 de la Centrale Vogtle en Georgie dans le Sud des États-Unis). Ces réacteurs ont connu des délais et des surcoûts similaires. En particulier, leur construction a duré au moins deux fois plus longtemps que prévu.

Le rapport⁶⁴ Folz (du nom de l'ancien PDG de Peugeot) montre le manque considérable d'organisation et la faible prise de responsabilité de EDF dans son chantier EPR de Flamanville. Selon lui, aucun cadre de haut niveau n'était présent à temps plein pour le superviser. Sur le terrain, le groupe « semble avoir ignoré certaines des bonnes pratiques en vigueur dans d'autres secteurs » : pas de gestion prévisionnelle des coûts, pas de « maquette numérique » du projet, pas de planning partagé avec les sous-traitants..... Jean-Martin Folz pointe aussi une « *confusion entre les rôles majeurs dans la gestion d'un projet, maîtrise d'ouvrage et maîtrise d'œuvre, qui sont dans les faits tous les deux assumés par la direction des études d'EDF* ». Ces confusions persistent encore tant dans le projet NUWARD que dans celui de l'EPR2.

De même, les chantiers à rallonge du nucléaire dans le Sud des États-Unis ont eu subi des surcoûts du même ordre que Flamanville. Dans ce pays, les responsables des projets conservent leur travail et leur rémunération quelle que soit l'issue de la construction. Le système de concession privée dans les États du Sud des États-Unis garantit en effet la rentabilité des capitaux investis, et donc le paiement des intérêts sur les chantiers en cours, même inachevés. Ce système nommé Construction Work in Progress (CIWP)⁶⁵ rend furieux les consommateurs censés payer le chantier et même les intérêts de la construction. Comme en France, les États-Unis n'ont mené qu'un seul chantier en vingt-cinq ans. Ce projet de deux réacteurs, Vogtle en Géorgie, a eu des surcoûts de 17 Mds\$, similaires à l'EPR de Flamanville, et un délai supplémentaire de 7 ans⁶⁶. Au final il a coûté 35 Mds\$ pour deux réacteurs. ~~De façon intéressante~~ A noter qu'il était présenté comme le premier réacteur construit par ensembles modulaires⁶⁷, une technique qui aurait dû abaisser le coût mais a conduit le constructeur Westinghouse à la faillite.

2) Une impossible industrialisation à grande échelle des SMR

La promesse de baisse de coûts repose sur toute une série de conditions interdépendantes, comme la confiance des compagnies clientes, des banques ou des financeurs ; un carnet de commandes fourni ; la démonstration de construction dans les délais et sans défauts sur la base d'un équipement de série... Au final, le petit

⁶⁴ Ministère de l'Economie et des Finances (2019). *La construction de l'EPR de Flamanville* <https://www.economie.gouv.fr/rapport-epr-flamanville>

⁶⁵ Schneider et al. (2022) *The Vogtle Debacle*, World Nuclear Industry Status Report 2022 (p.62) <https://eu.boell.org/en/WNISR2022>

⁶⁶ Amy J. (2023) *Georgia nuclear rebirth arrives 7 years late, \$17Bn over cost*, Associated Press [dépeche d'agence] <https://apnews.com/article/georgia-nuclear-power-plant-vogtle-rates-costs-75c7a413cda3935dd551be9115e88a64>

⁶⁷ Note : cette variante de la définition du terme « **modulaire** » correspond à une sorte de construction préfabriquée par des sous-ensembles amenés de l'usine au site de construction.

réacteur est présenté comme une construction respectant devis et délais, en grande série et dans des conditions maîtrisées d'atelier.

Cependant, standardiser et industrialiser un réacteur demande un niveau de coopération élevé entre les pays constructeurs et acheteurs : électriciens, régulateurs, fournisseurs doivent fonctionner en confiance. Un tel réseau de concurrence et de coopération mêlées se retrouve dans la construction aéronautique. Les conditions sont très loin d'être réunies pour le nucléaire. Selon Niel Todreas, professeur de science et d'ingénierie nucléaire au MIT, on est ici au cœur du problème nucléaire et pas seulement de celui des petits réacteurs. Selon lui, c'est le paradoxe de l'œuf et de la poule qui se pose, car l'obtention du financement nécessaire à la construction des centrales nécessitera probablement un grand nombre de commandes. Mais il serait difficile pour une entreprise de les obtenir avant d'être en mesure de produire des réacteurs de manière fiable et bon marché.⁶⁸

En outre, le rapport 2022 de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) sur le nucléaire souligne que la compétitivité de ces réacteurs ne peut être établie qu'à la condition de choisir un nombre limité de dessins ou de modèles. Ce principe est actuellement très loin d'être acquis dans le contexte très souverainiste de la construction nucléaire. Chaque pays veut en effet construire ses propres réacteurs, avec l'espoir de les exporter ensuite.

Pour réussir l'industrialisation des petits réacteurs, plusieurs conditions sont nécessaires. Elles supposent un haut niveau de confiance partagé dans un grand nombre de pays :

- ✓ Une usine de format suffisant pour produire des grandes séries et son pré-financement.
- ✓ Une conception faisant consensus chez les utilisateurs.
- ✓ La confiance des usagers, qui doivent voir une série de réacteurs fonctionner avec succès sur une longue période.
- ✓ Une concurrence mondialisée de fournisseurs sur les principaux composants (cuves, alternateurs, combustibles, commandes électroniques...)
- ✓ Une « file d'attente » de production organisée avec des trains de fabrication et d'approvisionnement sur une longue durée, ce qui suppose des engagements très nombreux et fermes des clients.
- ✓ Un système de pré-financement voire de tiers-exploitants chez les clients, tant pour le combustible et les déchets, que pour le réacteur lui-même
- ✓ Une validation des modèles par les autorités, reconnue voire mutualisée dans la majorité du monde...

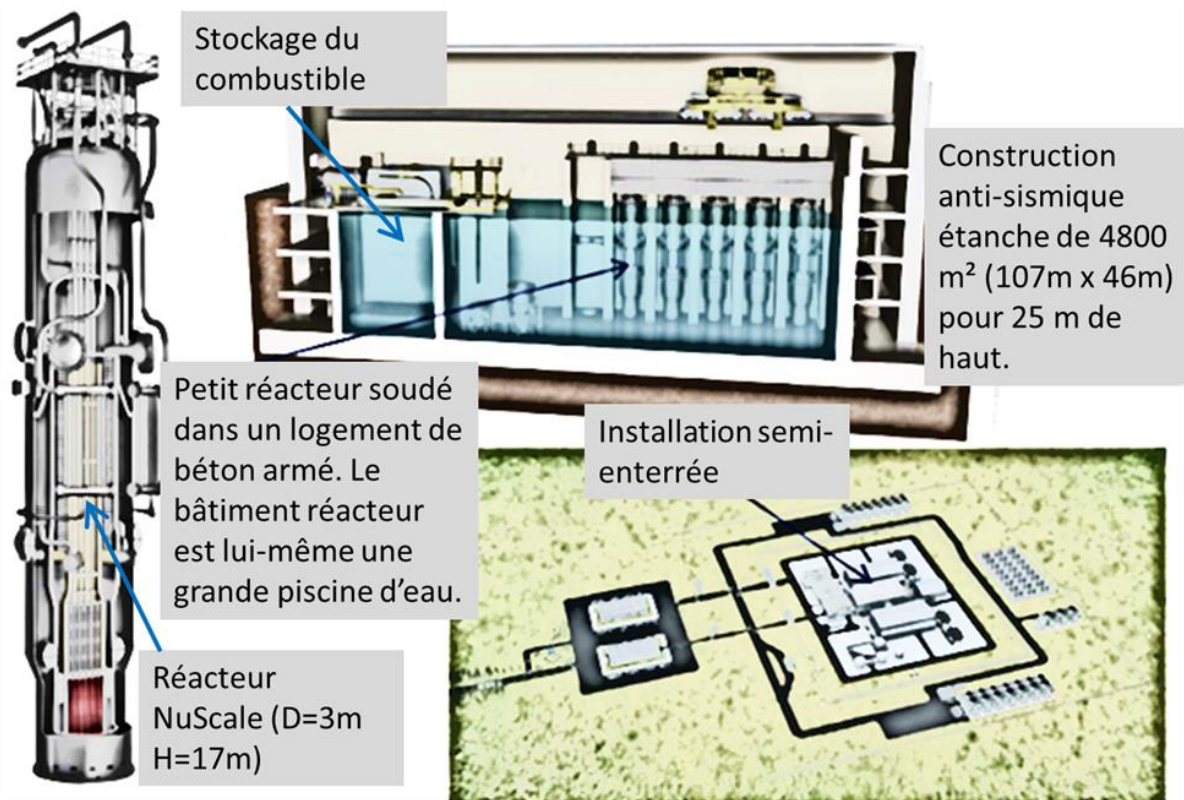
Chacune de ces conditions est très difficile à remplir, dans le contexte de souverainisme affirmé sur le thème nucléaire, et de méfiance des clients. Mais surtout, il est fort peu probable que la production en usine de la partie transportable du réacteur

⁶⁸ James Temple (2017) *Small Reactors Could Kick-Start the Stalled Nuclear Sector* Technology Review, Revue du MIT. <https://www.technologyreview.com/2017/07/17/150446/small-reactors-could-kick-start-the-stalled-nuclear-sector/>

joue sur une part majoritaire de chaque projet. Il s'agit pourtant de la première condition de l'industrialisation.

Les schémas disponibles⁶⁹ sur les réacteurs proposés du NuScale ou par NUWARD nous montrent un bâtiment complexe comprenant d'immenses piscines étanches, intégrées à un ensemble de bâtiments souterrains. Cette partie importante de la construction (schéma ci-dessous), ne peut être réalisée en atelier, même si une part de pré-fabrication est possible⁷⁰. Enfin, l'une des parties les plus critiques de la construction, la dalle nucléaire en bétons spéciaux et fortement armée, doit être réalisée en six mois à un an sur site avec des exigences techniques et temporelles très précises.

Le graphe suivant représente les vues d'ensemble du projet NuScale, selon les documents publiés par le régulateur nucléaire américain :



Vue d'ensemble du projet « NuScale » [abandonné] selon document ARIS/AIEA

Ainsi, la promesse de la transformation d'un « projet unitaire » en « produit standard », proposé entièrement « sur étagère » n'est pas tenable. En effet :

- Tout d'abord, l'infrastructure locale comme le béton antisismique, les bâtiments ou les supports d'infrastructure, les soudures et la liaison avec les turbines représentent encore une part majoritaire de la construction.

⁶⁹Langdon K. (2019) *Nuscale SMR Overview* [video] <https://nucleus.iaea.org/sites/INPRO/df17/IV.5-KenLangdon-NuScale.pdf>

⁷⁰ Ruggieri J.-M. (2022) *Les enjeux des SMR et le projet NuWard*, CEA de la Recherche à l'Industrie (p.6) [présentation] https://jtsfp2022.sciencesconf.org/data/pages/SFP_18_mars_2022_SMR.pdf

- Le refroidissement du réacteur, le cas échéant les installations de récupération de chaleur ou de vapeur, font de cette implantation un projet complexe multi-acteurs dont la chronologie voire l'issue sont incertaines.
- Enfin, les contraintes réglementaires sont considérables pour une installation nucléaire soumise aux impératifs de sûreté vis-à-vis de l'accident, de contrôle des rejets dans le milieu ou des déchets, et aussi des règles sur la prolifération nucléaire.

Le petit réacteur reste donc - comme la centrale nucléaire classique - un projet unitaire : pour son implantation sur un site, pour son refroidissement, ses autorisations, son contexte politique et notamment le régime d'autorisation différent dans chaque pays voire Etat fédéré aux États-Unis. Il ne s'agit pas d'un produit de série.

3) Un coût incertain

Dans un rapport de 2022 sur les coûts des petits réacteurs⁷¹, l'AIE insiste sur le caractère très incertain des coûts affichés pour les premiers exemplaires, qui proviennent avant tout des constructeurs. Selon les auteurs, il faut prendre ces chiffres optimistes avec "une grande précaution". De même, le rapport estime que le "vrai" coût pour une série commerciale ne pourra être évalué qu'après la construction de quelques exemplaires, vu les incertitudes énormes sur les technologies et sur les règles de mise en place.

La fabrication partielle du petit réacteur en atelier grâce à une plus grande compacité des parties nucléaires ne suffit sans doute pas pour inverser les dérives observées sur la construction traditionnelle. La transposition des gains de coût obtenus dans d'autres industries par la construction de très grandes séries est une des promesses que ne peuvent tenir des petits réacteurs. Ceux-ci n'ont pas en effet de perspective d'industrialisation à une échelle suffisante. Pire, l'expérience des États-Unis et de la France a démontré que les coûts peuvent même augmenter sur une longue période malgré le cumul des constructions. Ce phénomène d'apprentissage négatif a été décrit en détail par Arnulf Grübler de l'IIASA de Vienne⁷². Celui-ci part du programme français, selon lui la séquence de construction nucléaire la plus cohérente jamais réalisée, avec notamment la série 900 MW (CP0-1-2) à partir des années 70 puis les séries suivantes P4, P'4 et N4 jusqu'aux années 90. Il s'agit ainsi de la seule expérience complète de passage à la série dans la construction nucléaire. Ce cadre unique de centralisation des décisions et de standardisation, de stabilité réglementaire n'a pas été reproduit ailleurs. Pourtant, les coûts d'investissement du nucléaire français ont connu une inflation élevée, soit un facteur trois sur le coût d'investissement unitaire entre les premières séries et le réacteur N4, construit dans les années 90.

Selon Grübler il s'agit d'une des caractéristiques inhérentes au nucléaire, due à sa taille et à sa complexité. La construction d'usines chimiques connaît des difficultés

⁷¹ AIE-IEA (2022). *Cost-competitiveness is an open question, and SMR costs need to come down substantially* Nuclear Power and Secure Transitions (p.89) <https://iea.blob.core.windows.net/assets/016228e1-42bd-4ca7-bad9-a227c4a40b04/NuclearPowerandSecureEnergyTransitions.pdf>

⁷² Grübler A. (2010), *The costs of the French nuclear scale-up: A case of negative learning by doing* (International Institute for Applied Systems Analysis, A-2361 Laxenburg, Austria) Energy Policy 38 (2010) 5174–5188 <http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/9116/1/IR-09-036.pdf>



similaires. Pour de tels projets, il explique que l'anticipation "déterministe" de baisse des coûts par l'apprentissage est même démentie et s'inverse. Parmi les facteurs identifiés de surcoûts, il recense :

- ✓ Les pénuries de main-d'œuvre qualifiée.
- ✓ Les goulots d'étranglement sur les fournisseurs (en particulier les forges).
- ✓ La structure fragmentée des marchés et des autorités.
- ✓ Le management figé face aux évolutions du marché.
- ✓ Les oppositions et freins politiques ou judiciaires.
- ✓ Le cycle de l'innovation lent (modèle initial Westinghouse 1956).
- ✓ Une validation complexe des innovations et modifications.
- ✓ Une faible mobilité des personnels entre branches, etc.

Ces difficultés identifiées seraient similaires pour des filières projetées de petits réacteurs.

4) Pas d'effet de série pour les SMR

Le petit réacteur vend une promesse d'abaissement des coûts par le passage en série. La production d'un kWh dans un petit réacteur est au départ plus chère. Le SMR a en effet un coût initial deux à quatre fois plus cher pour une production donnée qu'un réacteur, et dix fois plus élevé que les alternatives renouvelables. La promesse des défenseurs du petit réacteur est de le fabriquer en atelier et non sur place, avec aussi une normalisation des concepts et des sous-ensembles, ce qui permettrait d'obtenir des conditions de productivité croissante. Cette fabrication sur une chaîne devrait permettre selon eux la baisse des coûts en fonction des séries produites, contrairement au nucléaire actuel dont les coûts ne baissent pas avec les quantités. L'effet de série permettrait de bénéficier à la fois d'un approvisionnement en quantité importante, de conditions mieux maîtrisées et d'un hypothétique effet de série.

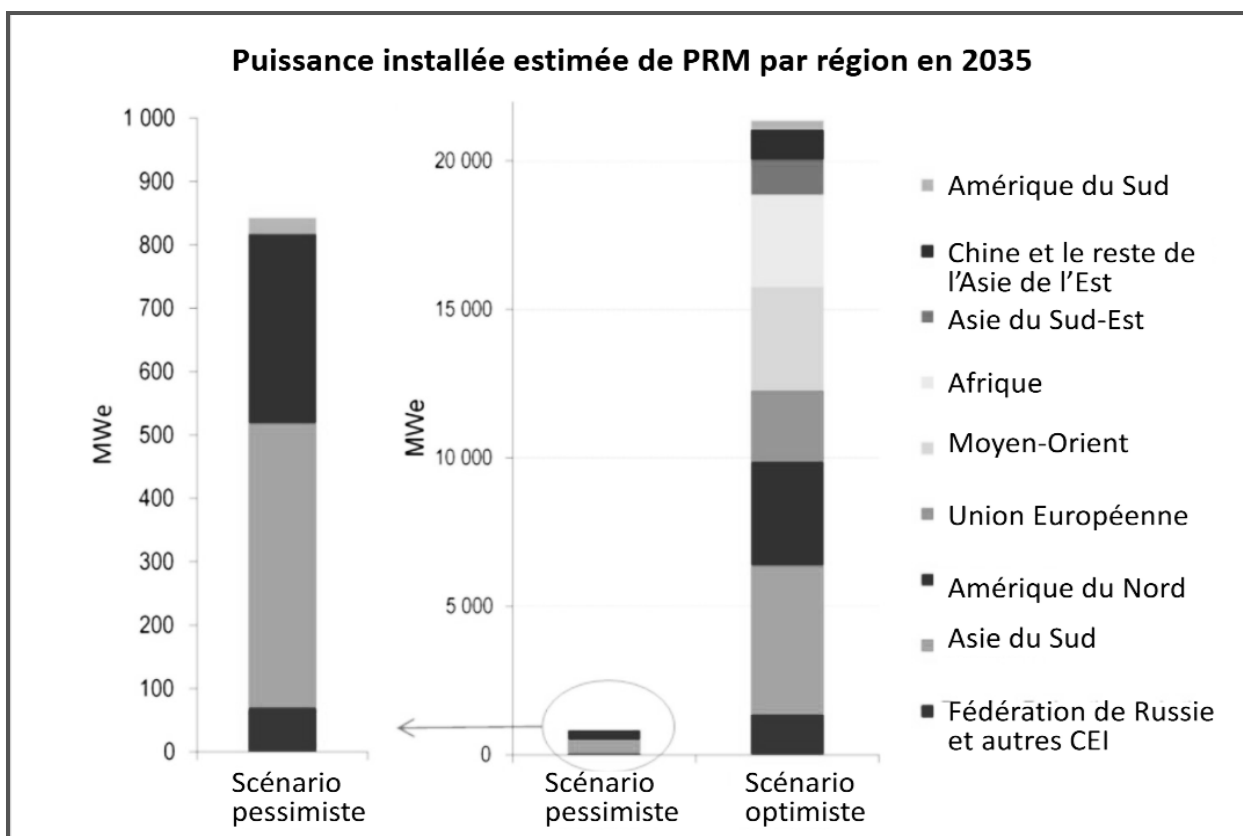
Cependant ces effets de série ne se manifestent que très lentement. Pour abaisser d'un certain pourcentage le coût, il faut doubler le total des fabrications. Selon Glaser, ces effets de série -au-delà d'une présérie de six ou dix exemplaires- ne vont se traduire par un rattrapage du coût du gros réacteur qu'au bout du 700^{ème} exemplaire. Ceci se produirait si le *taux d'apprentissage*⁷³ est de dix pour cent. Si le taux est moins favorable, par exemple 5%, il faut même 50 000 exemplaires, avant de rattraper le coût du gros réacteur. Encore, ces chiffres considèrent des processus de fabrication en série similaire aux industries les plus productives, un point contredit par les travaux de Grübler présentés plus haut.

Avant d'aboutir à autant de constructions pour rattraper les grands réacteurs, le coût d'investissement du SMR reste bien plus élevé. Seul le dernier exemplaire construit - par exemple le 700^{ème} dans le cas optimiste- va avoir un coût unitaire équivalent au point de départ, c'est-à-dire un grand réacteur. Par exemple, le constructeur

⁷³ Note : en économie industrielle, le **taux d'apprentissage** est l'exposant d'une fonction exponentielle de baisse de coûts en fonction du nombre d'exemplaires cumulés du produit.

britannique Rolls-Royce imagine une construction de seize exemplaires de son petit réacteur durant les années 2030 pour un coût de construction unitaire de 2,4 Milliards de livres. La baisse de coût unitaire attendue de la fabrication en série dans cet exemple reste marginale.

Selon l'institut canadien Global Shift⁷⁴, les estimations d'abaissement des coûts ne convainquent pas car il faudrait des séries bien plus importantes. Ainsi, l'étude de marché la plus complète et la plus optimiste est celle de l'Agence de l'Énergie Nucléaire (NEA) de l'OCDE. Elle prévoit d'ici à 2050 une part de marché mondiale des petits réacteurs de 3% du total du nucléaire soit environ 1500 unités mondiales (24 000 MW) dans l'hypothèse la plus haute⁷⁵. Le bas de la fourchette de la NEA est 940 fois inférieur ce qui suggère l'incertitude. Ce marché mondial hypothétique est de plus si fragmenté que les effets de série restent trop réduits pour rattraper le nucléaire classique.



Le marché des petits réacteurs selon l'Agence de l'Énergie Nucléaire de l'OCDE (2016) [graphe cité de Sibi Bonfils /]

En poussant le raisonnement à l'extrême, considérons non pas une part de 3% mais de 10% du nucléaire classique, ainsi que l'hypothèse haute de l'AIEA d'un parc mondial total du nucléaire de 880 GWe en 2050. Si le petit réacteur d'EDF et de

⁷⁴ Bonfils S. (2022). *Les petits Réacteurs Modulaires*. Bulletin du Global Shift https://www.globalshift.ca/wp-content/uploads/2022/10/Bulletin-septembre-les-PRM_VF.pdf

⁷⁵ Nuclear Energy Agency (2016). *Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment*. NEA N°7213 https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_14924/small-modular-reactors-nuclear-energy-market-potential-for-near-term-deployment?details=true



Technicatome (175 MWe) pouvait être seul sur le marché mondial, cela représenterait un total de 500 exemplaires. Cela ne permettrait même pas de compenser par la construction en série les effets de la petite taille du réacteur. Or, ce marché hypothétique est fragmenté, entre les États-Unis, la Russie, la Chine, la Grande-Bretagne, la Corée, chaque pays pouvant avoir plusieurs industriels et plusieurs modèles concernés. Pour un marché optimiste de trente à cinquante exemplaires au plus pour le champion français, le bénéfice d'une industrialisation réussie amène alors de 10% à 30% de baisse de coûts, si toutes les conditions d'une production en série sont observées. Les petits réacteurs restent dans tous les cas nettement plus chers que les grands réacteurs, et bien sûr que les énergies renouvelables électriques, encore nettement moins chères

Ainsi, les séries nécessaires pour abaisser ces coûts sont irréalistes. En effet, même si les conditions d'industrialisation étaient toutes réunies, la série nécessaire pour abaisser le coût de kWh unitaire au niveau du grand réacteur nucléaire est de plusieurs centaines voire des milliers d'exemplaires. De tels chiffres sont hors de portée des projets portés par les grandes nations industrielles, d'autant plus qu'elles ont chacune un voire plusieurs champion(s) -eux-mêmes en concurrence. L'abaissement des coûts des SMR par les effets de série est une promesse intenable même dans une vision optimiste des marchés mondiaux nucléaires.

5) Des coûts récurrents supplémentaires à ne pas négliger

La discussion sur le nucléaire, tant au format classique (1 GW) que pour les petits réacteurs se focalise beaucoup sur une maîtrise du coût de l'investissement initial en coût, en logistique et en délai. Mais le nucléaire ne repose pas que sur une construction maîtrisée. Les industriels ont depuis l'origine agrandi leurs réacteurs afin de diminuer les coûts sur la majorité des postes : coûts structurels d'homologation et de validation d'un projet, coût des infrastructures de support (routes, transformateurs, lignes électriques...), effectifs de production, d'entretien ou de sécurité...

L'image d'un nucléaire à très bas coût une fois le réacteur construit peut être trompeuse. Des coûts récurrents spécifiques s'appliquent tout au long de la vie de la centrale : le combustible et le personnel de fonctionnement et d'entretien bien sûr, mais aussi une maintenance lourde très onéreuse comme le remplacement de générateurs de vapeur ou de pièces radioactives. À cela s'ajoute le coût du démantèlement et des déchets en fin de cycle. Ces coûts directs ou communs au parc entier représentent bien plus de 10% du coût d'investissement, chiffre souvent avancé. Ainsi, le rapport Charpin-Dessus-Pellat⁷⁶ a estimé que l'investissement initial du parc nucléaire français n'a représenté que la moitié environ du coût global.

⁷⁶ CNDP (2019). *Étude économique prospective de la filière électrique nucléaire (rapport Charpin-Dessus-Pellat 2000)* [archives de la CNDP] <https://pngmdr.debatpublic.fr/approfondir/la-bibliotheque-du-debat/documents-auteurs/global-chance/e-tude-e-conomique-prospective-de-la-filie-re-e-lectrique-nucle-aire-rapport-charpin-dessus-pellat-2000>



La Cour des Comptes a estimé en 2012⁷⁷, que les coûts variables du nucléaire atteignent 24 €/MWh dont environ la moitié concerne le combustible et les coûts directs de personnel des centrales. Ces coûts variables sont à eux seuls supérieurs aux prix observés récemment pour des énergies renouvelables comme le photovoltaïque de très grande taille.

Parmi les propositions associées aux petits réacteurs, certaines concernent ces coûts récurrents, par exemple le chargement des réacteurs avec des “cassettes” regroupant les barres de combustibles, à changer de façon groupée. Une autre proposition est la mutualisation des salles de commande. Mais ces propositions ne font que limiter les surcoûts, et elles n’en compenseront pas les effets de taille. D’autres sources considèrent que le prix de revient du combustible nucléaire des SMR serait entre 15% et 70% plus élevé que leur équivalent des grands réacteurs⁷⁸.

6) Des SMR de plus en plus grands pour limiter les coûts

L'économie d'échelle permet en principe de compenser en partie l'absence d'effet de série⁷⁹. En créant une installation plus grande, les concepteurs visent une baisse de coût suivant une loi empirique très répandue dans l'industrie. Elle suggère que pour un doublement de la taille, l'augmentation de coût ne sera que de 50%, ou encore que pour une multiplication par dix de la puissance, la multiplication des coûts d'investissement n'est que de quatre. Un réacteur plus petit demande en effet bien plus de matériaux, de personnel, et même de combustible nucléaire qu'un modèle traditionnel (voir section dédiée). Les réacteurs français n'échappent pas à cette tendance et sont passés de 880 MWe à 1250 MWe puis 1400 MWe, avant de passer au chantier de l'EPR de Flamanville visant près de 1700 MWe. De façon parallèle, les grands pays disposant d'un réseau électrique interconnecté n'auront aucun intérêt à produire leur électricité dans des réacteurs plus petits. En effet, le coût unitaire (par kWh) de ces derniers reste dans tous les cas plus élevé.

Paradoxalement, les constructeurs de SMR ont jusqu'à présent proposé des réacteurs de plus en plus gros. Si le prix des réacteurs NUWARD demeure aujourd'hui un secret, EDF indique viser un coût de production compétitif, autour de 50 à 80 euros le MWh. À rebours de cet optimisme, les porteurs du projet NuScale aux États-Unis, de loin le plus avancé des petits réacteurs et le seul à avoir passé le processus d'autorisation de la Nuclear Regulatory Commission (NRC), ont jeté l'éponge mi-2023⁸⁰. Ils ont

⁷⁷ Cour des Comptes (2012) *L'analyse des coûts du système de production électrique en France*, Document S2021-2052 <https://www.ccomptes.fr/fr/documents/58078>

⁷⁸ Glaser A. et al (2013) *Resource Requirements and Proliferation Risks Associated with Small Nuclear Reactors, Nuclear Technology* 184(1):121-129. https://www.researchgate.net/publication/283147726_Resource_Requirements_and_Proliferation_Risks_Associated_with_Small_Modular_Reactors DOI:10.13182/NT13-A19873

⁷⁹ Ramana. M-V (2021). *Small Modular and Advanced Nuclear Reactors: A Reality Check*, IEEE Access Volume 9 (p.42092). <https://www.cndpindia.org/wp-content/uploads/2021/04/Small-Modular-and-Advanced-Nuclear-Reactors-A-Reality-Check-from-IEEE-Access.pdf>

⁸⁰ Penn I. et al. (2023) *Nuclear Energy Project in Idaho Is Canceled* New York Times 8 nov. 2023 <https://www.nytimes.com/2023/11/08/business/energy-environment/nuclear-energy-idaho-nuscale.html>

estimé que leur centrale aurait coûté plus du double à construire que des réacteurs de plus grande taille. Le devis final est de 9,3 Milliards de dollars US soit plus de 20 000 \$/MW, représente en effet un coût par mégaWatt près de deux fois plus élevé que celui observé désormais pour la construction du réacteur de Flamanville.

Avant son abandon, le projet NuScale⁸¹ a modifié plusieurs fois sa taille de chaque unité, pour des raisons explicitement économiques. Le mini-réacteur est ainsi passé de 35 MW à 45 MW puis 60 MW. Il atteint dans sa version finale 77 MW pour chaque unité⁸². Les projets initiaux décrivaient un ensemble de douze réacteurs, reliés à un seul système de commande, puis seulement six nettement plus importants.

Selon le centre Andlinger de l'Université Princeton⁸³, le coût de construction du petit réacteur va même être deux fois plus élevé que son homologue de grande taille. Selon cette équipe de prospective technologique menée par Alexander Glaser, le problème se pose à la fois sur la compétitivité du nucléaire, et sur celle du petit réacteur vis à vis du grand⁸⁴. La taille joue en effet fortement en défaveur des mini-réacteurs. Leur investissement est de l'ordre de 2,5 fois plus élevé pour un réacteur de 200 MW par rapport à un réacteur de 1000 MW en s'inspirant des données d'autres industries lors d'un changement d'échelle. Les coûts variables sont aussi nettement plus élevés.

7) Des budgets trop réduits pour créer une filière

Aux États-Unis, le financement budgétaire a décuplé pour les petits réacteurs en quelques années et atteint plusieurs milliards de dollars⁸⁵. En France, le soutien aux petits réacteurs est la première ligne budgétaire citée dans le plan « Industrie 2030 » avec 1,2 milliards pour l'innovation dans les réacteurs⁸⁶. Ces sommes s'ajoutent aux fonds de recherche existants, aux budgets européens spécifiques d'EURATOM, et aux financements privés. Cependant, la création d'une filière complète coûterait des sommes bien plus importantes, en incluant le cycle du combustible et des déchets, le personnel compétent et formé, ainsi que les usines de fabrication. Selon un rapport du Département de l'Énergie des États-Unis (DOE), il faudrait 10 milliards de dollars pour soutenir de façon "significative" une filière pilote de petits réacteurs aux États-Unis d'ici à 2035⁸⁷. D'autres auteurs estiment que les

⁸¹ Schlissel D.(2022), *NuScale's Small Modular Reactor*. Institute for Energy Economics and Financial Analysis analyse du réacteur NuScale <https://ieefa.org/resources/nuscales-small-modular-reactor>

⁸² Idem

⁸³ Ramana. M-V (2021) *Small Modular and Advanced Nuclear Reactors: A Reality Check*, IEEE Access. <https://www.cndpindia.org/wp-content/uploads/2021/04/Small-Modular-and-Advanced-Nuclear-Reactors-A-Reality-Check-from-IEEE-Access.pdf>

⁸⁴ Ramana M-V.(2014) *Too much to ask: why small modular reactors may not be able to solve the problems confronting nuclear power*, Nuclear Monitor #790, www.wiseinternational.org/nuclear-monitor/790/too-much-ask-why-small-mod

⁸⁵ Agence Internationale de l'Énergie (2022) *Nuclear Electricity, Tracking Progress* [site internet consulté le 20 mai 2023]. <https://www.iea.org/reports/nuclear-electricity>

⁸⁶ Gouvernement (2022) *1 an de France 2030 – La Première ministre présente les premiers résultats concrets de France 2030 et ses perspectives stratégiques* [site du gouvernement] <https://www.gouvernement.fr/communique/1-an-de-france-2030-la-premiere-ministre-presente-les-premiers-resultats-concrets-de-france-2030-et-ses-perspectives-strategiques>

⁸⁷ Scully Capital (2018). *Examination of Federal Financial Assistance in the Renewable Energy Market: Implications and Opportunities for Commercial Deployment of Small Modular Reactors* [Rapport au Département de l'Énergie US]

sommes sont plutôt de l'ordre de centaines de milliards de dollars en soutien public direct et indirect pendant plusieurs décennies⁸⁸.

De plus, un tel soutien massif doit être concentré sur un nombre très limité de modèles, si possible communs à plusieurs grands pays. Les chercheurs du Centre Andlinger des Techniques Avancées de l'Université Princeton estiment que le développement du "petit nucléaire" demande de concentrer les aides sur un monopole ou un duopole mondial, comme dans l'aéronautique⁸⁹. Or l'objectif souverainiste rend pourtant inéluctable une forte concurrence entre les pays concernés. Une grande série de réacteurs basés sur un dessin unique ou au moins cohérent dépend d'une forte coordination entre les pays acheteurs et fournisseurs. Celle-ci est loin de se dessiner. Une telle normalisation n'existe même pas entre européens. Les spécificités de l'assurance-qualité, de la conception au montage de pièces critiques, ainsi que les procédures de contrôle des différents régulateurs, ne disparaissent pas. Au final, non seulement le marché est limité mais il reste fragmenté.

Aussi impressionnants qu'ils paraissent, les moyens alloués aux projets de petits réacteurs restent donc trop limités pour transformer le paysage industriel du nucléaire ou de ses alternatives. Le passage au stade de commercialisation proprement dit est donc encore lointain. Il coûterait beaucoup plus cher que la recherche ou la construction de prototypes.

8) Des fonds privés limités

Les mises de fonds puis les capitaux en développement dont on parle aujourd'hui -y compris dans le cas de Bill Gates- sont d'un ordre de grandeur moindre que les sommes nécessaires pour fonder une industrie. Pour être crédibles, les soutiens les plans devraient se chiffrer en dizaines de milliards de dollars, comme suggéré plus haut. Ils mentionnent en réalité un budget dix fois moindre, dont la part privée est minoritaire.. Il s'agit en effet non seulement de soutenir la construction de prototypes et d'une filière de construction industrielle, mais aussi de compenser les surcoûts des machines durant des décennies.

Le discours sur le privé au secours du nucléaire masque ainsi une réalité de l'industrie nucléaire, intrinsèquement liée aux États et à leur soutien financier. Par exemple, les États-Unis ont engagé 3,2 milliards de dollars ce qui est considérable mais très loin des sommes nécessaires⁹⁰. De son côté, le privé est bien incapable d'engager sur le long terme des sommes à la hauteur des besoins.

https://www.energy.gov/sites/default/files/2018/11/f57/Examination%20of%20Federal%20Financial%20Assistance%20in%20the%20Renewable%20Energy%20Mark..._1.pdf

⁸⁸ Granger M. et al.(2018) *US nuclear power: The vanishing low-carbon wedge*, Proceedings of the National Academy of Science (PNAS), <https://www.pnas.org/content/115/28/7184>

⁸⁹Glaser A. et al. (2015) *Small Modular Reactors, an Energy Technology Distillate*, Andlinger Center / Princeton [fiches synthétiques]. <https://acee.princeton.edu/distillates/small-modular-reactors/>

⁹⁰ AIE (2022). Nuclear Power and Secure Energy Transitions Small modular reactors [Rapport] (P. 84). <https://iea.blob.core.windows.net/assets/016228e1-42bd-4ca7-bad9-a227c4a40b04/NuclearPowerandSecureEnergyTransitions.pdf>

9) Un financement très difficile

Dans un rapport paru en 2022, l'Agence Nucléaire de l'OCDE⁹¹, très favorable au nucléaire par construction, utilise le conditionnel pour l'atout "financement" des petits réacteurs : "la taille plus réduite, les délais de mise en œuvre plus courts et les caractéristiques d'implantation des SMR peuvent en faire une option attrayante pour les investisseurs privés. Le montant total de l'investissement serait plus abordable, même s'il n'est pas nécessairement moins cher par MW. Si l'on ajoute à cela les risques moindres associés à des périodes de construction plus courtes et à la construction en usine, cela pourrait encourager de nouveaux modes de financement des nouvelles centrales nucléaires".

En effet, malgré leur taille moins importante, les petits réacteurs restent un objet complexe à financer pour les entreprises électriques. Un réacteur reste un objet dangereux et encadré par une réglementation complexe. Son autorisation de construction et de fonctionnement demande du temps et des moyens. Les financiers sont réticents en raison des retards dans la construction, courants dans le nucléaire et encore plus pour un prototype. De plus, les banques multilatérales (dont la Banque Mondiale) ne financent en général pas le nucléaire. Ainsi, selon le scénario de doublement de la puissance nucléaire de l'AIE, le capital nécessaire est de l'ordre de 2600 Milliards de dollars d'ici à 2050⁹². Le GIEC, lui, estime l'investissement nucléaire à 100-127 milliards par an en moyenne pour les besoins en réacteurs et en prolongement de centrales existantes durant la prochaine décennie⁹³. Ces besoins considérables pour le nucléaire classique suggèrent que les États ne vont pas multiplier davantage les concours publics sur des projets de petits réacteurs inscrits à plus long terme.

Dans le cas particulier des États-Unis, l'implication de collectivités locales, présentée comme un atout, s'est transformé en problème lors de la débâcle du projet de NuScale dans l'Utah avec le retrait de certains clients municipaux⁹⁴. Ces structures, effrayés, se sont retirés du projet. Cela a abouti à son effondrement financier. Le financement du nucléaire par des collectivités publiques locales avait déjà fait l'objet d'une importante faillite (dans l'État de Washington) durant les années 80, qui reste dans les mémoires des financiers aux États-Unis⁹⁵.

L'idée des promoteurs des SMR est de limiter ce risque en créant des équipements plus aisés à financer, au moins en partie par le privé. Mais cette proposition est compliquée tant que la confiance ne règne pas entre les acteurs : ensemble,

⁹¹ Idem (p80)

⁹² Idem (p.79)

⁹³ Kreibiehl S. et al. (2022). *Investment and finance*. IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Table 15.2 (p.1570)
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_Chapter15.pdf

⁹⁴ Nuscale (2023) *Utah Associated Municipal Power Systems (UAMPS) and NuScale Power Agree to Terminate the Carbon Free Power Project (CFPP)* [communiqué du 8 novembre 2023]
<https://www.nuscalepower.com/en/news/press-releases/2023/uamps-and-nuscale-power-agree-to-terminate-the-carbon-free-power-project>

⁹⁵ Alexander C. (1983). *Whoops! A \$2 Billion Blunder: Washington Public Power Supply System. Fallout from a record default spreads from Washington State to Wall Street* Time Magazine 8 aout 1983.
<https://content.time.com/time/subscriber/article/0,33009,955183,00.html>

fournisseurs, électriciens, clients industriels ou particuliers, collectivités hébergeant des projets, banquiers et même citoyens. Trois conditions seraient nécessaires pour développer cette confiance :

- 1) Prix : une forme de garantie de prix abordables pour le courant produit est indispensable sur la durée pour un équipement qui n'a pas fait ses preuves.-
- 2) Combustible : une garantie d'approvisionnement continu en combustible enrichi sera demandée par les clients. Or un embargo international n'est pas à exclure en cas de doute sur la non-prolifération nucléaire.
- 3) Déchets : une garantie de reprise des déchets par le fournisseur peut être demandée sous une forme ou une autre car aucun client potentiel n'est aujourd'hui équipé pour le stockage à long terme des déchets. En France la loi Bataille interdit de garder les déchets d'autres pays.

A ces conditions, il faut ajouter le besoin d'un soutien public, du temps pour asseoir la réussite technique et économique des centrales, et une anticipation des besoins et des tâches chez les clients.

Enfin, une série de coûts intermédiaires, liés à la durée de construction, rend encore plus complexe le financement. La séquence de construction d'une centrale comprend par exemple la commande -et le paiement- de la partie nucléaire qui ne sera mise en service que bien plus tard. Or l'industrie nucléaire met en avant un coût dit « *overnight* », une sorte de devis estimé « comme si on comprimait le chantier en une nuit ». Cet affichage est bien entendu très différent du coût réel car s'y ajoutent les aléas du chantier ou encore les frais financiers sur les dépenses engagées en amont. Le coût des projets nucléaires va dépendre fortement du taux d'intérêt bancaire. Or, de 3 à 10% de taux, le coût complet du kWh double (!). De plus, désormais de plus, le taux est bien plus élevé pour le nucléaire que pour d'autres projets. L'incertitude sur les temps de construction et sur la finalisation des projets explique cette différence. Un taux uniforme, comme par exemple celui utilisé par l'étude RTE (Réseau de Transport d'Électricité) sur la construction des parcs électriques futurs de la France, se base sur un taux normatif de 4% sur l'ensemble des scénarios et tous les équipements, ce qui modifie fortement le résultat.⁹⁶ Dans les projets réels, ces taux se différencient sensiblement entre les projets de court terme et les projets plus incertains comme le nucléaire ou les barrages hydro-électriques.

10) Des projets non bancables⁹⁷

Le nucléaire, à cause de ces risques (devis, délai, taille), a donc un coût de financement bien plus élevé que par exemple l'éolien offshore. Ce dernier se finance désormais même par « financement de projet » privé car les banques savent qu'elles peuvent « céder » des projets en cours ou réalisés tant les investisseurs ont

⁹⁶ Roux-Goeken V. (2021) *Info Contexte - Le rapport qui contrarie les projets nucléaires de l'État* [site internet] https://www.contexte.com/article/energie/info-contexte-edf-rte-aie-le-rapport-qui-contrarie-les-projets-nucleaires-de-letat_125477.html

⁹⁷ Note : un projet est dit **bancable** (ou « banquable ») s'il est aisément vendable à un tiers et n'impose pas d'immobilisation.

confiance.⁹⁸ A l'inverse, le nucléaire va se retrouver en *haut du bilan* des électriciens. Ce point est distinct de la notion de rentabilité des projets. Ainsi, le porteur d'un projet de solaire ou d'éolien en construction va pouvoir céder son projet à tous les stades, et faire autre chose avec son argent. Ce n'est pas le cas pour les projets nucléaires, quelle que soit leur taille, en particulier à cause de l'incertitude sur les délais de construction. Ceux-ci vont dominer le *coût d'opportunité* selon le professeur Sovacool⁹⁹. Ces différences de risque et le caractère « bankable » des projets expliquent que dans d'autres études, les taux de financement sont différents suivant les types d'énergie. C'est le cas par exemple de l'étude emblématique de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), « Net Zero by 2050 », qui se base sur des taux de 8% pour le nucléaire et 3,2% pour le solaire ou l'éolien¹⁰⁰.

Provisoire / Draft

⁹⁸ Viennot M. et al. (2021) *La relance du nucléaire ... quoi qu'il en coûte !* [podcast France Culture] <https://www.franceculture.fr/emissions/la-bulle-economique/la-relance-du-nucleaire-quoi-qu-il-en-coute>

⁹⁹ Sovacool (2020) *Differences in carbon emissions reduction between countries pursuing renewable electricity versus nuclear power* Nature Energy volume 5, pages 928–935 (2020) <https://doi.org/10.1038/s41560-020-00696-3> <https://www.nature.com/articles/s41560-020-00696-3>

¹⁰⁰ AIE (2021) *Electricity generation technology costs by selected region in the NZE* Table B.1 (p.201) https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf

3. Les SMR : moins de contraintes de sûreté et de sécurité

Pour satisfaire l'objectif d'abaisser les coûts de construction de petits réacteurs, leurs promoteurs veulent réduire les exigences de sécurité ou de contrôle. Ils proposent de limiter les périmètres considérés en cas d'urgence et de se rapprocher des centre-ville ; de limiter le nombre d'opérateurs ou de gardiens ; ou encore de ne pas s'assurer contre l'accident majeur, comme jusqu'à présent pour les grands réacteurs.

1) Réduction des périmètres de sûreté

Selon les promoteurs des petits réacteurs, notamment aux États-Unis, le périmètre de sûreté face à l'accident, imposé par les régulateurs autour de la centrale, devrait être diminué, par rapport à celui en vigueur pour les centrales actuelles. Selon eux, la quantité de matières nucléaires présentes dans le réacteur est moindre que celle d'un grand réacteur en cas de dispersion, de plus la probabilité d'un accident est diminuée.

En France, un comité de l'Académie des Sciences estime ainsi qu'au prorata de la charge nucléaire, la dispersion de radioactivité en cas d'accident majeur est divisée d'autant. Cela devrait rendre le réacteur plus acceptable pour l'opinion publique¹⁰¹. Cependant, la taille réduite ne signifie pas une dispersion des contaminants réduite en proportion. Ainsi, lors des accidents de Tchernobyl et Fukushima, seule une faible partie de l'inventaire radioactif a été émise dans l'environnement. Un inventaire cinq fois inférieur à celui d'un gros réacteur ne dit rien des probabilités d'accident ni même des risques de contamination. Enfin, la diminution des quantités radioactives dépend aussi bien sûr du nombre de réacteurs sur un même site contenant chacun un cœur fissile.

Le groupe des régulateurs de l'AIEA cite cet argument souvent entendu aux États-Unis : selon les promoteurs du SMR, puisque l'accident est moins probable et le risque de contamination amoindri par la charge plus petite d'un réacteur, pourquoi ne pas limiter cette zone de sécurité ? Il est même proposé que ce périmètre soit réduit dans le périmètre du site de la centrale. Cela diviserait les coûts au lieu de considérer une distance de quinze à vingt kilomètres aux alentours, selon le Andlinger Center de Princeton¹⁰². Cette diminution du zonage de protection signifie que l'opérateur de la centrale n'aurait pas à entretenir la capacité technique et humaine des collectivités alentours en cas d'accident (pompiers, services de santé, maintien de l'ordre,

¹⁰¹ Fontecave M. et al.(2022) *Les réacteurs nucléaires modulaires de faible puissance (SMR)*. Avis et rapport de l'Académie des Sciences (p.12). https://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/221020_SMR.pdf PE 2022/Académie des Sciences

¹⁰² Glaser A. et al.(2015) *Small Modular Reactors. Article 3 : Safety*. Andlinger Center Princeton University (pp.12-13) <https://acee.princeton.edu/wp-content/uploads/2015/06/Andlinger-Nuclear-Distillate-Article-3.pdf>



information...). En réalité, l'économie viendrait donc du transfert de coût de ce risque vers la collectivité et non d'une diminution du danger....

D'après un rapport sur la sûreté nucléaire de l'AIE-NEA¹⁰³, la réduction de la taille des zones de sûreté faciliterait l'implantation des SMR près des centres de population ou d'industrie. Le rapport abonde en ce sens : "les caractéristiques nouvelles des SMR et notamment leurs caractéristiques *intrinsèquement sûres* vont quasiment éliminer la possibilité d'accidents sérieux". Ce point peut sembler spécieux, d'abord parce que le risque accidentel n'est pas éliminé, comme le présent rapport le détaille plus loin ; mais aussi à cause de la difficulté croissante d'implantation pour industries et les centrales nucléaires dans les pays occidentaux démocratiques.

L'AIE-NEA¹⁰⁴ se demande si le moindre risque d'accident supposé ne va pas permettre d'éviter d'entrer dans le champ des Conventions sur les impacts transfrontaliers, ce qui simplifierait fortement les implantations. Plus loin, le même document estime que la responsabilité des dommages aux tiers serait diminuée. De même les petits réacteurs pourraient être considérés comme des installations à faible risque si la loi et les conventions locales le permettent. Cependant, les auteurs admettent que ce sujet peut amener à des interprétations complexes.

2) Sécurité : diminuer le gardiennage

De façon encore plus étonnante, les exploitants nucléaires des États-Unis proposent également de fortement diminuer le gardiennage, qui est source du quart des coûts récurrents d'une telle centrale¹⁰⁵. Selon Edwin Lyman de l'ONG Union of Concerned Scientists (UCS), des discussions ont lieu pour limiter la présence armée dans les sites. Il cite ainsi l'audition d'un industriel du nucléaire auprès de l'autorité de sûreté. Celui-ci estimait que la plus grande variable pour assurer la rentabilité des nouveaux réacteurs est la sécurité. Il était soutenu par l'organe de l'industrie nucléaire aux États-Unis, le Nuclear Energy Institute (NEI). Ces propositions diminueraient le seuil minimal actuel de dix gardes armés par poste dans une centrale nucléaire dans ce pays, en plus des gardiens placés aux entrées. Comme le résume un diplomate européen, « ce n'est pas parce qu'il s'agit d'un petit réacteur nucléaire qu'il est mignon. Il n'y aura pas de [...] petites attaques terroristes si les sites sont pris pour cible »¹⁰⁶.

3) Éviter ou retarder les démantèlements

Le blocage ou la limitation de la construction de grands réacteurs est particulièrement sensible aux États-Unis. Ce pays n'a pratiquement pas commandé de nouvelle centrale depuis environ 45 ans. Les petits réacteurs SMR changent alors le récit puisqu'il s'agit de construire des centrales très différentes, sous un financement

¹⁰³ Sadamori K. et al. (2022) *Nuclear Power and Secure Energy Transitions* (p.80) Agence Internationale de l'Energie <https://iea.blob.core.windows.net/assets/016228e1-42bd-4ca7-bad9-a227c4a40b04/NuclearPowerandSecureEnergyTransitions.pdf>

¹⁰⁴ OCDE-NEA (2021) *Nuclear third party liability and SMRs dans Small Modular Reactors Challenges and Opportunities* (P.35-37) NEA No. 7560 https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2021-03/7560_smr_report.pdf

¹⁰⁵ Lyman E. (2013) *Small is not always beautiful*. Union of Concerned Scientists, ucs. Consulté le 20 mai 2023 <https://www.ucsusa.org/sites/default/files/2019-10/small-isnt-always-beautiful.pdf>

¹⁰⁶ Jack V. (2024) *Romania bets on long shot 'baby nukes' as coal cliff edge looms* Politico [article de presse] <https://www.politico.eu/article/romania-long-shot-baby-nukes-coal-cliff-edge-looms/>

innovant, en « chamboulant » (*disrupt*) le modèle actuel. L'époque est favorable au milliardaire qui fait bouger le jeu spatial avec ses fusées (Elon Musk), ou aux entreprises qui bousculent des situations économiques établies (Amazon...). Aux États Unis et au Canada, ce récit fonctionne d'autant plus que le nucléaire subit une crise profonde. Dans ces pays, les opérateurs et les autorités publiques se sont habitués à prolonger la vie des nombreux réacteurs existants. Elles avaient par contre presque abandonné l'option de construire des nouveaux réacteurs, malgré des tentatives périodiques du gouvernement fédéral. Ainsi, aux États-Unis, un site nucléaire ancien peut décaler pendant des décennies ses obligations de démantèlement ou de décontamination en y ajoutant un SMR.

Éviter ou retarder le démantèlement des autres réacteurs peut être intéressant d'un point de vue économique à court terme. Cela peut notamment permettre à ces sites de rester "sites nucléaires de base", avec une infrastructure nucléaire (sécurité, sûreté...) maintenue. Au regard des coûts envisagés pour le démantèlement - plusieurs dizaines de milliards d'euros pour la France par exemple - le repousser à plus tard en conservant les sites tels quels serait très avantageux pour l'industrie nucléaire.

Selon l'équipe Andlinger de Princeton¹⁰⁷, dans une telle hypothèse, la radioactivité supplémentaire des petits réacteurs va pourtant induire des coûts de décontamination ou de démontage supplémentaires. De même, des dangers pour les travailleurs persisteront, puisque le site reste en activité, avec des équipes plus nombreuses.

4) Le défaut d'assurance accident continu

Parmi les grandes activités industrielles, le nucléaire fait exception par son absence d'obligation d'assurance pour les opérateurs, privés ou publics. Ceux-ci ont un plafond de responsabilité en cas de grave accident ou catastrophe. Ce choix provient des origines de l'industrie nucléaire aux États-Unis. Le Price-Anderson Act de 1957 édicte alors un plafond de responsabilité de quelques milliards de dollars (aujourd'hui 13 milliards de dollars aux États-Unis¹⁰⁸) pour l'exploitant d'une centrale nucléaire, soit moins que la valeur de l'installation elle-même. Le texte devait être temporaire, pour permettre aux industriels du nucléaire Westinghouse et General Electric de démarrer en tant qu'industrie civile. En échange de ce plafond, les constructeurs s'engageaient à l'époque sur un niveau très faible de probabilité d'accidents, comptés en « années réacteurs »¹⁰⁹:

- Pour les accidents graves (fusion du cœur), une probabilité inférieure à de 1/100 000
- Pour les accidents majeurs (avec contamination du public), une probabilité inférieure à 1/1 000 000

¹⁰⁷ Glaser A. et al. (2015) *Small Modular Reactors, an Energy Technology Distillate Nr3*, Safety, Andlinger Center / Princeton [fiches synthétiques, p.12]. <https://acee.princeton.edu/distillates/small-modular-reactors/>

¹⁰⁸ Gilinsky V. (2023) *Senate extends nuclear liability-limiting law without public scrutiny*. Bulletin of The Nuclear Scientists 22 août. <https://thebulletin.org/2022/12/building-promises-of-small-modular-reactors-one-conference-at-a-time/>

¹⁰⁹ Note : Une **année-réacteur** représente l'expérience de fonctionnement d'un réacteur civil (1 GWe) durant un an

Au cours des trois dernières décennies, plusieurs accidents majeurs et catastrophes nucléaires ont déjà eu lieu. Pourtant, le total d'exploitation des réacteurs civils ne dépasse pas 20 000 années-réacteurs. C'est un facteur important de la perte de confiance des États et du public, car ces événements se sont produits de vingt à cent fois plus souvent¹¹⁰ que les probabilités contenues dans les engagements de l'industrie en échange de l'absence d'assurance contre ces catastrophes et de leur prise en charge par les États.

La probabilité d'un accident

Il existe deux méthodes, théorique et expérimentale, pour estimer la probabilité d'un accident:

- Théorique : on calcule une « espérance mathématique » sur la base de scénarios de simulation d'accidents prenant en compte les systèmes de défense et les risques de dysfonctionnement (arbres de causes et défaillances...)
- Expérimentale : on prend en compte les accidents survenus, ce que l'on fait par exemple pour les accidents de voiture (méthodes assurantielles...)

Cette distinction est par exemple expliquée par François Leveque du CERN à l'École des Mines de Paris¹¹¹. Quelle que soit la méthode, le décalage est immense entre les probabilités théoriques de l'accident nucléaire et la réalité observée.

Depuis les origines du nucléaire, l'échelle des accidents s'est étoffée. Les accidents majeurs et les catastrophes sont désormais notés 6 et 7 sur une échelle internationale bien plus détaillée¹¹², mais l'absence d'assurance est restée. Selon Victor Gilinsky, ancien Commissaire du régulateur de sûreté des États-Unis¹¹³, la probabilité "officielle" d'accidents est si faible qu'elle pourrait être assurée plus facilement que d'autres risques [déjà couverts par les assureurs] de ces entreprises. En refusant tout changement, ces constructeurs nucléaires montrent qu'ils ne croient pas à leurs propres estimations du risque. Selon Gilinsky, ils ne passeraient pas l'épreuve des calculs face à des assureurs moins complaisants. Cela justifie selon lui d'autant plus la suppression de l'absence de garantie face à un accident majeur, qui obligerait à infirmer ou confirmer les estimations d'accident selon un processus contradictoire.

5) Un plafond de dommages faible en cas d'accident nucléaire

Parmi les solutions possibles aux constructeurs pour prouver leur bonne foi, on peut considérer par exemple l'option d'un fonds mutualisé pour payer les dommages dus à un accident majeur. Cela obligerait ainsi les constructeurs nucléaires à s'exprimer sur les choix de conception et de fonctionnement de leurs collègues. Une telle obligation

¹¹⁰ Laponche B. (2011). *Quelle énergie pour l'Avenir ?* Télérama N°3205. http://mclams.free.fr/data/pages/revue_de_presse/2011_06_telerama2.pdf

¹¹¹ Leveque F. (2014) *Les probabilités d'accident nucléaire majeur : calculs et perceptions*. Séminaire ASN. <https://www.cerna.minesparis.psl.eu/Donnees/data07/746-FLEVEQUE.pdf>
Voir aussi <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-00795152v2/document>

¹¹² AIEA (1998). *Échelle internationale des événements nucléaires et radiologiques (INES)* [site consulté le 20 mai 2022] <https://www.iaea.org/fr/ressources/echelle-internationale-des-evenements-nucleaires-et-radiologiques-ines>

¹¹³ Gilinsky V. (2020). *The US government insurance scheme for nuclear power plant accidents no longer makes sense*. Bulletin of Nuclear Scientists, février 2020. <https://thebulletin.org/2020/02/the-us-government-insurance-scheme-for-nuclear-power-plant-accidents-no-longer-makes-sense/>

apparentée au système MARPOL des transporteurs de pétrole, même imparfait, serait différente des assurances limitées existant à l'échelle internationale et de la prise en charge par les Etats. Il s'agirait en effet d'une incitation à la transparence des calculs, tant des risques d'accident que de leur coût. Un tel fonds mutualisé ne demande pas une modification des traités.

Le plafond de dommages et d'indemnisation est en effet similaire partout dans le monde, par exemple en France de 0,7 milliard pour EDF¹¹⁴. Il contraste avec le coût de l'accident de Fukushima, estimé par le Japan Center for Economic Research, plutôt favorable au nucléaire, à des montants de 230 à 530 milliards de dollars pour les seuls coûts de nettoyage¹¹⁵. En France, l'IRSN¹¹⁶ évaluait en 2013 un scénario médian d'accident entre 120 et 430 milliards d'euros soit 20% du PIB français.

L'absence d'assurance à l'échelle des accidents observés par le passé n'est en effet pas seulement une subvention implicite au nucléaire. Dans toutes les autres industries comparables, les techniciens des assureurs et leurs agents de confiance (contrôleurs techniques...) jouent un rôle bien plus important de surveillance en conception et en exploitation. Le nucléaire évite ainsi de se confronter aux calculs d'une partie des professionnels de la sûreté. Or, ceux-ci complètent les autorités publiques dans des secteurs comme l'aviation, le transport maritime, les industries chimiques.

Enfin, l'exemption d'assurance crée aussi une concurrence déloyale pour les autres formes d'énergie, comme les renouvelables, qui sont obligées de s'assurer malgré un risque comparé infime.

6) Absence de démonstration de la sûreté des SMR en « vraie grandeur »

La question du risque d'accident pose la question du type de démonstration nécessaire pour valider une installation nouvelle comme un petit réacteur. Pour convaincre les régulateurs et rassurer le public face au risque d'accident, un prototype devrait être testé en situation réelle, et pas seulement sous forme de composants ou de simulation numérique.

En effet, un réacteur entièrement nouveau doit démontrer sa capacité à résister à toutes sortes de risques. Des essais sur longue période, en particulier pour les cycles avancés, sont indispensables¹¹⁷. De tels tests devraient concerner à la fois la prévention mais aussi les conséquences d'un accident grave.

¹¹⁴ Radisson L. (2021) *Nucléaire : l'État va augmenter sa garantie pour couvrir le risque*. Site Actu-Environnement [consulté le 20 mai 2022] <https://www.actu-environnement.com/ae/news/nucleaire-etat-va-augmenter-garantie-pour-couvrir-risque-38225.php4>

¹¹⁵ Japan Center for Economic Research (JCER) (2019). *Accident Cleanup Costs Rising to 35-80 Trillion Yen in 40 Years* [note] <https://www.jcer.or.jp/english/accident-cleanup-costs-rising-to-35-80-trillion-yen-in-40-years>

¹¹⁶ IRSN (2013). *Travaux de l'IRSN sur le coût économique des accidents nucléaires entraînant des rejets radioactifs dans l'environnement* [site internet consulté le 20 mai 2023] <https://www.irsn.fr/actualites/travaux-irsn-sur-cout-economique-accidents-nucleaires-entraignant-rejets-radioactifs>

¹¹⁷ Buongiorno J. et al. (2018). *The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World: An Interdisciplinary MIT Study*. Massachusetts Institute of Technology, Energy Futures (p.67) <https://energy.mit.edu/research/future-nuclear-energy-carbon-constrained-world/>

Par exemple, pour un réacteur à eau, l'arrêt des pompes primaires et une situation d'absence d'alimentation externe combinées avec d'autres hypothèses extrêmes ne doit pas aboutir à la fusion du cœur nucléaire. De la même façon, l'accident majeur doit aussi être envisagé par les mesures adaptées pour empêcher la diffusion de la radioactivité et du cœur fondu.

De tels essais d'accident « en vraie grandeur », sont - en toute logique - nettement plus réalisables sur un petit réacteur que pour un énorme réacteur de type EPR. C'est aussi à cette condition qu'une série de réacteurs de conception nouvelle pourrait donner confiance au public et aux clients. Pourtant, les constructeurs dont les modèles sont en cours d'élaboration (États-Unis, France, Royaume-Uni) n'ont pas prévu de tels essais du système complet.

Provisoire / Draft



4. Les SMR : un risque accru de prolifération nucléaire

La prolifération des technologies et des matériaux nécessaires pour construire une bombe atomique, ainsi que les risques de sécurité sont multipliés pour des petits réacteurs. Ceux-ci contiennent par nature des quantités importantes de matière fissile. Le risque de diffusion de la bombe atomique s'accroît avec la diffusion de réacteurs au sein de zones instables. L'idée même de petit réacteur mobile multiplie le risque de vol ou de détournement de matières dangereuses particulièrement adaptées à des actions terroristes.

Le nombre d'États utilisateurs d'installations nucléaires rend la contrainte de non-prolifération de plus en plus complexe à surveiller et maîtriser. Ceci concerne autant la sécurité des matières que le développement d'armements (explosifs ou armes radioactives). Ces questions sont aggravées en cas de choix de cycles fonctionnant au plutonium ou à des combustibles très enrichis en matière fissile.

1) Le système de non-prolifération actuel va freiner le déploiement des SMR

Le régime de non-prolifération va limiter fortement l'exportation de réacteurs vers des pays qui ne possèdent pas encore de réacteurs. Vendre des réacteurs, quelle que soit leur taille, demande des garanties importantes de la part du pays receveur. Comme la sûreté et les déchets, le risque de prolifération représente l'un des points faibles du nucléaire. Le risque de diffusion de la bombe est réel, concrétisé par l'échec partiel de la non-prolifération (Inde, Pakistan, Israël, Corée du Nord, Iran...). Pour les clients du nucléaire civil, le cadre de la prolifération a des implications très concrètes :

- Infrastructure de surveillance, de sécurité et de régulation à mettre en place
- Complexité de l'approvisionnement en combustibles, risque d'embargo
- Contraintes sur la reprise des déchets nucléaires ou de leur stockage
- Inflation des prix à l'investissement et au fonctionnement à cause des procédures de non-prolifération

Tous ces points ne disparaissent pas pour les petits réacteurs. Ceux-ci reçoivent en effet une charge initiale supérieure au seuil des quelques kilogrammes de matières fissiles nécessaires pour la création d'un explosif nucléaire¹¹⁸. L'uranium fissile 235 ou le plutonium 239 ont une masse volumique sous forme métal d'environ 20 kg/l, soit le volume d'un demi-litre pour fabriquer une bombe sophistiquée. Selon Basdevant, une bombe très simple (dite « à rapprochement ») demanderait 25 kg d'uranium très enrichi à 90% ou 8 kg de plutonium. Selon lui, l'enrichissement de l'uranium pourrait

¹¹⁸ Basdevant J-L. (2012) *Maîtriser le Nucléaire*, 2ème édition, Eyrolles éditions

même descendre à 20% pour faire un explosif de masse plus importante, qui n'intéresserait pas les militaires mais plutôt des terroristes.

Tous les petits réacteurs sont donc par définition soumis aux règles de non-prolifération. Les clients potentiels doivent se plier à ces exigences, avant même la mise en service de leurs premiers équipements prototypes.

2) Les SMR peuvent menacer ce régime essentiel pour notre sécurité

Si on va vers davantage de réacteurs plus petits, cela soulève le danger de nouvelles possibilités de prolifération nucléaire, estime le journaliste James Temple dans la revue du MIT¹¹⁹. Il cite notamment la position de l'association d'experts Union of Concerned Scientists (UCS). La multiplication des réacteurs dispersés géographiquement renforce le risque de dispersion des matériaux nucléaires (combustibles et déchets). Selon Edwin Lyman¹²⁰ de UCS un vol de combustible pourrait en effet aboutir à la construction d'une bombe sale¹²¹.

Si on multiplie les sites nucléaires dispersés, dans des pays non encore utilisateurs de nucléaire civil, le régime de non-prolifération risque ainsi d'exploser. Ce point n'est pas négligeable, car jusqu'à présent, les matériaux nucléaires sont restés entre les mains des États. En effet, l'AIEA, malgré ses failles, représente un système de conseil et de contrôle de sûreté déjà essentiel. Même dans ce cadre, des incidents restent nombreux, comme par exemple 32 vols ou accidents sérieux sur des bombes américaines¹²². Un très petit réacteur, monté sur un train, un camion ou dans un container à bord d'un navire, poserait de redoutables problèmes pour la prolifération, en plus d'une multiplication des risques d'accidents.

Les forces armées américaines mettent en garde contre le précédent induit par cette innovation, ce qui ne les empêche pas de travailler activement sur ces réacteurs¹²³. Selon un rapport à l'état-major US¹²⁴, le cadre juridique international actuel traite des matériaux nucléaires et des combustibles, tandis que le réacteur lui-même n'est pas censé être mobile. Ce précédent demanderait une modification des textes internationaux sur les technologies duales, d'autant plus que des propositions actuelles pour de tels réacteurs proviennent de sociétés privées sous contrat des armées. Le même document pose la question de l'évolution du réacteur une fois

¹¹⁹ Temple J. (2017). *Small Reactors Could Kick-Start the Stalled Nuclear Sector*. Revue Technology Review / MIT. <https://www.technologyreview.com/2017/07/17/150446/small-reactors-could-kick-start-the-stalled-nuclear-sector/>

¹²⁰ Lyman E. (2018). Nuclear Power Reactors: Is Smaller Better? Union of Concerned Scientists. [transcrit <https://www.ucsusa.org/resources/nuclear-power-reactors-smaller-better>

¹²¹ Note : une **bombe sale** repose sur la dispersion de matières nucléaires radioactives par des explosifs classiques

¹²² Schlosser E. (2023) *Early warnings and near misses* [interview]. Bulletin of Nuclear Scientists. <https://thebulletin.org/magazine/2023-05/>

¹²³ Tucker P. (2022) *Defense Department Sets Out to Build Miniature Nuclear Reactor, Again*. [site consulté le 30 05 2023] <https://www.defenseone.com/technology/2022/04/defense-department-sets-out-build-miniature-nuclear-reactor-again/365766/>

¹²⁴ Vitali J. et al. (2018) *Study on the use of Mobile Nuclear Power Plants for ground operations*. Etat Major de l'Armée des Etats-Unis G-4 [document non classifié]. <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/1064604.pdf>



installé dans un autre pays et notamment des déchets et de la responsabilité du démantèlement. Il précise qu'une négociation sur un changement de régime pourrait durer au moins sept ans.

3) Une prestation sans intervention de l'État client est illusoire

Selon le professeur Robert Sokolow et ses collègues de Princeton¹²⁵, les vendeurs de petits réacteurs estiment pouvoir convaincre les régulateurs de déléguer une prise en charge complète du retrait et du stockage des déchets, comme proposé plus haut pour les combustibles. Selon eux, pour l'exploitant cela supposerait d'abandonner l'idée d'avoir sa propre filière d'enrichissement de l'uranium ou de retraitement des déchets, de même que le cortège de spécialistes nucléaires qui y sont associés. Dans ce schéma, les clients accepteraient les exigences du fournisseur du point de vue de la non-prolifération, voire même participeraient à un nouveau régime international plus restrictif. Mais cela ne réduirait pas le niveau de sécurité nécessaire, ou encore de télé-surveillance par les représentants du traité comme c'est le cas actuellement.

Il est ainsi suggéré d'utiliser un bloc de combustible non accessible qui ne puisse être déchargé ou rechargé sans l'intervention du pays fournisseur, à qui de-facto la non-prolifération serait déléguée. Un exemple serait un navire russe amarré dans le pays client sans intervention de sa part, tel que proposé actuellement par Rosatom. Une autre variante de cette « délégation » est le système Flexblue, proposé sans succès il y a une dizaine d'années par le CEA, Naval Group (DCNS) et des équipes françaises¹²⁶. Il s'agit alors d'une coque de sous-marin de 12 000 tonnes, immergé à 60 ou 100 m de fond jusqu'à 15 km des côtes de l'exploitant¹²⁷. Ce projet a été abandonné faute de démonstration de l'absence d'impact sur l'environnement. Les autorités françaises de régulation ont aussi fait remarquer le danger d'installer un réacteur entièrement « sous-traité », sans possibilité pour le pays receveur d'intervenir en cas d'incident ou d'intervention malintentionnée. Selon DCNS¹²⁸, ce projet Flexblue reposait en outre sur un niveau élevé d'automatismes et de liens de télécommunication permettant de télécommander plusieurs réacteurs depuis la même salle de commande. Elle supposait donc une fiabilité élevée des capteurs situés en milieu radioactif sur une très longue période.

Mais selon l'équipe Andlinger de l'Université Princeton, aucun des pays détenteur de nucléaire ou souhaitant accéder au nucléaire civil ne semble intéressé. De plus, ce transfert de l'expertise constituerait en lui-même un risque de prolifération car l'absence d'expertise favorise les détournements et les vols chez le client. Même dans l'hypothèse d'un pays absolument pas intéressé par la technologie ou la fabrication de bombes, l'architecture économique en quasi-monopole pose question. Elle insère en

¹²⁵ Glaser A. et al. (2015) Small Modular Reactors, an Energy Technology Distillate, Andlinger Center / Princeton [fiches synthétiques]. <https://acee.princeton.edu/distillates/small-modular-reactors/>

¹²⁶ DCNS (2011) *DCNS va réaliser, avec AREVA, le CEA et EDF, les études de validation de son concept innovant Flexblue* [communiqué]

¹²⁷ DCNS (2011). *Flexblue, une centrale sous-marine signée DCNS* [film promotionnel] <https://youtu.be/NbaRq1T4Dbk>

¹²⁸ IAEA (2017). *Flexblue (DCNS, France)* [fiche déclarative p. 72 A4] IAEA Nuclear Energy Series NoNP-T-3.19 https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:50010944

effet une exclusivité supplémentaire de fourniture d'une partie de la chaîne de valeur, voire un veto des concurrents futurs si le pays veut devenir lui-même fournisseur.¹²⁹

Cette absence d'intérêt des clients pour un système scellé contredit l'injonction centrale de la non-prolifération édictée par l'AIEA, gardienne des traités de non-prolifération. Celle-ci insiste en particulier sur le confinement des combustibles dans des assemblées « identifiables » et dont l'intégrité reste totale lors de tout le séjour dans la centrale¹³⁰. Cette préoccupation rejoint celle de l'Académie des Sciences sur la précaution particulière pour des pays nouvellement acquéreurs de nucléaire. Comment les déchets de type nouveau seraient-ils gérés, et créeraient-ils des risques nouveaux ? En particulier cela remet-il en cause le fonctionnement des traités sur la non-prolifération et sur la gestion de ces déchets ?¹³¹

4) Les SMR ne peuvent pas faire l'objet d'un commerce ordinaire

La production de déchets et le besoin en combustible sont plus importants pour des cœurs de réacteurs plus petits¹³². Cela a aussi des conséquences pour la prolifération et le risque terroriste.

Une vision plus optimiste est portée par « Connaissance des Énergies », une publication proche des électriciens français. Le site reconnaît ainsi le risque de prolifération : « le succès économique des SMR implique qu'ils soient produits industriellement en grand nombre pour des utilisateurs divers et mis en œuvre par des effectifs réduits. Au concept même de SMR est donc attaché une forte dispersion géographique, s'accompagnant d'un risque structurel de détournement des combustibles SMR vers des usages hostiles »¹³³. « Connaissance des Énergies » propose alors des solutions techniques :

- soit des combustibles très enrichis de grande autonomie, voire de même durée de vie que le petit réacteur. Leur cœur serait indissociable de sa structure métallique. Mais son irradiation longue induirait la présence de beaucoup de plutonium dans le réacteur lors de sa fin de vie.
- soit l'utilisation de cœurs combustibles très radioactifs déjà irradiés, comprenant donc des actinides dangereux (des « cœurs combustibles dissuasifs anti-proliférants »), difficile à manipuler pour des acteurs malintentionnés ;

¹²⁹ Glaser et al (2015) *Distillates* Princeton / Andlinger Center (extrait) <https://acee.princeton.edu/wp-content/uploads/2015/06/Andlinger-Nuclear-Distillate.pdf>

¹³⁰ IAEA (2021). *Technology Roadmap for Small Modular Reactor Deployment, Non Proliferation and Safeguards*. International Atomic Energy Agency, Nuclear Energy Series N°NR-T-1.18 (p.16) https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1944_web.pdf

¹³¹ Fontecave M. et al.(2022) *Les réacteurs nucléaires modulaires de faible puissance (SMR)*. Avis et rapport de l'Académie des Sciences (p.8). https://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/221020_SMR.pdf PE 2022/Académie des Sciences

¹³² Krall L. et al. (2022) *Nuclear waste from small modular reactors* PNAS 2022 119 (23) e2111833119 <https://doi.org/10.1073/pnas.2111833119>

¹³³ CDE (2019). *Energie nucléaire « SMR » (petits réacteurs modulaires)*. Connaissance des Energies [site consulté le 20 mai 2023] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-nucleaire-smr-petits-reacteurs-modulaires>

Pourtant, et comme l'histoire nous l'a démontré, ces solutions techniques ne sont pas suffisantes face aux risques associés à la prolifération nucléaire. La première piste, viserait à vendre des combustibles difficiles à manipuler par des acteurs malintentionnés. Mais elle ne garantit pas que des États ou des groupes terroristes attaquent tout de même un ensemble nucléaire comprenant ces combustibles. C'est ce qui s'est passé après que la France et l'Italie ont décidé de vendre une centrale nucléaire fonctionnant à l'uranium très enrichi nommé « "Osirak" à Saddam Hussein. Bien que très dangereux à manipuler pour transformer les combustibles nucléaires associés en bombe, cela n'a pas empêché l'aviation iranienne de bombarder cet ensemble nucléaire expérimental et l'aviation israélienne de le détruire¹³⁴. Ce type de défense contre la prolifération pose aussi le problème des mesures qui, pour réussir, doivent être réalisées à l'insu du client. C'est ce que la France aurait fait¹³⁵ pour ce réacteur livré par les gouvernements français et italien à l'Irak. Les archives des États-Unis récemment déclassifiées affirment que des mesures secrètes auraient été prises par le gouvernement français à l'insu de son client pour limiter la prolifération. Se posent déjà à l'époque les questions de confiance entre le fournisseur et son client et celles de la vente de réacteurs dans des zones considérées comme instables.

En ce qui concerne la seconde piste, celle des combustibles enrichis fonctionnant en grand autonomie, l'exemple de l'échec de Flexblue, illustre bien les limites d'une telle idée. À 60 mètres de profondeur, les défis d'intervention en cas d'accident ou d'attaque terroriste sont particulièrement élevés. La saisie de sous-marins utilisés par des mafias de la drogue, de même que les épisodes de sabotages de pipe-line et de câbles sous-marins nous invitent à ne plus exclure les interventions malintentionnées, même à ces profondeurs.

La détermination, le potentiel de coordination, et le niveau technique des groupes terroristes en vue de nuire ne doivent désormais plus être sous-estimés. Al Qaïda a pris le contrôle simultané de quatre avions de ligne puis les a écrasés sur les tours du World Trade Center le 11 septembre 2001. Le commerce de dizaines ou de centaines de petits réacteurs ne peut être une activité anodine. Chacun de ces réacteurs contiendrait dans son cœur bien plus de matière fissile qu'il n'en faut pour plusieurs bombes.

5) Le danger spécifique de la surgénération

Le choix de réacteurs surgénérateurs est en lui-même un problème quant au risque de prolifération. Dans un tel réacteur, des matériaux « fertiles » situés dans le réacteur ou à sa périphérie captent les neutrons pour se transformer en plutonium. En théorie,

¹³⁴ National Security Archive (2021) *Israeli Attack on Iraq's Osirak 1981: Setback or Impetus for Nuclear Weapons?* [archive du gouvernement US] <https://nsarchive.gwu.edu/briefing-book/iraq-nuclear-vault/2021-06-07/osirak-israels-strike-iraqs-nuclear-reactor-40-years-later>

¹³⁵ Idem

cette capture produit des matériaux fissiles pouvant être utilisés plus tard dans la réaction neutronique du réacteur ou d'un autre équipement.

Ce principe est présenté tantôt comme la solution élégante à la production des déchets afin de brûler des actinides ou du plutonium (projet Newcleo), mais aussi à l'inverse pour faire face dans les prochains siècles à toute pénurie d'uranium. Mais ces propositions -contradictoires- sur les petits réacteurs n'enlèvent rien aux deux problèmes de prolifération des réacteurs utilisant le principe de surgénération :

- La charge initiale du réacteur et ensuite les combustibles usés ou les déchets contiennent une masse fissile supérieure aux seuils dangereux pour la prolifération.
- L'utilisation des matières générées par la surgénération suppose le retraitement chimique des combustibles usés, ce qui ajoute un risque de détournement des compétences nécessaires à la fabrication de combustible militaire.

Il y a donc lieu d'être inquiet car l'un des projets les plus médiatisés - le système TerraPower¹³⁶, soutenu par Bill Gates - se présente sous la forme d'un surgénérateur. Selon ses partisans, le réacteur à sodium fondu fonctionnerait avec un cœur enrichi en uranium fissile 235, entouré de barres d'uranium fertile appauvri. Au bout d'un certain temps, ces barres capteraient des neutrons, se transformeraient en plutonium. Elles seraient alors rapprochées du centre du réacteur.

Contrairement au système Phénix ou Superphénix français de surgénérateur, la proposition prévoit d'éviter de passer par la phase de retraitement à chaque changement-remaniement du combustible. Selon les porteurs du projet, cela réduirait le risque de prolifération. Pourtant, selon le spécialiste reconnu de la prolifération Alan J. Kuperman, professeur à l'Université du Texas, c'est tout le contraire¹³⁷. Il est en effet peu probable qu'une telle configuration puisse fonctionner de façon régulière, sans empoisonnement par les actinides ou d'autres produits. Mais surtout cela signifie que le réacteur aurait la capacité de récupérer automatiquement des barres de combustible usé au choix de l'opérateur et au moment opportun et de les intervertir à volonté. On est loin d'un système étanche pour la prolifération. Comme pour les autres projets de petits réacteurs il s'agit de massifier une fabrication et de la diffuser dans le monde entier, selon le professeur. Il estime qu'une telle multiplication des risques contredit un demi-siècle de politique bi-partisane aux États-Unis, hostile à la séparation commerciale du plutonium. Cette politique a réussi à limiter le retraitement à deux pays seulement, la France et la Russie, qui possèdent déjà l'arme nucléaire. Le Japon, qui souhaite s'en équiper, n'a pas achevé ses propres installations en plusieurs décennies

¹³⁶ Terrapower (2022). *Unique Design to Enhance Safety and Support Nonproliferation* [site commercial] consulté le 20 mai 2022. <https://www.terrapower.com/our-work/traveling-wave-reactor-technology/>

¹³⁷ Kuperman A. (2023) *Biden's horse-trading on nuclear technology and fuels is an unprecedented proliferation risk*. The Bulletin of Nuclear Scientists. <https://thebulletin.org/2023/09/bidens-horse-trading-on-nuclear-technology-and-fuels-is-an-unprecedented-proliferation-risk/#post-heading>



de construction¹³⁸. Kuperman regrette que les gouvernements subventionnent massivement (jusqu'à 2 milliards de dollars) le développement de ces réacteurs dits « à neutrons rapides », pensés à l'origine pour produire du plutonium. Ils vont en effet induire une diffusion de cette capacité technique dangereuse pour la sécurité du monde.

Pour les autres propositions de petits réacteurs « avancés » comme ceux à haute température ou aux sels fondus, les propositions d'un chargement unique sur de longues périodes ne sont pas plus rassurantes. En effet, ce choix amène d'autres problèmes, notamment des taux d'irradiation très élevés et surtout une forte augmentation des quantités de plutonium dans l'inventaire de tels réacteurs¹³⁹. Selon le laboratoire Andlinger de Princeton, ce sont 2500 kg¹⁴⁰ de plutonium qui seraient produits en trente ans dans un cœur de réacteur de 200 MWe sans recharge, contenant initialement 2,2 tonnes d'uranium 235, soit des centaines de fois la masse nécessaire pour fabriquer une bombe nucléaire.

Une revue de littérature suggère que les trois principaux risques additionnels sur la prolifération sont l'enrichissement plus élevé, la diffusion plus large des réacteurs, les technologies surgénératrices, mais aussi l'impossibilité d'accès pour la vérification de l'intégrité du cœur¹⁴¹.

¹³⁸ Suzuki T. (2023) *Rokkasho redux : Japan's never-ending reprocessing saga*, Bulletin of Nuclear Scientists [revue] <https://thebulletin.org/2023/12/rokkasho-redux-japans-never-ending-reprocessing-saga/#post-heading>

¹³⁹ Glaser et al. (2015) *Small Modular Reactors, an Energy Technology Distillate Nr3, Safety*, Andlinger Center / Princeton [fiches synthétiques, p.16]. <https://acee.princeton.edu/distillates/small-modular-reactors/>

¹⁴⁰ Pour rappel, la masse critique du plutonium est de **moins de 8 kg** pour fabriquer une bombe atomique simple.

¹⁴¹ Prasad S. et al (2015) *Nonproliferation improvements and challenges presented by small modular reactors*, revue. Progress in Nuclear Energy, (p.104 fig2.) Elsevier 80 (2015)102-109 https://irgc.org/wp-content/uploads/2018/09/Prasad-et-al_Nonproliferation-SMRs.pdf

5. Les SMR : le risque d'accident ne disparaît pas

Un petit réacteur n'est pas immunisé contre les accidents majeurs, qui restent un risque important. De même, ces systèmes doivent empêcher qu'un cœur nucléaire en fusion se répande dans l'environnement. Plusieurs problèmes sont posés : le vieillissement et la maintenance de ces chaudières plus compactes que les réacteurs de grande taille ; le danger des réacteurs mobiles ou embarqués sur un navire ; le risque accru des transports de matières nucléaires ou de pièces contaminées ; le risque de manque d'expertise de sûreté sur des réacteurs « clé en main ».

La question du risque d'accident est centrale pour l'acceptabilité des réacteurs. Les défenseurs des projets de petits réacteurs tentent de démontrer que leurs risques sont limités. En réalité, le risque d'accident ne disparaît pas, il est même multiplié pour certaines configurations de petits réacteurs envisagées. Pour l'Institut pour la Recherche et la Sûreté Nucléaire (IRSN), il n'y a pas lieu de revoir à la baisse les exigences de sûreté¹⁴².

1) La fusion du cœur a des conséquences similaires entre grands et petits réacteurs

Un point important pour la sûreté est le comportement du réacteur dans le cas d'un accident. Les réacteurs récents sont censés recueillir le "corium" issu du cœur en fusion, et l'empêcher de percer la dalle de béton ou de se répandre dans les nappes d'eau du sous-sol. Or un calcul réalisé par une équipe coréenne sur des petits réacteurs montre que cette hypothèse d'accident aurait des conséquences similaires pour un petit réacteur¹⁴³. En effet selon les auteurs, la masse du combustible va être dix fois inférieure pour un petit réacteur. Mais une fusion du cœur vers un dispositif de récupération du corium¹⁴⁴ va provoquer une cavité de même ordre de taille. Les réactions chimiques se produisent sur une surface similaire à celle du grand réacteur, et créent aussi le risque de bulle d'hydrogène ou de réactions et de percement des

¹⁴² IRSN (2021). *Note d'information sur la sûreté des réacteurs modulaires de faible puissance (Small Modular Reactors)*, Institut de Radioprotection et de sûreté nucléaire https://www.irsn.fr/sites/default/files/documents/actualites_presse/actualites/20211007_NI-SMR-102021.pdf

¹⁴³ Sang Ho K. et al.(2017) *Analysis of molten-corium concrete interaction for small modular reactor. Severe Accident and PHWR Safety Research Division*, [Annales de la conférence TopSafe 2017] Korea Atomic Energy Research Institute 989-111 Daedeok-daero, Yuseong-gu, Daejeon, 34057 – Republic of Korea. <https://www.euronuclear.org/archiv/topsafe2017/pdf/fullpapers/TopSafe2017-A0051-fullpaper.pdf>

¹⁴⁴ Note : le **corium** est le mélange de combustible et de matériaux fondus qui se déverse lors d'un accident de fusion de cœur

bétons. Il existe bien des stratégies pour prévenir les conséquences d'un accident sur un petit réacteur, dont les pistes sont dessinées, mais cela impose de traiter l'accident sur un petit réacteur comme pour un réacteur nucléaire classique.

2) Des risques très élevés pour les réacteurs dits « avancés »

La question de l'accident majeur se pose très différemment selon les réacteurs. Dans le cas de petits réacteurs à eau, les choix de sûreté se rapprochent de ceux des grands réacteurs. Pour les divers projets utilisant d'autres cycles, ces risques sont plus flous face à des descriptions encore schématiques des réacteurs et de leur fonctionnement. Ainsi, l'IRSN souligne que la plupart de ces concepts dits « avancés » font appel à des solutions techniques innovantes dont la faisabilité et l'efficacité restent à démontrer. Selon l'Institut, « en tout état de cause, seul un examen détaillé des choix et des hypothèses de conception permettrait d'évaluer les gains possibles en matière de sûreté par rapport à des réacteurs de puissance plus élevée »¹⁴⁵.

Dans son chapitre sur les petits réacteurs à « cycles avancés », le rapport nucléaire du MIT¹⁴⁶ insiste sur leur caractère d'irradiation extrême, même par rapport aux réacteurs classiques existants. Ces irradiations posent le problème de la résistance des pièces, des risques pour le personnel de maintenance, mais aussi des dangers multipliés en cas de situation accidentelle. Cela pose d'emblée la question de la robustesse de conception de ces réacteurs, mais aussi la difficulté d'inspection ou d'intervention en cas d'avarie sur des cuves, des pompes, des échangeurs de chaleur... Ces propriétés obligent à utiliser des quantités importantes de matériaux de confinement onéreux et posent la difficulté d'augmenter fortement la quantité de matériaux irradiés durant la vie d'un tel projet.

Le rapport du MIT¹⁴⁷ cite aussi des dangers de ces cycles, par exemple la réactivité du sodium avec l'eau, l'air, le béton pour le surgénérateur à sodium ; l'oxydation du graphite par l'air ou l'eau en cas de fuite d'hélium dans un réacteur haute température à gaz ; la réaction des sels fondus avec de l'air humide produisant des acides corrosifs (dans les réacteurs à sels fondus ou FHRs) ; une instabilité intrinsèque de certains systèmes de refroidissement au plomb ou au sodium ; une instabilité thermique des émanations liées aux produits de la fission dans les réacteurs à sels fondus... Tous ces problèmes rendent la maintenance puis le démantèlement très difficiles, sans oublier la difficulté de ne pas mettre en danger les travailleurs.

3) Un système de sûreté semi-passif qui ne suffit pas

De leur côté, les réacteurs à eau ressemblent aux réacteurs nucléaires classiques.. Une moindre puissance du réacteur a pour conséquence de limiter le besoin résiduel de refroidissement lors d'un arrêt d'urgence. Deux schémas de réacteurs proposés (NuScale aux États-Unis et NUWARD en France) sont même immergés en

¹⁴⁵ IRSN (2021). *Note d'information sur la sûreté des réacteurs modulaires de faible puissance (Small Modular Reactors)*, Institut de Radioprotection et de sûreté nucléaire (p.2) https://www.irsn.fr/sites/default/files/documents/actualites_presse/actualites/20211007_NI-SMR-102021.pdf

¹⁴⁶ Buongiorno J. et al.(2018) *The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World, an interdisciplinary MIT study*.(ch. 3 pp.59-69) <https://energy.mit.edu/research/future-nuclear-energy-carbon-constrained-world/>

¹⁴⁷ idem

permanence dans une piscine d'eau destinée à fournir un refroidissement sur une période de un à deux jours sans apport de l'extérieur du réacteur. Ce refroidissement serait ainsi en partie fourni de façon passive, au cas où les systèmes de sécurité du circuit primaire ne fonctionneraient pas. Les démonstrations manquent, mais il peut s'agir d'une part de conduction accrue via les parois de l'enveloppe du réacteur, ou encore de circulation naturelle de l'eau en *thermosiphon*¹⁴⁸. Mais cet avantage doit être relativisé en conditions accidentelles, par définition peu prévisibles. L'intégrité de la piscine devient alors un enjeu de sûreté très important. L'IRSN remarque dans une note de 2016 que « les performances d'un système de sûreté passif peuvent être particulièrement sensibles aux conditions d'ambiance (par exemple : une élévation de la température dans l'enceinte de confinement résultant d'un événement initiateur) ou aux agressions (aléa climatique, séisme...), compte tenu des faibles forces naturelles mises en jeu »¹⁴⁹.

4) Un risque plus élevé dans le cas de multiples réacteurs sur un même site

Selon Edwin Lyman de l'Union of Concerned Scientists, il faut d'abord distinguer les risques internes d'accident (rupture de tuyauterie...) et les causes externes (tremblement de terre, chute d'avion)¹⁵⁰. Les premières peuvent diminuer, mais pas les secondes. Dans ces derniers cas d'accident externe, le risque augmente même dans une centrale munie de multiples réacteurs sur un seul site, car un incident ou un accident sur l'un des réacteurs peut se propager aux autres unités, comme l'a montré la catastrophe de Fukushima¹⁵¹.

Or une partie du concept même de SMR est de multiplier les unités sur un même site. Par exemple NuScale veut multiplier par six ou douze le nombre d'unités sur un même site, tout en ne réalisant qu'une seule salle de commande combinée et en diminuant le nombre d'opérateurs pour limiter les coûts. Le risque pourrait bien au final être supérieur à une centrale de grande taille. C'est ce qu'admet un document sur la régulation des petits réacteurs édité par un groupe de travail des régulateurs membres de l'AIEA en 2019 sur les questions inhérentes à des centrales multiréacteurs¹⁵². Les SMR posent des questions de conception et de gestion accidentelle inédites. La position commune des régulateurs de l'AIEA est ainsi que la présence d'unités ou de modules multiples sur un même site pourrait exacerber les défis auxquels aurait à faire face le personnel de la centrale durant un accident. La gestion de plusieurs réacteurs dans une salle de commande commune ou un centre de service partagé (Shared

¹⁴⁸ Dans un circuit d'eau, la circulation peut être forcée par une pompe, ou elle peut se produire par **thermosiphon**, assurée par les différences de température et la gravité du fluide.

¹⁴⁹ IRSN (2016). *Eléments de réflexion sur les systèmes de sûreté passifs des réacteurs nucléaires* IRSN. https://www.irsn.fr/sites/default/files/documents/expertise/rapports_expertise/IRSN_Reflexion-Systemes-Surete-Passifs_01-2016.pdf

¹⁵⁰ Lyman E. (2013) *Small is not always beautiful*. Union of Concerned Scientists, ucs. Consulté le 20 mai 2023 <https://www.ucsusa.org/sites/default/files/2019-10/small-isnt-always-beautiful.pdf>

¹⁵¹ AIEA (21023) *Multi-unit Probabilistic Safety Assessment*, Safety Reports Series N°110 https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1974_web.pdf

¹⁵² SMR RF(2019). *Interim Report on Multi-unit/Multi-module Aspects Specific to SMRs*. SMR Regulators Forum. AIEA Vienne (pp.9-13) https://www.iaea.org/sites/default/files/19/12/smr_rf_dsa_interim_report.pdf



Service Center) multiplie également les risques au regard de « la sélection des événements déclencheurs, les dangers internes et externes, l'approche des systèmes partagés, la défense en profondeur, l'ingénierie des facteurs humains et l'évaluation des risques »¹⁵³. Comme l'accident de Fukushima nous l'a démontré, il est nécessaire « d'évaluer les risques liés aux sites d'une manière intégrée, ce qui inclut la prise en compte du potentiel d'accidents impliquant simultanément plusieurs installations »¹⁵⁴.

De même, l'Institut de Radioprotection et de Sûreté du Nucléaire (IRSN) estime que la plus grande compacité des projets permettra de fabriquer des pièces plus petites et plus fiables¹⁵⁵. Mais l'Institut note aussi que l'intégration de composants obtenus « sur étagère » crée le risque d'un approvisionnement basé sur des normes moins fiables.

5) Des composants plus compacts mais pas plus sûrs

L'intégration de composants plus compacts dans le circuit primaire très irradié pose aussi question selon Edwin Lyman de l'Union of Concerned Scientists (UCS)¹⁵⁶. En particulier, le générateur de vapeur (GV) très imbriqué avec la structure de la cuve du réacteur NuScale nécessiterait une circulation plus complexe dans l'échangeur en spirale, dont on ne connaît pas les impacts de long terme. L'usure d'un tel composant, désormais fixé à la cuve, induirait en cas de défaillance un arrêt complet de l'unité, alors que les GV des réacteurs à eau pressurisée (REP) actuels ont pu être échangés à maintes reprises. Ce serait aussi le cas pour les échangeurs à plaques proposés pour le projet français NUWARD, placés là aussi directement dans la cuve du réacteur près du cœur nucléaire.

6) Plus de soudures et de points critiques pour les pièces essentielles

Si l'on raisonne par kWh produit et non par réacteur, un problème est le nombre et la longueur des soudures et des points critiques dans les pièces essentielles comme la cuve ou les équipements primaires. Un équipement de petite taille va en effet nécessiter plus de matériaux (comme vu au chapitre précédent) et plus de soudures. Dans le cas du projet NUWARD de EDF, on utilise une cuve de même format que le réacteur 900 MW¹⁵⁷. De ce fait, les viroles cylindriques de la cuve du projet NUWARD vont avoir la même longueur de soudures que celles d'un réacteur de 900 MW pour une puissance cinq fois moindre, sans pour cela être réalisées dans de meilleures conditions de fabrication.

Une fois la phase du dessin passée, les constructeurs ne peuvent plus se cacher derrière le flou de leurs projets. C'est déjà le cas pour le seul modèle dont les plans ont été remis au régulateur des États-Unis, la Nuclear Regulatory Commission (NRC), pour le projet NuScale. Les critiques sont alors bien plus acerbes car un tel dessin et

¹⁵³ Idem

¹⁵⁴ Idem

¹⁵⁵ IRSN (2021). *Note d'information sur la sûreté des réacteurs modulaires de faible puissance (Small Modular Reactors)*, Institut de Radioprotection et de sûreté nucléaire https://www.irsn.fr/sites/default/files/documents/actualites_presse/actualites/20211007_NI-SMR-102021.pdf

¹⁵⁶ Lyman E. (2013) *Small is not always beautiful*. Union of Concerned Scientists <https://www.ucsusa.org/sites/default/files/2019-10/small-isnt-always-beautiful.pdf>

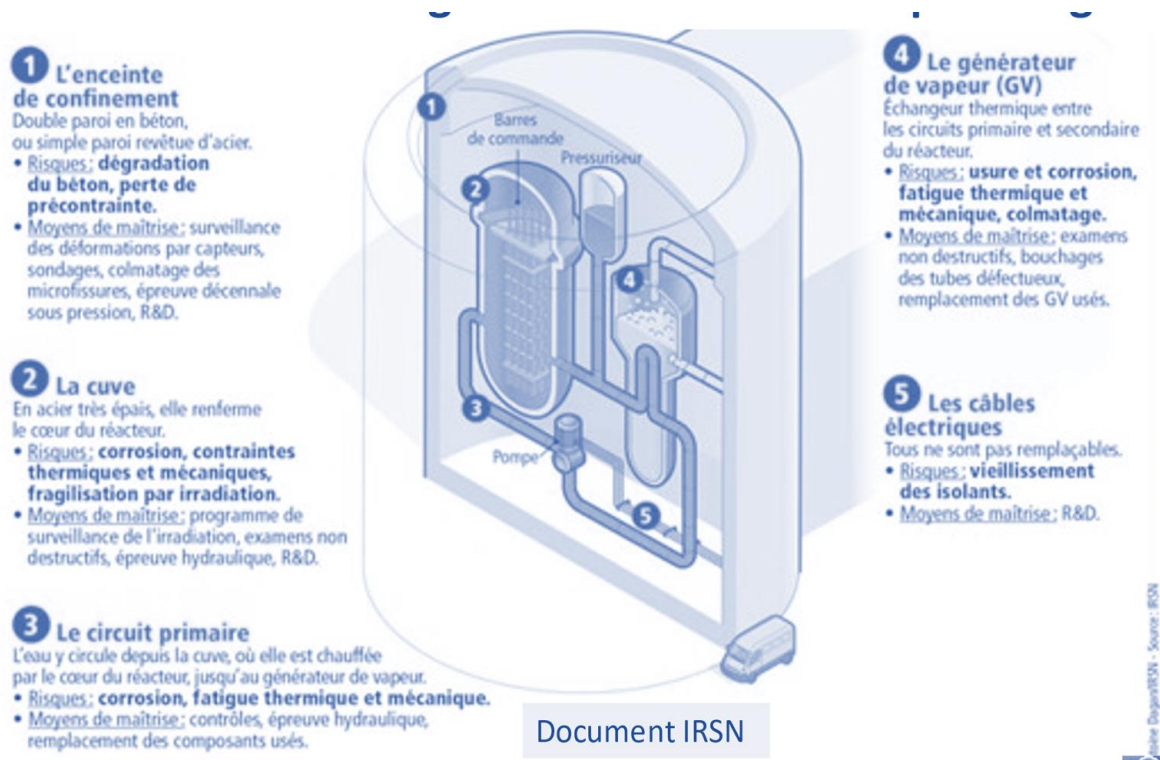
¹⁵⁷ Crampon C. et al (2021) Le SMR français NuwardTM sous les feux de la rampe [site internet consulté le 20 mai 2023] <https://www.sfen.org/rgn/smr-francais-nuwardtm-feux-rampe/>

les caractéristiques décrites dans un dossier d'autorisation montrent les compromis techniques parfois critiquables des concepteurs. Dans cet exemple, ils ont même ensuite retiré leur proposition¹⁵⁸.

7) Problèmes d'usure et d'étanchéité

Le vieillissement va être le même pour un petit réacteur à eau pressurisée, et nettement plus complexe pour des cycles avancés à base de métaux ou de sels fondus.

L'IRSN décrit les parties du réacteur qui vont avoir du mal à vieillir pour des installations existantes. Ces parties vulnérables sont les mêmes pour un petit réacteur, et dans plusieurs cas ces parties ne peuvent être remplacées comme la cuve :



Grphe (IRSN): Les parties vulnérables d'un réacteur au vieillissement. Les zones critiques du vieillissement des réacteurs sous pression¹⁵⁹

A ces usures « classiques » s'ajoutent les difficultés probables d'étanchéité sur le long terme. Les modèles "noyés" sont censés rester en permanence plongés dans l'eau. C'est le cas des deux projets de réacteurs NuScale et NUWARD déjà décrits, qui sont placés en permanence dans une sorte de piscine enterrée. De façon encore plus compliquée, le projet Flexblue (décrit plus haut) a été un temps proposé par DCNS, AREVA et le CEA. Il aurait été posé en permanence au fond de la mer. Ce projet

¹⁵⁸ Clark K.(2022) *Report claims "serious problems" with proposed NuScale SMR Power Engineering*, 2/18/2022 [article de presse] <https://www.power-eng.com/nuclear/report-claims-serious-problems-with-proposed-nuscale-smr/>

¹⁵⁹ IRSN (2014), *Les parties vulnérables d'un réacteur au vieillissement, savoir et comprendre*. Consulté le 10 mars 2022. <https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/surete/comment-est-anticipe-controle-surveillance-vieillesse-composants-dune>

annoncé en 2011 -et abandonné depuis- était basé sur le même principe que la coque d'un sous-marin nucléaire de 12 000 tonnes et 100m de long.

8) Le caractère mobile des SMR induit plus de sollicitations mécaniques et augmente les risques

Il est prévu de placer certains réacteurs sur une barge voire sur une remorque dans le cas d'un réacteur militaire¹⁶⁰. Or, ce caractère « embarqué » induit bien plus de sollicitations mécaniques qu'un projet fixe. De façon traditionnelle pour un moteur de camion par exemple, on va souvent considérer que la durée de fonctionnement sera nettement plus importante si l'engin est fixé au sol sur un banc que s'il circule sur route. Ainsi, les déplacements des petits réacteurs pourraient avoir un impact sur leur durée de fonctionnement.

La situation classique de tenue des composants en fatigue va en effet dépendre du nombre de cycles mécaniques et thermiques et de leurs amplitudes, combinées dans toutes les directions¹⁶¹. Les risques sont multipliés si la machine est placée en permanence sur un radeau, une barge ou un navire, ou transportée pour rechargement depuis une usine. Les contraintes combinées ont alors un impact sur les limites de rupture en fatigue, ce qui amène à prendre des marges de sûreté tout en conservant une incertitude accrue vis-à-vis de l'accident¹⁶². Le coût des réacteurs flottant serait ainsi plus cher de 50% à 100% par rapport aux projets équivalents à terre, selon une revue de 2023¹⁶³. Il existe de plus dans le cas d'une barge des risques accrus lors du vieillissement vis-à-vis de l'accident sous contrainte de houle¹⁶⁴ à cause de la propagation incertaine des fissures sous fatigue.

9) Risque accru dans les transports pour les matières nucléaires

La longueur totale des trajets, le nombre d'étapes et d'opérateurs impliqués dans les transports et le stockage provisoire sont multipliés dans un système comprenant plusieurs petits réacteurs pour une production électrique donnée.

Cette aggravation des risques se produit dans tous les cas envisagés pour l'introduction des petits réacteurs : le groupement de petits réacteurs sur un même site nucléaire existant, l'implantation dans de nouveaux sites plus isolés, la création de sites nucléaires dans des pays qui n'en disposent pas, et enfin l'introduction de types de combustibles différents.

¹⁶⁰ Lyman E. (2019) *The Pentagon wants to boldly go where no nuclear reactor has gone before*. Bulletin of Nuclear Scientists.[Article February 22, 2019] <https://thebulletin.org/2019/02/the-pentagon-wants-to-boldly-go-where-no-nuclear-reactor-has-gone-before-it-wont-work/#post-heading>

¹⁶¹ Gourgues Lorenzon (2008), *Comportement, endommagement et rupture par fatigue*. Cours ESMP, séance XXII 1-35

http://mms2.mines-paristech.fr/mat_paris/duree/polycop/Amphi_Fatigue_2008_poly.pdf

¹⁶²Rognon H. (2013) *Comportement en fatigue sous environnement vibratoire* [Thèse de doctorat, École Centrale Paris (ED287) et LISMMA (EA2336)] N°2013ECAP0009 https://theses.hal.science/tel-00864892v1/preview/memoire_these_Herve_Rognon2013.pdf

¹⁶³ Vinoya C. et al. (2023) *State-of-the-Art Review of Small Modular Reactors*, *Energies* 2023, 16, 3224. (p.17) <https://doi.org/10.3390/en16073224>

¹⁶⁴ Dong Y. (2022) *Review on uncertainties in fatigue loads and fatigue life of ships and offshore structures*, *Ocean Engineering*, Elsevier Volume 264, 112514 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801822017978>

Dans un pays déjà utilisateur du nucléaire, les petits réacteurs représenteraient une multiplication des trajets et des risques associés (attaque terroriste, accident, exposition aux radiations des passagers et du personnel dans les gares), tant pour le combustible neuf que pour les chargements usagés. Une centrale basée, par exemple, sur le projet NUWARD porté par EDF, devrait intégrer huit réacteurs (de 175 MWe) pour obtenir la même production qu'un seul gros réacteur nucléaire classique, par exemple de type N4-Civaux. Le nombre de colis à transporter augmente d'abord le risque total lors des manutentions, les rechargements, les transports de déchets même si ces trajets étaient regroupés.

À noter aussi le risque de multiplication du transport de combustible nucléaire par avion. Déjà, le combustible russe est fourni depuis le début de la guerre d'Ukraine par ce moyen à des pays dépendant de Rosatom pour leur approvisionnement, comme la Slovaquie¹⁶⁵. Selon le site d'information Euractiv¹⁶⁶, ces transports par une compagnie privée sont réalisés via le Belarus et la Pologne alors que l'espace aérien de ces pays est fermé aux avions russes. Toujours selon le site, le choix du combustible russe est avant tout économique, car l'alternative représentée par l'Américain Westinghouse est en général plus chère. Si l'on imagine une multiplication de petits réacteurs dispersés, le choix de l'avion prendrait alors encore plus d'intérêt économique pour des colis de plus petite taille, par rapport à l'organisation de convois terrestres internationaux.

S'il s'agit maintenant de pays jusqu'à présent dépourvus de centrales nucléaires, la dispersion des sites a pour conséquence de créer de nouveaux axes de transport, multipliant ainsi les risques d'accident et les zones concernées.

10) Un client « main propre » qui ne peut faire face aux situations accidentelles

Selon le centre Andlinger (Princeton)¹⁶⁷, les stratégies de rechargement en combustible varient entre les projets de petits réacteurs, mais essaient toutes de limiter les manipulations, par exemple en changeant tout le combustible avec une sorte de "cassette". Ce chargeur contiendrait l'ensemble des barres de combustibles, les gaines et les guides. Il serait alors changé entièrement à l'usine. Cela pourrait simplifier les opérations de rechargement en remplaçant les changements par tiers des grands réacteurs. Cependant, la consommation d'uranium serait alors bien moins homogène dans le réacteur. Cela demanderait au moins 50% d'uranium en plus au final. Une option serait alors de remanier les cœurs en usine puis de les utiliser sous forme déjà consommés partiellement. Au final, on recenserait plus de radioactivité à transporter et à manipuler, pour que le client final reste « les mains propres ».

De plus, les réacteurs "clés en main" limiteraient les compétences propres du client car sa technicité serait prise en charge de A à Z par le fournisseur. Dans un tel cas, la

¹⁶⁵ Nuclear Regulatory Authority of the Slovak Republic (2022). *Nuclear Security during the Transport* [Fiche juridique] <https://www.ujd.gov.sk/activities/regulatory-activities-over-raw-and-nm/supervision-of-nuclear-material-management/nuclear-security-during-the-transport/?lang=en>

¹⁶⁶ Hudec M. (2022) *Russian plane with nuclear fuel landed in Slovakia*, Euractiv. https://www.euractiv.com/section/politics/short_news/russian-plane-with-nuclear-fuel-landed-in-slovakia/

¹⁶⁷ Glaser A. et al. *Small Modular Reactors, an Energy Technology Distillate*, Andlinger Center / Princeton [fiches synthétiques]. <https://acee.princeton.edu/distillates/small-modular-reactors/>

livraison du combustible neuf, son retrait une fois irradié ainsi que celui des déchets, voire la maintenance, seraient assurés par le fournisseur. L'opérateur du réacteur pourrait être tenté de ne pas munir le site de toute l'expertise nécessaire à ces opérations. De telles lacunes de compétence locale sont problématiques face à des situations d'urgence.

L'avantage de ne plus avoir de manipulation des combustibles ou des déchets sur site, mais juste le transport du cœur nucléaire à l'usine est donné comme argument par le Ministère de l'Énergie des États-Unis¹⁶⁸ mais montre ainsi rapidement ses limites. Le personnel sur place devrait en effet être qualifié et entraîné. On peut imaginer une sorte d'assistance télécommandée, mais en cas de situation accidentelle une telle configuration est vite prise en défaut. La surveillance de milieux irradiés est rendue complexe par la difficulté ou l'impossibilité de disposer de capteurs fiables, par exemple dans un milieu chaud, acide voire de métal fondu.

De plus, même si l'absence de manipulation des combustibles permet de diminuer les risques d'irradiation du personnel, cela conduit à une moindre optimisation de l'usage du combustible. De telles stratégies de maintenance avaient été écartées pour les plus grands réacteurs.

Pour des réacteurs inspirés par ceux des sous-marins ou des navires de guerre, l'utilisation d'uranium plus enrichi pour augmenter l'intervalle entre les rechargements va alors accroître les risques de chaque transport. Un réacteur russe sur barge déjà installé dans le Grand Nord Sibérien, le KLT-40s a ainsi un taux d'enrichissement de 18,6%¹⁶⁹, et doit être changé en une seule fois tous les deux ans et demi. Il s'agit alors de cargaisons à risques qui naviguent en zone polaire.

La même question se pose pour des cycles dits « avancés ». Dans ces projets en effet, le combustible et les déchets seraient formés de matériaux encore plus radioactifs comme le plutonium, ou des sels fondus particulièrement corrosifs à base de fluor ou de chlore¹⁷⁰. Le refroidissement serait aussi assuré par des produits inflammables ou explosifs à l'air et à l'eau. C'est le cas pour le sodium envisagé dans les réacteurs surgénérateurs. Tous ces produits sont actuellement transportés dans des systèmes pouvant en principe résister à des accidents ou des incendies, par la route ou par le rail. Outre le danger représenté par ces flux supplémentaires de matières dangereuses, le coût des transports serait probablement multiplié à la fois pour les équipements et pour le coût des convois, de leur sûreté et de leur sécurité.

¹⁶⁸ DOE-Office of Nuclear Energy (2022). *Advanced Small Modular Reactors (SMRs) - benefits of Small Modular Reactors* [page internet consultée le 20 mai 2023] <https://www.energy.gov/ne/benefits-small-modular-reactors-smrs>

¹⁶⁹ AIEA (2022). *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*, ARIS-AIEA 2022 Edition. https://aris.iaea.org/Publications/SMR_booklet_2022.pdf

¹⁷⁰ Fontecave M. et al.(2022) *Les réacteurs nucléaires modulaires de faible puissance (SMR)*. Avis et rapport de l'Académie des Sciences (p.17). https://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/221020_SMR.pdf

6. Les SMR : plus de matériaux et plus de déchets

Dans un petit réacteur, la consommation de matériaux est multipliée pour une production donnée. La cuve du réacteur, la dalle de béton, les composants classiques ont besoin de mettre en œuvre deux fois, quatre fois voire plus de matière. De même la consommation de combustible est bien plus importante. La géométrie même des réacteurs explique ces besoins élevés en matériaux, et elle empêche d'emblée un abaissement des coûts. Pour les réacteurs dits « avancés », les détails manquent mais les contraintes comme la radioactivité, les acides forts, les hautes températures concourent à une difficulté extrême de mise en œuvre de matériels fiables et garantis.

Pour une production d'énergie donnée, un petit réacteur produit plus de combustible irradié et plus de matériaux contaminés dans ses structures. Cette contrainte dimensionnelle a pour conséquence la production de plus de déchets dangereux et un démantèlement plus complexe.

1) Des cuves similaires à celles des réacteurs classiques, mais à puissance plus faible

Le réacteur nucléaire, en particulier celui fonctionnant à l'eau pressurisée ou bouillante, ressemble à une sorte de chaudière cylindrique. Durant de longues années, ce cylindre doit résister à des sollicitations extrêmes combinant l'abrasion, les chocs thermiques, la radioactivité et la pression. Si l'on ne considère que cette dernière, la géométrie est particulièrement défavorable aux plus petites tailles de chaudières. La cuve du réacteur est la pièce la plus critique et ne peut être changée durant la vie du réacteur. C'est aussi - et de loin - celle qui coûte le plus cher.

En effet, pour une même pression, si l'on divise par deux les dimensions de la chaudière (hauteur et diamètre) on va diviser par huit sa puissance. La surface est dans cet exemple divisée par quatre. On va retrouver ces proportions entre les centrales françaises de tailles différentes, par exemple entre Fessenheim (880 MW) et Chooz (1450 MW) : la construction de cette dernière va ~~consommer~~ utiliser 15% de matériaux de moins dans sa cuve par kWh produit (voir tableau ci-dessous). Cet avantage -en principe- des plus grands réacteurs a jusqu'à présent incité les constructeurs à produire toujours plus gros. Ce mécanisme de gain de taille a abouti à l'EPR de Flamanville, dont la cuve est 20% moins massive par kW de puissance. Ce gain théorique s'est payé par un gigantisme qui a posé d'importants problèmes lors de la fabrication et de la construction.

Comparaison des cuves des réacteurs classiques français¹⁷¹

Type de réacteur	Unité	CP0	CP1	P'4	N4	EPR
Puissance	MW	880	910	1300	1450	1700
Diamètre intérieur cuve	mm	3988	3988	4394	4486	4885
Épaisseur cuve (virole)	mm	200	200	220	225	250
Nombre de viroles		3	2	2	2	2
Hauteur des viroles	mm	1479	2370	2383	2370	2362
Masse de la cuve	tonnes	330	330	440	460	510
Comparaison de masse avec le REP900	Ratio	1	0,97	0,90	0,85	0,80

Source IRSN 2013 calculs E&E Consultant

En réalité, au-delà du handicap de taille des petits réacteurs, les constructeurs choisissent plutôt de prendre des marges importantes par rapport aux grands réacteurs.

- D'une part, les autorités de sûreté imposent des exigences dimensionnelles plus importantes après chaque accident : Three Miles Island (1978), Tchernobyl (1986), Fukushima (2011).
- D'autre part, la construction de la cuve obéit à des procédés complexes, similaires quelle que soit la taille de la chaudière : il serait difficile de forger la pièce la plus sollicitée pour la radioactivité, la virole¹⁷², en divisant son épaisseur tout en conservant ses propriétés métallurgiques ; de même, la totalité de la surface intérieure des cuves est revêtue d'acier inoxydable de 8 mm d'épaisseur soudée en deux couches contre la corrosion.

Au final, les promoteurs du NUWARD français ont choisi d'équiper leur petit réacteur de la même taille de cuve que les réacteurs de grande taille du type 900 MW. Sa cuve va donc être aussi massive que celle d'un tel réacteur « classique », soit 310 tonnes. Ce chiffre a été déclaré par les porteurs du projet à l'AIEA, alors que sa puissance électrique annoncée est plus de cinq fois moins importante. Ce poids est aussi celui annoncé pour le transport à vide de la cuve¹⁷³.

Pour un autre petit réacteur dont les dimensions sont connues, le NuScale, ce déséquilibre va être encore plus important, de l'ordre d'un facteur quinze, notamment pour suivre les exigences élevées du régulateur des États-Unis, la NRC. On retrouve

¹⁷¹ IRSN (2013) *Principales caractéristiques de conception, de fabrication et de contrôle des cuves des réacteurs nucléaires français* [site consulté le 20 mai 2023] <https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/surete/principales-caracteristiques-conception-fabrication-contrrole-cuves>

¹⁷² Note : les **viroles** sont des pièces cylindriques forgées puis mises bout à bout par soudage pour former la cuve. Elles sont au nombre de deux ou trois.

¹⁷³ AIEA (2019) *Status Report – NUWARD Base ARIS-AIEA* https://aris.iaea.org/PDF/F-SMR_2020.pdf

un ratio similaire pour la proposition d'un petit réacteur dérivé de la propulsion des brise-glaces russes, comme le montre le tableau ci-dessous. Dimensions et masses sont celles déclarées par les porteurs de ces projets auprès de l'AIEA ou des autorités de sûreté. Ces masses sont comparées aux réacteurs de plus grande taille existants comme le REP 900 MW:

Comparaison des cuves entre petits et grands réacteurs					
Type de réacteur		900 MW	NUWARD	NuScale *	RITM-200M
Puissance	MW	880	170	60	50
Diamètre intérieur cuve	mm	3988	4000	2700	3450
Masse de la cuve	tonnes	330	310	343	265
Masse comparée avec 900 MW	ratio	1,00	4,86	15,24	14,13
E&E Consultant 2023 avec AIEA, NRC et IRSN. *Nuscale 60 correspond au dessin soumis en 2017 à la NRC					

Cette géométrie est donc très défavorable aux plus petits réacteurs. Elle a des conséquences sur la consommation de matériaux, mais aussi sur les coûts ou encore sur la sûreté face à l'accident :

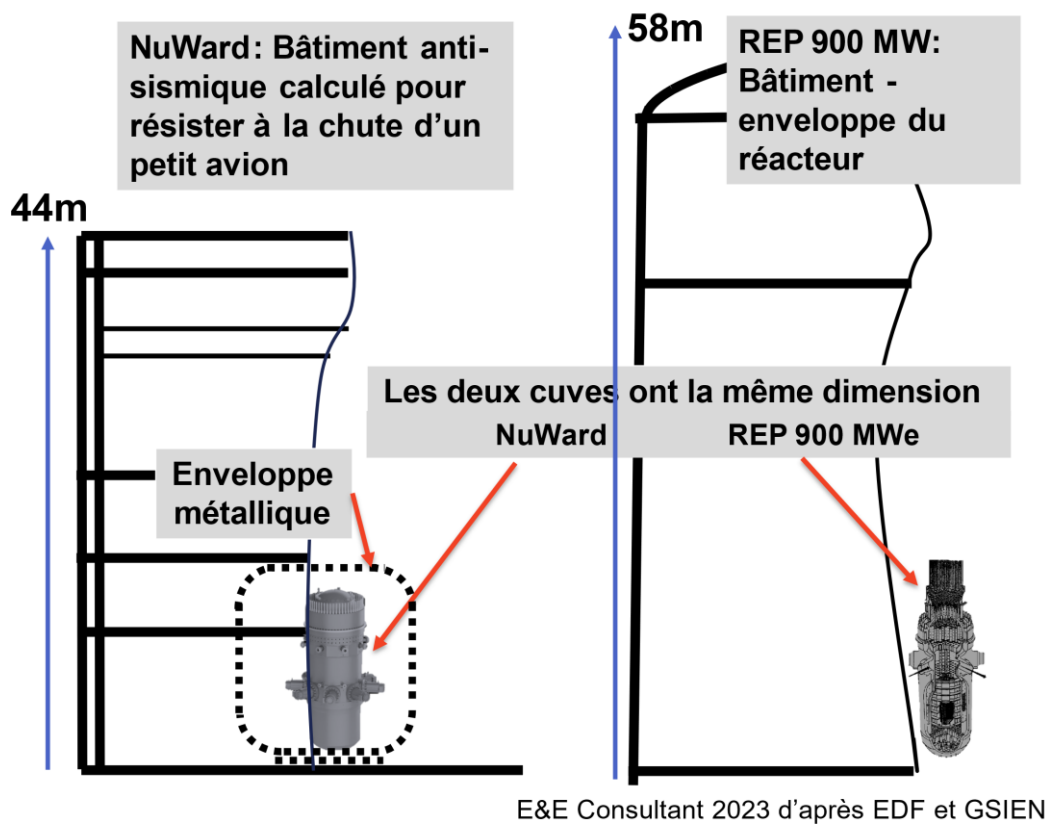
- D'une part les coûts de fabrication et de construction, ainsi que l'approvisionnement en matériaux vont augmenter fortement ainsi que les émissions indirectes.
- D'autre part, vont aussi augmenter la longueur des soudures les plus critiques, comme celles des viroles qui composent le centre de la cuve. Celles-ci subissent des sollicitations importantes (thermiques, radioactives...), et aussi des forces mécaniques allant jusqu'à 175 bars (17,5 MPa) à une température de 350°C. Ces contraintes sont considérables et elles seront en gros les mêmes entre gros et petits réacteurs pour une production divisée.
- Enfin, la masse de la cuve sera un paramètre important pour la production de matériaux irradiés durant le cycle de fonctionnement jusqu'au démantèlement et donc de la production des déchets.

2) Davantage de matériaux nécessaires pour le reste de la centrale

Pour le reste du réacteur, il est bien entendu difficile d'évaluer des SMR dont nous avons peu de détails. On peut cependant comparer, d'une part les schémas des bâtiments abritant les petits réacteurs avec l'enceinte en béton de leurs homologues

REP 900, d'autre part la configuration des circuits primaires des réacteurs, là aussi à partir des schémas publiés notamment par l'AIEA¹⁷⁴.

Le schéma ci-dessous compare à l'échelle les deux bâtiments, tous deux prévus pour résister à des secousses sismiques voire à des chutes de petits avions. Le bâtiment du NUWARD n'est pas à proprement parler une « enceinte », car le petit réacteur est aussi entouré d'une enveloppe métallique censée, elle, être étanche. Mais sa complexité reste très élevée, car ce bâtiment est enterré. Il comprend surtout des piscines dont l'étanchéité doit résister à des séismes ou des explosions. Selon les schémas disponibles, il est un peu moins haut (44m contre 58m pour le REP900) mais à proportion de la puissance trois fois inférieure de ses deux réacteurs il représenterait une masse de matériaux nettement plus élevée :



Comparaison de la configuration des réacteurs NuWard et REP 900.

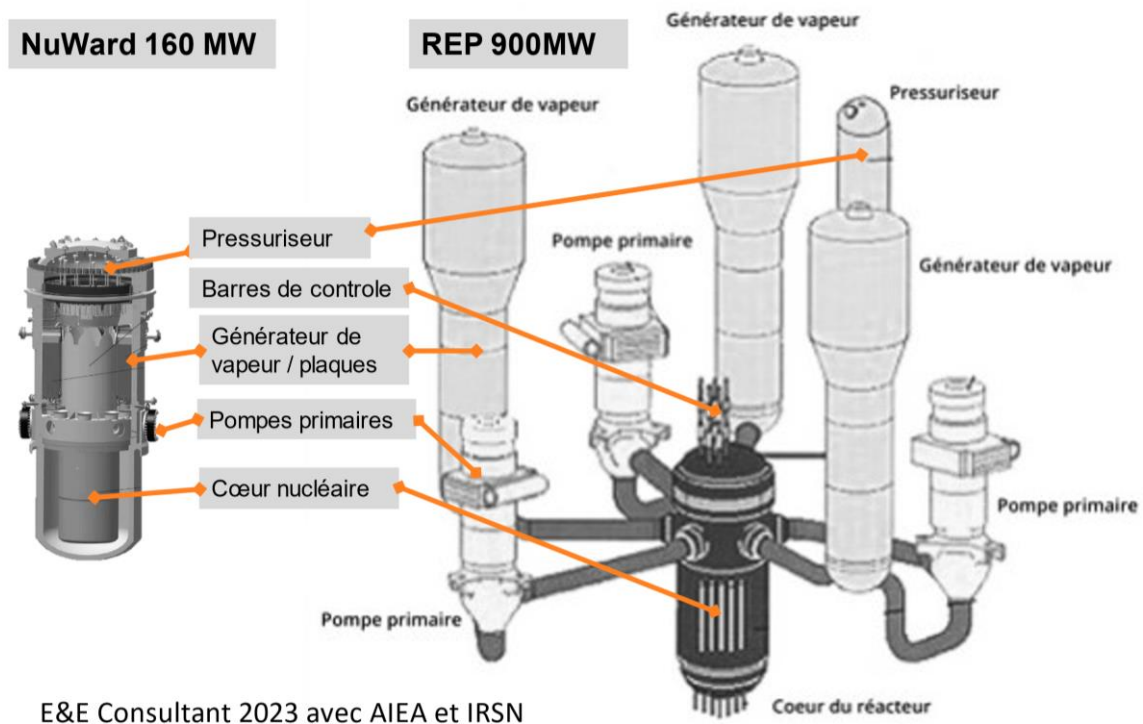
Considérons maintenant les autres composantes du circuit primaire. Les générateurs de vapeur utilisés dans les réacteurs classiques pèsent 465 tonnes chacun... soit un total de 1395 tonnes pour un réacteur de 900MW. C'est le composant le plus massif du système. Le total des éléments de l'îlot nucléaire (cuve, conduites primaires, pompes, pressuriseur...) représente une masse d'acier de l'ordre de 5912 tonnes pour

¹⁷⁴ AIEA (2020) *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments Supplement* dans *Advanced Reactors Information System (ARIS) 2020 Edition* (p.89) https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf

un réacteur de 900 MW, selon l'étude ACV 2022 réalisée par EDF sur le parc nucléaire existant¹⁷⁵.

Dans le cas du petit réacteur américain NuScale nous disposons - via le dossier de l'autorité de sûreté de la NRC - de la masse d'ensemble du module soit 762 tonnes¹⁷⁶. Par comparaison avec un réacteur REP 900MW de EDF, le rapport des masses totales des composants primaires est donc de 7,7, pour une puissance quinze fois inférieure du NuScale (60 MWe) selon le dossier déposé en 2017 et retiré ensuite¹⁷⁷. Pour une puissance donnée, la masse des composants de l'îlot nucléaire sera donc environ le double pour le petit réacteur.

Dans le cas du projet de réacteur français NUWARD, le système vise à remplacer pour partie les plus grandes pièces des systèmes actuels (générateur de vapeur et pressuriseur en particulier), par des composants intégrés dans la cuve. Sur cette partie du circuit (hors de la cuve), les masses sont donc moins importantes dans le petit réacteur, comme le montre le schéma suivant, qui compare les deux dispositions de ces éléments du circuit primaire :



Cette compacité est accentuée par le fait que le générateur de vapeur du REP900 en acier spécial à base de nickel est remplacé par un échangeur à plaques. Le projet prévoit au total l'utilisation de 160 plaques de titane fixées, soudées ou bridées à

¹⁷⁵ EDF R&D (2022), *ACV du kWh nucléaire EDF*. EDF Moret sur Loing 6125-2406-2022-01204-FR (p.74) <https://www.edf.fr/groupe-edf/produire-une-energie-respectueuse-du-climat/lenergie-nucleaire/notre-vision/analyse-cycle-de-vie-du-kwh-nucleaire-dedf>

¹⁷⁶ Nuscale Power (2016) *The NuScale Design*, PM-0616-49510-NP(p.29) [document public NRC] <https://www.nrc.gov/docs/ML1616/ML16161A723.pdf>

¹⁷⁷ AIEA (2020) *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments Supplement* dans *Advanced Reactors Information System (ARIS) 2020 Edition* (p.89) https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf

l'intérieur de la cuve¹⁷⁸. Ce système est rendu redondant par des échangeurs supplémentaires en cas d'incident.

De telles pièces de transfert thermique sont de forme et de matériaux encore inédits dans les réacteurs commerciaux, comme ceux en forme d'hélice du projet NuScale. Leur positionnement au cœur du réacteur peut suggérer une plus grande vulnérabilité de ces systèmes. En effet, les générateurs de vapeur existants dans les REP depuis les années 80 ont dû être régulièrement changés suite à des colmatages et à des fissurations, ce qui n'était pas prévu à l'origine. Ils sont remplacés par des ensembles accolés à la cuve, et donc moins accessibles et plus irradiés. Or ce sont des pièces particulièrement sollicitées dans un environnement dynamique, chaud et radioactif. La maintenance de tels ensembles sur une durée de vie affichée de 60 ans peut sembler une gageure. Un autre défi de maintenance dans le cas du NUWARD est le mécanisme de contrôle des barres du réacteur nucléaire, entièrement noyées et intégrées dans la cuve du réacteur. Ici aussi, le défi de la maintenance d'un tel système sur une très longue période est important.

Les parties classiques demandent aussi nettement plus de matériaux

Selon les descriptions des deux constructeurs, le reste du système des petits réacteurs est de conception classique et utilise les fournitures « sur étagère ». Dans le cas du NuScale, il y a une turbine à vapeur et une génératrice pour chaque réacteur, afin de limiter le risque de mauvais fonctionnement lié à un arbre commun à plusieurs réacteurs. Sur cette partie, il y a donc perte de l'avantage de la taille sur les machines tournantes. Celles-ci représentent la majorité des aciers et des autres métaux des parties classiques du réacteur.

Selon l'étude de cycle de vie (ACV) réalisée par EDF en 2022 pour un réacteur « classique » 900 MW ceci représente 11 500 tonnes d'acier dont l'ensemble turbine-alternateur, le condenseur et les autres composants (tuyauteries). Pour estimer le surcroît de masse du petit réacteur, une manière simplifiée classique dans l'industrie¹⁷⁹ est d'utiliser un facteur d'effet de taille. Selon cette formule, un doublement de taille d'une machine tournante va entraîner une baisse de coût unitaire de 1,52 liée pour l'essentiel au poids des composants (exposant de 0,6).

Pour l'exemple du NuScale (60 MW) cela représente un facteur cinq sur la partie non nucléaire, soit cinq fois plus de matériaux pour le petit réacteur. Le réacteur du projet NUWARD (170 MW X 2) est nettement plus grand. L'augmentation de masse de la partie classique ne sera ainsi que de 2,7 et même de 1,8 si les turbines-génératrices étaient regroupées ce qui n'est pas le cas selon le schéma déclaré à l'AIEA¹⁸⁰. Ce dernier choix diminuerait le coût et la masse de l'ensemble, mais il complique le

¹⁷⁸ Ruggieri J.-M. (2022) *Les enjeux des SMR et le projet NuWard*, CEA de la Recherche à l'Industrie (p.6) [présentation] https://jtsfp2022.sciencesconf.org/data/pages/SFP_18_mars_2022_SMR.pdf

¹⁷⁹ Ramana (2021). *Small Modular and Advanced Nuclear Reactors* IIEE Access. vol.9. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9374057>

¹⁸⁰ AIEA-ARIS (2020) *NUWARD Base AIRS* (p.12) aris.iaea.org/PDF/F-SMR_2020 <http://aris.iaea.org/PDF/F-SMR_2020>

fonctionnement opérationnel du réacteur. Au final, , les composants classiques du petit réacteur sont bien plus importants pour une production donnée que ceux du grand réacteur sur une partie très gourmande en matériaux : dans le cas d'un réacteur 900 MW, la partie classique comprend en effet deux fois plus d'acier que l'îlot nucléaire (11.200t contre 5.912t).

Estimation du facteur de taille des parties classiques par rapport au réacteur 900 MW

	Nuscale	NUWARD(1)
Puissance de référence	900	900
Puissance électrique	60	170
Ratio de puissance	15,0	5,3
Ratio d'effet de taille	5,1	2,7
E&E Consultant 2023 (1) Turbines séparées		

3) Des proportions en défaveur des SMR pour le génie civil et les dalles de béton

Le génie civil et les dalles de béton constituent l'autre grande partie de la construction d'un tel projet. Le ciment et l'acier de ferrailage représentent le premier poste de consommation du chantier, selon l'ACV de EDF publié en 2022. La construction du réacteur de 900 MW met en oeuvre 199 000 tonnes de ciment et 33 000 tonnes d'acier, pour moitié destinés au ferrailage et à des équipements de renfort.

Ici aussi, les proportions sont, de façon similaire, en défaveur des petits réacteurs. Il faudra distinguer d'abord la partie proprement nucléaire. Le radier en béton armé¹⁸¹, c'est-à-dire le socle, est de loin la partie la plus complexe et la plus dense en armatures métalliques. Selon le MIT le béton représente 25% du coût des réacteurs classiques, avec des armatures sur la partie nucléaire pouvant aller jusqu'à 35% de l'acier utilisé au total. Ces bétons spéciaux, beaucoup plus travaillés et ferrillés, reviennent deux fois plus cher que les autres bétons, voire parfois plus.¹⁸²

Pour cette partie de soubassement, l'épaisseur sera environ deux fois moins importante pour un petit réacteur que pour un grand, pour faire face à des efforts de densité moindre, selon le dirigeant d'un cabinet spécialisé sur les fondations

¹⁸¹ Note : Dans la construction d'un immeuble, d'un barrage ou d'une centrale électrique, le **radier** est une plateforme maçonnée qui est la base de départ d'un bâtiment et qui sert d'assise stable à l'ensemble de la construction.

¹⁸² Buongiorno J. et al. (2018). *The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World: An Interdisciplinary MIT Study*. Massachusetts Institute of Technology, Energy Futures (pp.64-65) <https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2018/09/The-Future-of-Nuclear-Energy-in-a-Carbon-Constrained-World.pdf>



nucléaires¹⁸³. Dans les deux exemples français et américain, cela représenterait proportionnellement encore cinq à quinze fois l'épaisseur de béton consommé. La quantité de béton unitaire dépendra de la surface occupée par le ou les petits réacteurs, selon la configuration des équipements et la distance entre les tranches. Au final, cela représente deux à quatre fois plus de matériaux par kWh pour la partie nucléaire selon l'emprise au sol.

En plus de la dalle « nucléaire », les besoins en béton peuvent aussi être très élevés pour réaliser les semelles de liaison avec le sous-sol rocheux. La base du réacteur est en effet reliée au sol par des dispositifs antisismiques. Avant de construire cette partie de l'équipement, il faut déblayer une quantité importante de matériaux pour obtenir une couche stable sur laquelle on crée une semelle de béton qui peut dépasser 12 à 28 m d'épaisseur sur certains sites. Cette partie est spécifique au site et non au modèle de centrale, de même que les routes de liaison, les digues maritimes de protection, les émissaires et les canaux d'amenée d'eau, etc.). La communication des cimentiers eux-mêmes raconte d'ailleurs une histoire assez différente de celle de l'ACV d'EDF. Ils intègrent ainsi non pas le seul îlot nucléaire mais tout un ensemble de routes, de viabilisations, de défenses côtières notamment.

Au final, une quantification globale est difficile. On peut cependant affirmer que les besoins en matériaux mais aussi leur mise en œuvre sont toujours très supérieurs à celle des plus grands réacteurs pour une puissance donnée. En résumé pour les deux réacteurs américain et français décrits plus haut, la multiplication des besoins est significative par unité de puissance :

- Par un facteur quinze (NuScale) ou quatre (NUWARD) pour la cuve métallique du réacteur
- Par un facteur deux (NuScale) ou une fois et demi (NUWARD) pour l'ensemble du circuit primaire
- Pour les bâtiments et les parties classiques des réacteurs, le ratio lié à la multiplication d'équipements plus petits serait de cinq pour le NuScale et d'un peu moins de trois pour le NUWARD
- Enfin, les importantes fondations anti-sismiques représenteraient sept fois plus de matière pour le NuScale et deux fois et demi plus pour le NUWARD.

Ces facteurs sont des estimations puisque les projets de petits réacteurs ne sont pas encore détaillés. Ils recourent cependant bien l'estimation déjà citée d'un investissement double ou triple pour la construction de petits réacteurs par rapport à celui des réacteurs de grande taille pour une puissance donnée.

Cette exploration nous permet aussi de confirmer la part élevée du génie civil et des parties soudées (tuyauteries, armatures) réalisés sur site. Ce point est d'abord un facteur de coût élevé. C'est aussi le symptôme d'un équipement réalisé en grande partie sur chantier, peu favorable aux gains sur la construction en série.

¹⁸³ Rizzo P. (2017). *Preparation of Rock for Supporting a Nuclear Power Plant Foundation*, Topsafe 2017 [conférence et entretien avec l'auteur] <https://www.euronuclear.org/archiv/topsafe2017/pdf/fullpapers/TopSafe2017-A0093-fullpaper.pdf>

4) Besoins en matériaux des autres types de réacteurs

Les autres types de réacteurs sont décrits de façon encore moins précise. Ainsi en général, la taille des cuves n'est pas donnée par l'AIEA, mais seulement des schémas sommaires fournis par les promoteurs des SMR. Sur la question des matériaux, plusieurs arguments suggèrent que ces réacteurs ne seraient pas non plus économes en matériaux de construction. Trois idées pour étayer ce raisonnement :

- Tout d'abord, des propositions de réacteurs fonctionnant avec un refroidissement au gaz supposent des équipements de tailles beaucoup plus importantes que ceux fonctionnant à la vapeur et à l'eau liquide.
- Ensuite, les tentatives de construction d'un réacteur fonctionnant à moindre pression, par exemple avec du sodium ou du plomb, n'ont pas abouti à un réacteur beaucoup plus compact, comme le montre ci-dessous l'exemple du réacteur Superphénix.
- Enfin, la caractéristique des réacteurs à cycles dits « avancés » est de faire appel à des niveaux élevés de radioactivité et donc à des sollicitations très importantes des matériaux (voir plus loin).

De façon plus précise, on remarque la taille importante des réacteurs à gaz (HTR). Selon l'AIEA, les cuves de ces réacteurs font de 4 à 8 mètres de diamètre, et surtout elles ont une hauteur de 12 à 30 mètres¹⁸⁴. Cela suppose des masses de matériaux plutôt imposantes, là aussi supérieures à celle des réacteurs nucléaires classiques pour une puissance donnée.

Les réacteurs au sodium ou au plomb (LFR ou SFR) annoncent des fonctionnements à faible pression et des densités de puissance des fluides nettement plus élevées. Mais les cuves sont là aussi de dimensions imposantes pour des puissances limitées (100-300 MW).

Pour cela, on prendra dans le passé l'exemple du réacteur de grande taille Superphénix (1200 MW). Selon ses constructeurs¹⁸⁵ il comprend un bâtiment de 130 000t pour les machines, un autre de 117 000t pour les auxiliaires dont les générateurs de vapeur, et 175 000t pour le bâtiment réacteur y compris le radier. Ces charges représentent un total de 367 000 tonnes. Nous pouvons comparer ce total aux matériaux du réacteur et des équipements considérés par l'ACV de EDF, soit un total de 199 108 tonnes de béton, et de 50 000 tonnes d'acier. En proportion du réacteur REP 900 MW, Superphénix contient ainsi un peu plus de matériaux (+10%), ce qui suggère qu'un plus petit réacteur de ce type consommerait -comme pour les réacteurs à eau- bien plus de matériaux pour une puissance donnée.

¹⁸⁴ AIEA (2020). *Comparison of Main Characteristics among High Temperature Gas-cooled SMR Designs*. SMR Booklet 2020 (p. 320). https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf

¹⁸⁵ Costaz J.-L.(1987) *Fondation des centrales nucléaires, French nuclear power plants foundations*. E.D.F., S.E.P.T.E.N. *<https://www.geotechnique-journal.org/articles/geotech/pdf/1987/04/geotech1987041p7.pdf>



5) Quelle résistance des SMR aux neutrons ?

Dans le cas de la cuve et des circuits primaires, les réacteurs à cycle dits « avancés » poseraient non seulement la question des quantités mais aussi de la nature des matériaux eux-mêmes. Ils seraient beaucoup plus sollicités par les radiations.

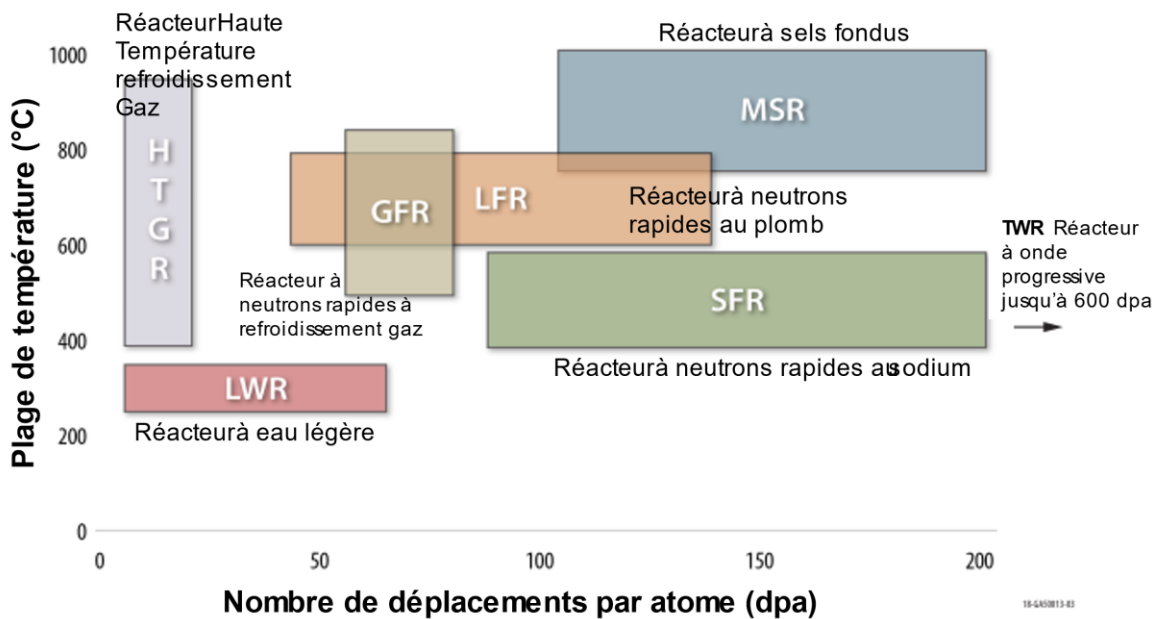
En effet, les pièces des centrales nucléaires doivent résister à la pression mécanique, thermique et neutronique durant des périodes longues. Les contraintes mécaniques, les chocs et les variations thermiques sur les cuves, les gaines de combustible, et les circuits primaires, s'ajoutent à l'irradiation des matériaux. Le cumul des irradiations se mesure en nombre de déplacements par atome (nombre de DPA). Le dommage d'irradiation modifie la structure du matériau et entraîne une détérioration de ses propriétés initiales.

Les réacteurs subissent aussi la corrosion sous contrainte chimique, notamment ceux dits aux « sels fondus ». Ceci est illustré par le graphe suivant qui synthétise la sollicitation neutronique et thermique dans les différents types de réacteurs¹⁸⁶ Il présente en ordonnées les plages de température, et en abscisses les niveaux d'irradiation. Les réacteurs « sels fondus » et ceux à neutrons rapides y sont plus sollicités que les réacteurs classiques à eau. De même, le projet de réacteur « à onde progressive » proposé par Terra-Power et soutenu par Bill Gates est renvoyé très au-delà de l'échelle du graphe.

¹⁸⁶ Buongiorno J. et al. (2018). *The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World: An Interdisciplinary MIT Study*. Massachusetts Institute of Technology, Energy Futures (pp.64-65) https://www.hbs.edu/ris/Publication%20Files/The-Future-of-Nuclear-Energy-in-a-Carbon-Constrained-World_62558c01-8747-4fc8-a026-9d62032488a9.pdf



Plage de température (°C) et de déplacements des atomes (dpa)



LWR (Light Water Reactor) Réacteur à eau légère

HTGR (High Temperature Gas-cooled Reactor)

MSR (Molten Salts Reactor) Réacteur à sels fondus

SFR (Sodium Fast Reactor) Réacteur à neutrons rapides au sodium

LFR (Lead Fast Reactor) Réacteur à neutrons rapides au plomb

GFR (Gas-cooled Fast Reactor) Réacteur à neutrons rapides à refroidissement gaz

TWR (Travelling Wave Reactor) Réacteur à onde progressive

MIT 2018 – Traduction E&E

Graphe MIT (2018) Consultant

Le graphe suggère ainsi une difficulté considérable pour mettre en œuvre les réacteurs à cycle dit « avancés ». Par rapport aux pièces mécaniques utilisées dans les REP, déjà soumises à rude épreuve et causes de nombreux problèmes, les autres cycles sont encore bien plus sollicités du point de vue thermique et neutronique. Par surcroît, certains cycles fonctionneraient aussi en milieu particulièrement acide comme celui à sels fondus.

6) Une empreinte carbone supérieure à celle des réacteurs plus grands ?

Enfin, un autre indicateur des masses plus importantes des petits réacteurs vient des estimations sur les bilans carbone. Une estimation réalisée par le professeur Vinoya de l'Université Lasalle de Manille (Philippines), plutôt favorable aux petits réacteurs, suggère une empreinte plus que double vis-à-vis des grands réacteurs et des alternatives renouvelables¹⁸⁷. Cette estimation est cependant entachée d'une grande incertitude vu l'absence de description du "petit nucléaire" (qui n'existe pas sous forme opérationnelle). La synthèse de littérature effectuée par le professeur Vinoya place la médiane des études d'impact carbone des SMR à 30 gCO₂/kWh, contre 12 à 20 pour l'éolien ou le nucléaire classique. Cet impact nettement supérieur aux autres sources est à imputer d'une part à une plus grande quantité de matériaux, d'autre part aux

¹⁸⁷ Vinoya, C-L. et al. (2023) *State-of-the-Art Review of Small Modular Reactors*. MDPI Energies 2023, 16, 3224. (chap.3.5.4 fig.9) <https://doi.org/10.3390/en16073224>

rendements moindres des parties nucléaires pour une quantité de combustible donnée.

7) Géométrie : la fuite des neutrons et ses conséquences

Quel que soit son cycle, un réacteur nucléaire de petite taille va produire plus de déchets pour une production d'énergie donnée. Ce résultat peut être surprenant selon l'argumentaire entendu généralement en faveur des petits réacteurs. Lindsay Krall, une chercheuse de l'Université Stanford¹⁸⁸ a montré que le volume et le risque des déchets nucléaires vont augmenter d'un facteur deux à trente par unité d'énergie pour les petits réacteurs étudiés. Ce résultat provient de deux facteurs, l'un géométrique et l'autre lié aux cycles nucléaires envisagés.

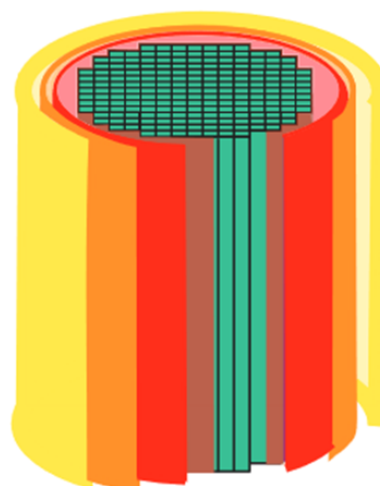
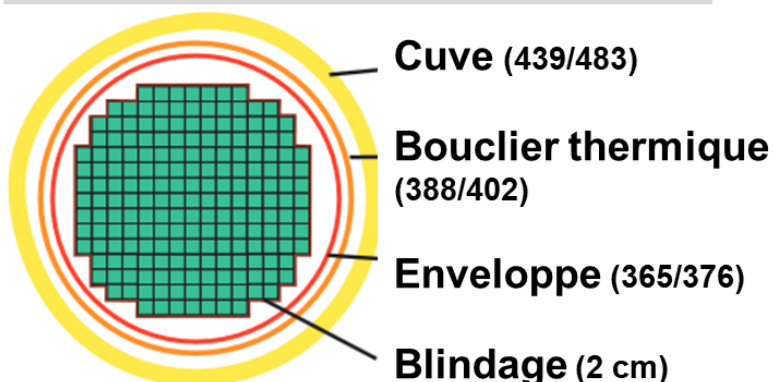
La réaction nucléaire repose en effet sur un cœur de matières nucléaires, dont la fission (les atomes se brisent) produit des neutrons, captés à leur tour par d'autres atomes du cœur. Le schéma ci-dessous illustre cet effet sur un petit réacteur. Il compare les géométries -à l'échelle- d'un petit et d'un grand réacteur.

Provisoire / Draft

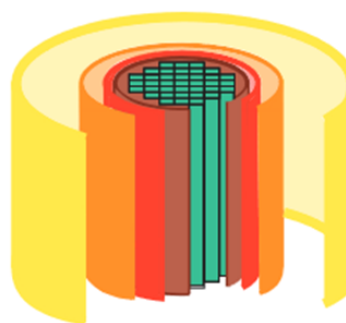
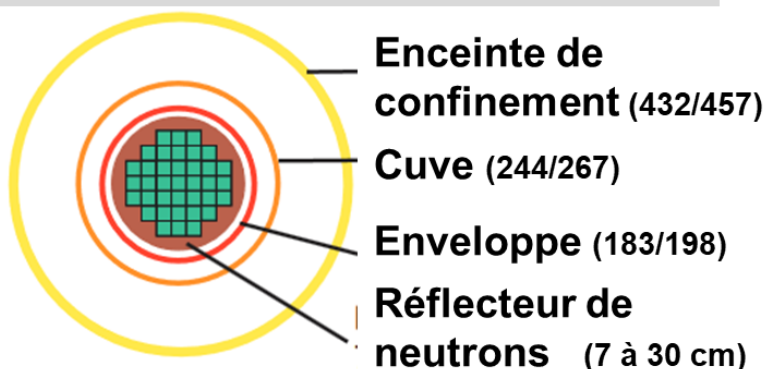
¹⁸⁸ Krall L. et al. (2022) *Nuclear waste from small modular reactors* PNAS 2022 119 (23) <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2111833119>



Grand réacteur (1000 MWe)



Petit réacteur (NuScale 50 MWe)



Comparaison à l'échelle de l'irradiation dans deux réacteurs. En rouge et en marron la production calculée de déchets à vie longue, en jaune les déchets à vie courte, indéterminé en zone orange. D'après Krall L. et al. (2021). *Nuclear waste from small modular reactors*, PNAS

Lindsay Krall, l'auteur principal de l'article cité, se base sur les projets dont les dossiers ont été déposés auprès des régulateurs aux États-Unis. Ces projets sont les seuls pour lesquels une estimation quantifiée est possible. En quelque sorte, les neutrons vont « déborder » du cœur du réacteur, ce qui va avoir deux conséquences :

1. Moins d'atomes sont bombardés par la réaction (« taux de *burnup* diminué »). Pour une production donnée de chaleur, on utilise plus de combustible, par exemple 1,7 fois plus pour un mini REP que pour un réacteur de taille classique, suivant la taille du réacteur d'après L. Krall. Ce point est surtout présent dans les réacteurs à eau. Les autres types de réacteurs utilisent moins de combustible au prix d'une forte augmentation des irradiations¹⁸⁹.

¹⁸⁹ Glaser A. et al (2013) *Resource Requirements and Proliferation Risks Associated with Small Nuclear Reactors*, *Nuclear Technology* 184(1):121-129. https://www.researchgate.net/publication/283147726_Resource_Requirements_and_Proliferation_Risks_Associated_with_Small_Modular_Reactors DOI:10.13182/NT13-A19873

2. Plus de neutrons sont capturés par les composants extérieurs, notamment la cuve ou les composants en acier, ce qui multiplie les déchets irradiés « à faible activité » par vingt ou trente lors du démantèlement ou des maintenances lourdes. Le « réflecteur de neutrons » proposé dans le projet NuScale ne compense que partiellement ce défaut.

A ces éléments quantifiés par l'Université Stanford, il faut ajouter que les rendements sont diminués dans les turbines à vapeur. Celles-ci produisent l'électricité dans le circuit secondaire. En effet, grâce à leur plus grand nombre d'étages, les plus grandes centrales ont un rendement annoncé de 37% contre 33% pour les centrales plus anciennes et plus petites, soit 8% de mieux¹⁹⁰. Pour une centrale huit fois inférieure en taille, la perte de rendement dépend de la configuration des réacteurs, qui peuvent avoir une seule turbine en commun. Mais la diminution est dans tous les cas encore bien plus importante. Dans un petit réacteur, cela augmente d'autant les combustibles consommés, ainsi que les irradiations pour chaque kWh injecté en net sur le réseau.

8) Des déchets plus dangereux

Toujours selon l'équipe de Stanford, les flux de déchets de ces projets ont des différences radio-chimiques importantes par rapport aux réacteurs existants. Dans le cas de combustibles à l'uranium et au plutonium, la consommation partielle des matières fissiles avant rechargement va ajouter un risque de criticité¹⁹¹ dans les flux de déchets par rapport à la situation existante. Quant aux réacteurs fonctionnant aux combustibles en sels fondus ou refroidis par du sodium, ils vont eux utiliser des liquides hautement corrosifs et *pyrophoriques*¹⁹² (c.a.d. combustibles à l'air). Durant leur passage dans le réacteur, ces composés vont devenir hautement radioactifs.

Ces flux de déchets sont sujets à des réactions chimiques exothermiques¹⁹³. Ils peuvent aussi accumuler une masse critique s'ils sont en contact avec l'eau ou d'autres matériaux dans un site de stockage. Ils ne peuvent donc pas être stockés en l'état. Un retraitement et un reconditionnement des volumes s'imposent avant stockage. Ces opérations vont introduire des coûts importants dans la fin du cycle, ainsi que l'exposition additionnelle à des radiations et aux risques de détournement de matières, sans bénéfices pour la sûreté.

Au final, selon l'étude de Stanford, la production en volume de déchets va être jusqu'à cinq fois et demi plus importante. Ce sont aussi respectivement 30 et 35 fois plus de déchets à vie longue et à vie courte qui sont générés. Ceci est illustré dans le graphe suivant, qui compare les déchets de différents réacteurs : un réacteur à eau classique (REP) ; un mini-réacteur de type similaire au REP (comme le NUWARD Proposé par EDF) ; des réacteurs au sodium ou à sels fondus (4S et IMSR). Ce graphe montre

¹⁹⁰ Connaissance des Énergies (2022) *Réacteur EPR* [site internet]

<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/reacteur-nucleaire-epr>

¹⁹¹ Note : La **criticité** signifie qu'une masse concentrée de produits fissiles dépasse le seuil de la réaction en chaîne des neutrons

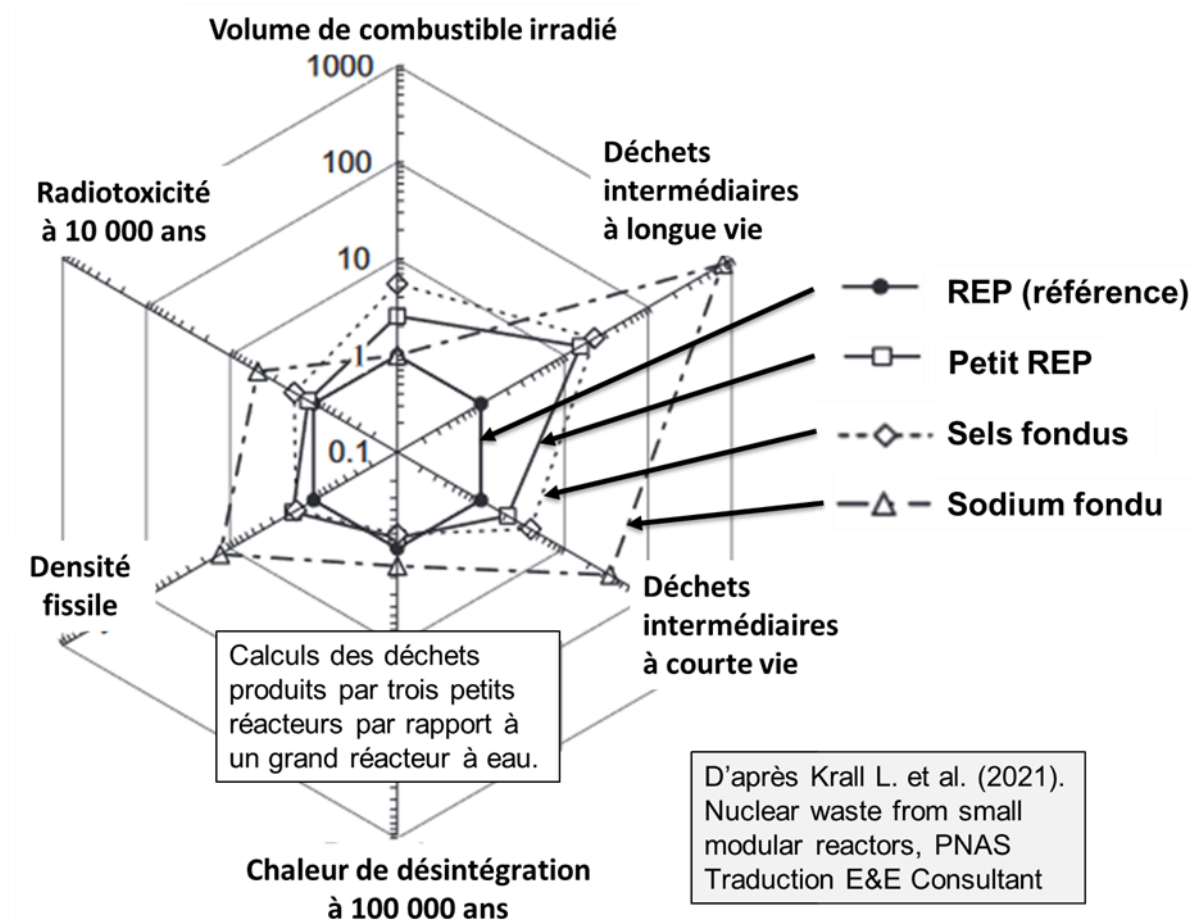
¹⁹² Note: **Pyrophorique** signifie que le mélange s'enflamme en moins de cinq minutes s'il est en contact avec l'air.

¹⁹³ Note : une réaction **exothermique** émet spontanément de la chaleur



ainsi que pour l'ensemble des critères considérés, les petits réacteurs ne présentent pas d'avantage sur le grand réacteur.

Krall et al. 2022 extrait.



Graphique radar dans Krall et al.. L'échelle utilisée est logarithmique. Elle couvre trois types de mini réacteurs comparés à un réacteur à eau pressurisée classique REP de 3400 MWth (1000 MWe).

Cette dangerosité accrue des matériaux issus de l'exploitation d'un petit réacteur est aussi soulignée par un comité de l'Académie des Sciences mené par Marc Fontecave¹⁹⁴. Celui-ci insiste sur les nombreuses données et méthodes manquantes, dont beaucoup relèvent de la recherche fondamentale. Ce document estime ainsi qu'une évolution vers les petites tailles nécessite une augmentation de l'enrichissement en ²³⁵U de l'uranium ou une densification du combustible uranium (métal, carbure, nitrure) ou les deux ; ou encore d'aller vers l'utilisation du plutonium civil. Selon le texte des académiciens, l'expérimentation est d'autant plus difficile qu'on s'écarte du combustible traditionnel, car le retour d'expérience sur les composés autres que les oxydes est faible en France.

¹⁹⁴ Fontecave M. et al.(2022) *Les réacteurs nucléaires modulaires de faible puissance (SMR)*. Avis et rapport de l'Académie des Sciences (p.13). https://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/221020_SMR.pdf

9) Un démantèlement plus difficile

La dispersion des matières provenant de réacteurs de cycles encore plus diversifiés peut avoir pour conséquence une difficulté accrue du démantèlement, estime par exemple un document de travail de la Commission Européenne de 2016 cité par Jim Green de WISE International¹⁹⁵. Selon cette communication, la moindre économie d'échelle sur un petit réacteur va induire un coût unitaire accru pour le démantèlement et les déchets des petits réacteurs, avec pour certaines analyses une multiplication de ce coût par un facteur deux ou trois.

Cette estimation rejoint le fait que les petits réacteurs utilisent nettement plus de matériaux dans les parties nucléaires que les grands réacteurs. Pour une production donnée, cela augmente d'autant la difficulté et le coût des démantèlements.

10) Des déchets plus difficiles à gérer au niveau international

L'évolution de la loi et des réglementations, notamment en France depuis la loi Bataille et les textes suivants¹⁹⁶ prévoit que la gestion des déchets doit être prise en charge par le pays qui les produit. Il est même prévu dans la loi que des matières nucléaires qui seraient retraitées ou élaborées pour autrui doivent être restituées « au-delà des délais techniques imposés par le retraitement ».

Des pays de petite taille ou menacés par la montée des eaux ou d'autres intempéries ne peuvent se lancer dans la construction de centrales sans avoir prévu la fin du cycle, tant pour les combustibles que pour le démantèlement des centrales. La question de la fin du cycle et des déchets illustre la difficulté d'adoption du nucléaire civil pour des pays non encore équipés.

Cependant, certains projets de mini-réacteurs ouvrent l'idée d'une prise en charge des déchets par le pays vendeur ou par un tiers. Cette hypothèse a été formulée en même temps que l'idée de vendre des réacteurs en grandes séries. Ceci donnerait la possibilité d'acheter des petits réacteurs à des pays incapables de se doter d'un système de stockage de long terme. Cette évolution institutionnelle suggérée par certains promoteurs des SMR multiplie le flou des responsabilités. Il n'a cependant aucune chance d'aboutir dans le système actuel dominé par le souverainisme industriel des nations dotées d'une industrie nucléaire, ainsi que de leur lien avec le nucléaire militaire.

Actuellement, seule la Russie accepte d'intégrer la prise en charge des déchets dans les contrats de fourniture de ses centrales nucléaires. Mais cet exemple est particulièrement dangereux, comme le montre l'exemple des dépôts de déchets dans

¹⁹⁵ Green J. (2019), *Commission Staff Working Document on SMR* (4 avril 2016), cité dans cost estimates, and costs of SMRs under construction nuclear monitor #872-873

¹⁹⁶ Légifrance (1991). *Loi N°91-138 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs*. [consultation mai 2023] <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000356548>

l'Arctique, où ont abouti la majorité des petits réacteurs nucléaires de ce pays. Dans cette région, plusieurs réacteurs civils et militaires listés notamment par l'AIEA¹⁹⁷, et une grande quantité de déchets nucléaires ont été immergés, près des îles russes de Nouvelle-Zemble¹⁹⁸. La récupération de ces déchets est une tâche complexe et onéreuse¹⁹⁹. Cette irresponsabilité a aussi son pendant du côté de l'armée américaine selon le même article : deux réacteurs de 10 et 20 MW ont alimenté les bases militaires de l'Alaska et du Groenland. Ils ont eu plusieurs accidents, ont contaminé les cours d'eau, et laissé dans la glace des centaines de tonnes de déchets²⁰⁰ liquides.

Mais l'argument de l'attitude vis-à-vis des déchets ne concerne pas que la gestion des déchets du passé. La Russie est en effet le premier pays à proposer commercialement de "prendre en charge" les déchets de ses clients. Elle possède aussi désormais une part de marché importante pour les nouveaux réacteurs construits, selon le rapport sur le nucléaire mondial WNISR 2022²⁰¹. Ainsi, la question des SMR interroge sur la responsabilité des États sur la fin du cycle (sécurité des salariés et des populations, prolifération, devenir des déchets de long terme...), tant pour les déchets que pour les réacteurs usagés.

Quant à un réacteur qui serait porté par un consortium privé sans le soutien ou la garantie d'un État, la question du devenir des déchets de démantèlement s'ajoute à une série de problèmes difficilement solubles. Ce cas est de plus totalement contraire aux traités. Le nucléaire reste une industrie d'États.

¹⁹⁷ AIEA (2003) *Modelling of the radiological impact of radioactive waste dumping in the Arctic Seas* (pp.2-3) https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1330_web.pdf

¹⁹⁸ Le Hir P. (2012) *Le Grand Nord souillé pour des siècles par des déchets nucléaires* Le Monde [article]. https://www.lemonde.fr/planete/article/2012/11/22/le-grand-nord-souille-pour-des-siecles-par-des-dechets-nucleaires_1794588_3244.htm

¹⁹⁹ Nilsen T. (2021) *EU willing to co-fund lifting of sunken nuclear subs from Arctic seabed* The Barents Observer [consulté le 20 mai 2023] <https://thebarentsobserver.com/en/nuclear-safety/2021/11/europe-offers-pay-russia-raise-sunken-nuclear-subs>

²⁰⁰ Le Point (2016) *Au Groenland, la fonte des glaces va exhumer une base secrète américaine* [article de presse] https://www.lepoint.fr/insolite/au-groenland-la-fonte-des-glaces-va-exhumer-une-base-secrete-americaine-26-09-2016-2071501_48.php

²⁰¹ Schneider M. et al. (2022). *The World Nuclear Industry Status Report 2022*, Résumé en français [WNISR] www.worldnuclearreport.org

7. Les SMR : une fiction industrielle

Le marché des petits réacteurs nucléaires est très limité. Il représente une faible fraction du “grand” nucléaire. Les SMR proposés par EDF, Westinghouse ou Rolls-Royce sont bien trop gros pour des sites isolés ou des îles. Ils ne peuvent pas non plus remplacer le charbon dans l’urgence exigée par la crise climatique. Les très petits réacteurs proposés pour des sites miniers isolés ou l’exploitation d’hydrocarbures représentent un marché faible et des solutions dangereuses.

1) Les SMR ne représenteraient qu’une micro-fraction du mix énergétique mondial

L’étude de marché la plus complète sur le SMR est celle de l’Agence de l’Énergie Nucléaire (NEA) de l’OCDE. Elle prévoit au mieux d’ici à 2050 une part de marché mondiale des petits réacteurs de 3% du total du nucléaire soit dans cette projection environ 1500 unités mondiales (24 GW)²⁰². Le bas de la fourchette de la NEA est 25 fois inférieur à ce dernier chiffre, ce qui illustre l’incertitude. Une autre estimation plus optimiste est celle de la SFEN pour une part de 10% du nucléaire en 2040 soit de l’ordre de 40 GW en 2040²⁰³, sur la base d’une étude réalisée par le consultant Bearingpoint²⁰⁴. Ces chiffres supposeraient alors que soit mis en chantier avant 2035 un nombre élevé de réacteurs de l’ordre de 400 machines de 100 MW.

S’ils se développaient au niveau espéré par la NEA, à l’horizon 2050 les petits réacteurs représenteraient donc une petite fraction de la production nucléaire. Celle-ci représente actuellement un peu moins de 10% de l’électricité mondiale ou 3% de l’approvisionnement en énergie finale. Cependant, l’électricité devient le vecteur dominant dans les bilans d’énergie, dans la plupart des scénarios comme ceux du GIEC ou de l’Agence Internationale de l’Énergie. Sa part dans l’énergie mondiale double ou triple à l’horizon de 2050. Ainsi, même si le nucléaire doublait en valeur absolue de 393 GW à 880 GW dans le monde, comme le suggère l’AIEA dans la fourchette la plus haute de son dernier scénario, alors cette part relative diminue encore. Un triplement global à l’horizon de 2050 a même été proposé par plusieurs pays dont la France lors de la conférence-climat de Dubaï, qui maintiendrait la part totale du nucléaire dans l’électricité mondiale autour de 10% (voir plus loin).

²⁰² Nuclear Energy Agency (2016). *Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment*. [rapport] https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_14924/small-modular-reactors-nuclear-energy-market-potential-for-near-term-deployment?details=true

²⁰³ SFEN (2021) *SMR, la puissance en série* [site de la SFEN consulté le 20 mai 2023] <https://www.sfen.org/rgn-dossiers/dossier-smr-la-puissance-en-serie/>, mars 2021

²⁰⁴ Massardier M-A (2021) *Panorama du marché des SMR dans le monde* [publication internet] <https://www.bearingpoint.com/fr-fr/publications-evenements/blogs/energie/small-modular-reactors-smr-%E2%80%93-panorama-du-march%C3%A9-des-smr-dans-le-monde/>

Quelle est la part du grand nucléaire dans l'électricité ?

Ces estimations de production des petits réacteurs sont largement contingentes des projections du reste du nucléaire. Celui-ci, pourtant, ne représente guère plus que 5% à 10% de la future production électrique mondiale, selon une convergence des projections de trois des principales sources de prospective sur ce thème : l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (AIEA), l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), et le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC). Toutes trois ont publié récemment des réévaluations de leur vision du nucléaire plutôt à la hausse par rapport à l'après-Fukushima. Ces visions sont très proches malgré des méthodes et des tutelles très différentes : dans le premier cas (l'AIEA) la mission inclut la promotion du nucléaire civil; dans le second cas, (l'AIE), les projections mondiales sur la partie nucléaire sont réalisées par l'Agence Nucléaire de l'OCDE, là aussi une entité dont la fonction est d'encourager le nucléaire. Enfin, dans le troisième cas (le GIEC dans son sixième rapport) le groupe se veut technologiquement neutre par construction. Dans ces trois cas, il n'y a donc pas de biais d'opposition au nucléaire, c'est plutôt le contraire.

L'**AIEA** a révisé en 2021²⁰⁵ puis en 2023²⁰⁶ ses prévisions et estime une nouvelle fourchette haute de construction à un doublement du parc (890 GW) à l'horizon de 30 ans, contre une stagnation (450 GW) en hypothèse basse. Cette nouvelle fourchette "haute" réalisée en analysant chaque pays ou groupe de pays, aboutit à un doublement du nombre de réacteurs... et à un maintien de la production électrique nucléaire autour de 10% du total mondial en fourchette haute, et à un déclin vers 5% ou moins en hypothèse basse.

L'**AIE** L'Agence Internationale de l'Énergie a publié depuis 2021 plusieurs prospectives liées à l'Accord de Paris visant la sortie des hydrocarbures. Ces scénarios utilisent la structure de l'Accord en montrant d'abord les projets ou les mesures déjà en vigueur des pays, puis les déclarations ou les engagements de ces pays notamment dans le cadre de l'ONU, et enfin les projections liées aux objectifs ultimes de l'Accord²⁰⁷. Ces scénarios optimistes montrent un peu plus d'un doublement de la production nucléaire actuelle, ce qui recoupe la fourchette haute de l'AIEA et les estimations du GIEC. Cela correspond à une stabilisation des parts de marché de cette énergie, dans un contexte d'électrification à marche forcée au niveau mondial. L'AIE a aussi publié pour la déplorer une prospective aboutissant à une baisse rapide du nucléaire dans les pays développés, le « nuclear fade »²⁰⁸. L'Agence publie régulièrement des scénarios respectant l'Accord de Paris, le NZE (« Net Zero Emissions » scenario) qui laisse planer l'ambiguïté sur la capacité des pays à suivre la projection. La structure en trois niveaux du graphe suivant suit la logique de l'Accord de Paris : les politiques affirmées (« Stated Policies » STEP) correspondent

²⁰⁵ IAEA (2021) *L'AIEA revoit à la hausse ses projections concernant l'utilisation de l'électronucléaire en 2050* <https://www.iaea.org/fr/newscenter/pressreleases/laiea-revoit-a-la-hausse-ses-projections-concernant-lutilisation-de-lelectronucleaire-en-2050>

²⁰⁶ AIEA (2023) *Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050*. Publications AIEA. <https://www.iaea.org/publications/15487/energy-electricity-and-nuclear-power-estimates-for-the-period-up-to-2050>

²⁰⁷ International Energy Agency (2021), *Net Zero by 2050*, IEA, Paris: Net Zero by 2050 Scenario - Data product - IEA. License: Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

²⁰⁸ IEA (2018), *Nuclear capacity operating in selected advanced economies in the Nuclear Fade Case, 2018-2040*, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/nuclear-capacity-operating-in-selected-advanced-economies-in-the-nuclear-fade-case-2018-2040>



aux décisions déjà mises en œuvre ; les engagements annoncés (« Announced Pledges Case » APC) incluent notamment les contributions climat à l'ONU, et enfin les projections NZE sont les visions des prospectivistes nucléaires de l'Agence.

Le GIEC. Dans le chapitre « énergie » du GIEC AR6, le GIEC recense les scénarios issus des équipes du monde entier qui contribuent au rapport²⁰⁹. En ne prenant que celles qui aboutissent à 1,5°C et 2°C, ces scénarios convergent sur les parts respectives des énergies électriques, avec une croissance gigantesque des énergies renouvelables électriques et une stagnation relative de la part du nucléaire. Dans la médiane des scénarios, le nucléaire diminue légèrement sa part dans la production mondiale d'électricité. Les petits réacteurs se situent à la marge de cette fraction de la production.

Un marché inexistant

Les promoteurs des SMR cherchent donc d'autres arguments que celui de la simple participation à la transition énergétique pour mettre en avant les petits réacteurs. Ils soulignent que les SMR pourraient soit créer des marchés nouveaux pour l'énergie nucléaire, soit « réparer²¹⁰ » le nucléaire existant :

- Les partisans des petits réacteurs citent notamment une adaptation à des réseaux plus petits, voire des sites isolés ; à l'approvisionnement des industries lourdes en chaleur de process ; à l'équipement de compagnies trop faibles financièrement pour acheter des grands réacteurs ; à des sites ne disposant pas d'un refroidissement suffisant.
- Les autres projets, par exemple celui de NuScale aux États-Unis, abandonné en 2023, visent à créer un produit de remplacement pour les réacteurs existants afin de les rendre plus compétitifs pour l'approvisionnement des réseaux. Ils se heurtent au coût de plus en plus bas des alternatives renouvelables.
- Enfin, le responsable du projet de petit réacteur de Rolls-Royce justifie le développement des SMR dans le cadre des énergies renouvelables dominantes « *comme une sorte de pari pour compléter la panoplie* ». ²¹¹

2) Des systèmes trop gros pour les sites isolés ou les îles

Les systèmes électriques et thermiques reposent sur une multiplicité de sources pour leur fonctionnement, car ils sont sujets à des pannes et des maintenances, au rechargement du combustible, et à une demande variable. Chaque ressource -ici un réacteur- d'un réseau électrique ne devrait pas être trop important par rapport à la taille

²⁰⁹ IPCC-wg3 (2022) *Shares of low-carbon energy* IPCC AR6 Scenario Database (Fig. 6.30 p.688) <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/chapter/chapter-6/>

²¹⁰ Price-Walman S. (2015) *The Company Determined to Fix Nuclear Energy*, the Atlantic [interview video] <https://www.youtube.com/watch?v=e7gL2iBMAeY>

²¹¹ Borlace D. (2020) *Rolls Royce Small Modular Reactor*. Just have a think. [Vidéo à 14'] dans <https://www.youtube.com/watch?v=WQ3DvcXd3mM>

totale de ce système. Selon l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (AIEA)²¹², un nouveau réacteur ou une centrale ne devrait pas représenter plus que cette proportion de 10% de la puissance installée.

Cette limitation de la taille d'une seule centrale a plusieurs raisons, à la fois économiques et opérationnelles pour le réseau :

- D'une part, si une ou plusieurs centrales sont très importantes par rapport à un petit réseau électrique comme une île, cela va se traduire par des surcoûts puisqu'il faudra une redondance d'équipements pour faire face aux pannes et à la maintenance. Les conditions d'amortissement de l'investissement sont alors dégradées par leur sous-utilisation.
- D'autre part, la garantie de bon fonctionnement du réseau électrique repose sur une réserve de puissance permanente. Cela évite les écarts brusques dans la fréquence et la tension livrée au réseau, en particulier en cas de panne. Là aussi, une ou plusieurs centrales surdimensionnées imposent de disposer en permanence du soutien de réserves ou de liaisons extérieures.

Le projet de réacteur NUWARD d'EDF représente une puissance de deux fois 170 MWe soit une production électrique annuelle de 2,5tWh à 2,7tWh environ pour une paire de réacteurs suivant leur fonctionnement. Ce chiffre est proche de la consommation des plus grandes îles françaises, la Corse et la Réunion, qui consomment respectivement 2,3 TWh et 2,8 TWh. Les réseaux de ces deux îles sont soit isolé (La Réunion) soit partiellement interconnecté (Corse).

Le ratio de l'AIEA suggère alors que ces îles sont alors cinq fois trop petites pour accueillir une paire de réacteurs NUWARD, si on les considère comme deux centrales indépendantes. Ceci est illustré dans le graphe suivant, qui compare la taille des deux îles avec la production du projet de centrale:

²¹² IAEA (2012). *Electric Grid Reliability and Interface with Nuclear Power Plants*. Nuclear Energy Series N° NG-T-3.8 pp.9 et pp.23-25 . Agence Internationale de l'Énergie Atomique https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1542_web.pdf

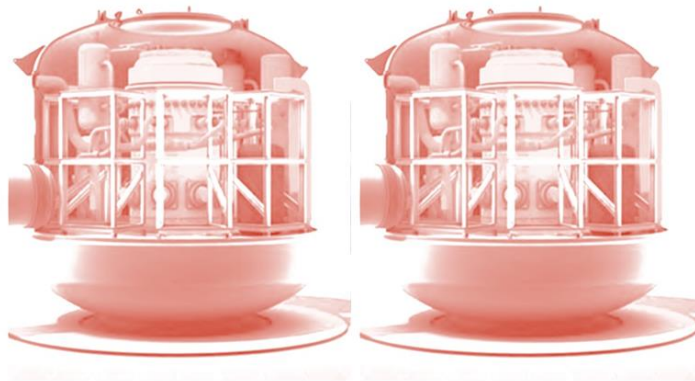




La Réunion :
Consomme 2,8 TWh/an



La Corse :
Consomme 2,3 TWh/an



NUWARD: 2 X 170MWe. Produirait 2 X 1,25 TWh/an

Illustration
d'après
Wikipedia et
NuWard 

Ce simple calcul contredit l'affirmation des promoteurs du réacteur français quant à la capacité de leur système à électrifier « les métropoles isolées ou les sites industriels français »²¹³. Cette inadaptation n'est pas modifiée par la capacité théorique des projets à moduler²¹⁴ leur puissance. Cette capacité parfois mise en avant consiste à fournir une puissance moins élevée sur la première partie du cycle de rechargement en combustible²¹⁵. Cette particularité est utilisée sur une partie des centrales françaises pour la régulation de fréquence et une partie de la réserve. Mais cette modulation ne modifie pas la capacité de pointe de la centrale, et elle dégrade même l'économie de la centrale puisque son facteur de charge diminue.

3) Des SMR inadaptés pour les industries grandes consommatrices d'énergie

La plupart des projets de petits réacteurs visent la production d'électricité, dans la quasi-totalité des cas via l'injection de vapeur dans une turbine. Mais quelques projets annoncent pouvoir valoriser aussi l'énergie directement sous forme de vapeur pour des procédés industriels voire pour la production directe d'hydrogène. Dans le cas de

²¹³ Ruggieri J.-M. (2022) *Les enjeux des SMR et le projet NUWARD*, CEA de la Recherche à l'Industrie (p.11) [présentation PP.] https://jtsfp2022.sciencesconf.org/data/pages/SFP_18_mars_2022_SMR.pdf

²¹⁴ La **modulation de puissance** est la capacité du réacteur à modifier sa puissance à la baisse dans une partie de son cycle de rechargement. Ce terme est distinct du caractère **modulaire** du projet, qui décrit la multiplicité des réacteurs d'une centrale ou son montage en sous-ensembles distincts.

²¹⁵ AIE (2021) *Analysis of the flexibility of advanced reactor systems*, (p.59), Advanced Nuclear Reactor Systems and Future Energy Market Needs, OCDE NEA No. 7566

la France, les projets en vue comme Hexana (CEA)²¹⁶, Stellaria (CEA)²¹⁷ et NUWARD (EDF) déjà cité, veulent ainsi contribuer « à la décarbonation des industriels électro-intensifs ». Le fondateur de Stellaria parle par exemple d'alimenter des data centers²¹⁸. De tels réacteurs se proposent de produire respectivement un total de 250 MW thermiques (Stellaria) et de 800 MW thermiques et électriques (Hexana). Pour un fonctionnement correct sur l'année, cela représente respectivement 550 kTEP/an et 172 kTEP/an.²¹⁹ De son côté, une paire de réacteurs NUWARD est encore plus imposante avec une production thermique de l'ordre de 500 kTEP en plus de son électricité.

Examinons si ces réacteurs auraient potentiellement un marché auprès de grandes unités industrielles.

En France, selon l'INSEE²²⁰ la consommation des unités industrielles dans les branches les plus « lourdes » est en moyenne de 16 ktep/an dans la métallurgie et de 10 ktep/an dans la chimie. Elle est de 1,7 ktep dont 0,93 ktep de combustibles en moyenne pour l'ensemble des 20 000 établissements industriels, soit cent à mille fois moins que la production du NUWARD. Les 500 plus grosses usines françaises consomment en moyenne... 20 ktep, dont une bonne partie à haute température.

C'est ainsi que la taille des réacteurs SMR imaginés par le CEA peut sembler éloignée d'une « adaptation à la taille des entreprises ».

Ceci est illustré par le graphe suivant, qui compare ces consommations moyennes des plus grandes unités françaises avec la production de ces réacteurs. Le graphe exclut NUWARD, encore bien plus gros, et dont la température de sortie de chaleur n'est pas adaptée pour les procédés industriels.

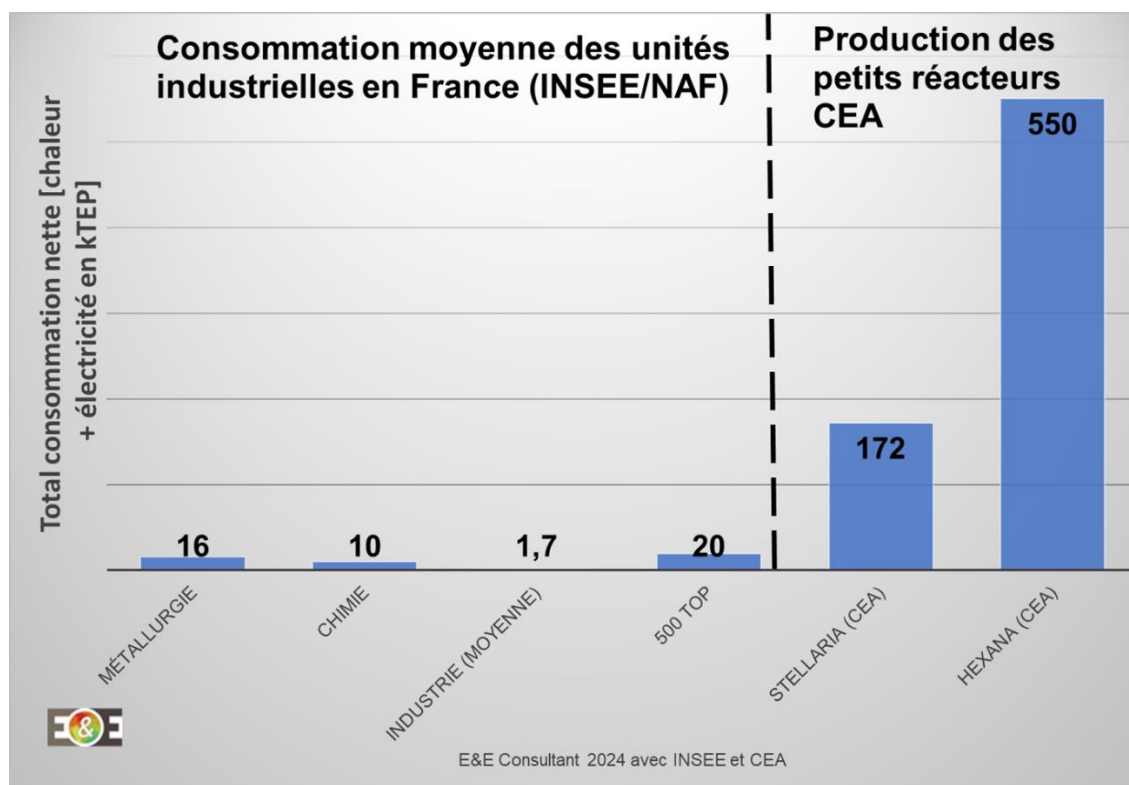
²¹⁶ Hexana (2023) HEXANA, start-up industrielle française [site internet] <https://www.hexana.fr/>

²¹⁷ RGN (2023) *Stellaria, la première pile régénératrice de combustible liquide au monde*, Revue Générale Nucléaire 2023 #1 <https://www.sfen.org/rgn/stellaria-la-premiere-pile-regeneratrice-de-combustible-liquide-au-monde/>

²¹⁸ Campioni G. (2022). *Présentation de Stellaria* CEA Recherche [vidéo, 58"] https://www.youtube.com/watch?v=V03_KW3bjSs

²¹⁹ Note : 1 tep consommée = 11,6 MWh.

²²⁰ INSEE (2021) *tableau NAF T1 Consommation d'énergie en milliers de tonnes-équivalent-pétrole (kTEP) et nombre d'établissements selon le secteur d'activité en NAF. rév.2* Enquête annuelle sur les consommations d'énergie dans l'industrie (EACEI) - Insee [tableaux statistiques] <https://www.insee.fr/fr/statistiques/6967797?sommaire=6967807>



Si l'on considère maintenant l'alimentation en vapeur de zones sidérurgiques ou chimiques, ou de grandes zones industrielles, seuls trois ou quatre « clusters » pourraient se rapprocher de ces tailles en France. Il n'est donc pas envisageable de bénéficier d'un quelconque effet de série. De plus, il s'agit toujours d'industries dont le modèle économique repose sur des approvisionnements en énergie très compétitifs. Il faudrait alors subventionner massivement le ou les petits réacteurs. Une telle installation reviendrait en effet beaucoup plus cher que les énergies concurrentes.

Le projet Jimmy, nettement plus petit, se veut le contre-exemple du NUWARD de l'EDF et du CEA. Ce projet partirait d'une production thermique pour alimenter des industries à haute température. Le réacteur affiche à une production de 10 MW (ou 20 MW) thermiques²²¹ soit une production annuelle de l'ordre de 6,8 ktep ou du double en chaleur. Il y aurait ainsi plus de sites de taille comparable²²² soit selon Jimmy environ une centaine de sites consommant plus de 7 kTEP de combustibles. Mais le coût associé à la mise au point et la mise en place d'un tel réacteur innovant voire disruptif (fonctionnement à haute température à modérateur graphite et fluide hélium) rend l'équation compliquée. Le temps de mise au point suggéré est aussi très important vu le caractère encore peu abouti de la technologie²²³. Cette technologie développée

²²¹ Jimmy (2021) *Le projet Jimmy* [site de présentation] <https://www.jimmy-energy.eu/notre-technologie>

²²² INSEE (2022) *Annual survey on industrial energy consumption 2020* EACEI 2020 [consulté le 20 mai 2023] <https://www.insee.fr/en/metadonnees/source/operation/s1556/presentation>

²²³ Fontecave M. et al.(2022) *Les réacteurs nucléaires modulaires de faible puissance (SMR)*. Avis et rapport de l'Académie des Sciences (p.17). https://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/221020_SMR.pdf



notamment en Allemagne a en effet perdu beaucoup de son intérêt [bien avant les décisions de sortie du nucléaire de ce pays] « faute de compétitivité »²²⁴.

4) Production d'hydrogène : pas d'avenir pour les SMR

La production d'hydrogène pour faire face aux excédents de production et pour contribuer aux demandes d'énergie en pointe fait partie des options discutées actuellement dans tous les réseaux électriques. En déployant une palette de couleurs plus ou moins positives sur l'hydrogène (vert, bleu, gris...) l'industrie se sert de la confusion engendrée pour promouvoir des formes d'énergie pas forcément vertueuses. Ainsi, à titre d'exemple, l'hydrogène « bleu » (couleur positivement connotée) est initialement produit à partir d'énergie fossile. Contrairement à l'hydrogène « gris », ses promoteurs mettent en avant une couleur positive du fait de l'usage combiné avec la technique de capture et de stockage du carbone (CCS), encore immature. L'Hydrogène « grise » représente plus de 95% de la production d'hydrogène dans le monde²²⁵. L'hydrogène « vert » ou produit à partir de sources d'énergies renouvelables, représente moins de 0,1% de la production²²⁶, Aujourd'hui, certains articles de presse laissent entendre que l'on va créer une filière à chaud de production d'hydrogène à partir de nucléaire. En effet, certains laboratoires travaillent sur une telle électrolyse à chaud, de façon à augmenter les rendements. C'est notamment le cas du CEA et de projets d'entreprises dérivées de ses recherches comme Genvia²²⁷ qui vise la production d'hydrogène par l'électrolyse vapeur haute température. Ces recherches sont loin d'être abouties. Actuellement seul le Danois Haldor Topsoe a lancé un pilote de grande taille²²⁸. Par rapport à un électrolyseur classique, ces équipements augmentent les rendements, en passant par exemple de 60% de rendement à 85%.

Mais quels que soient les développements futurs, ces procédés ne peuvent changer la donne pour les petits réacteurs. Deux raisons notamment :

- Les gains de rendement sont substantiels bien sûr, de l'ordre de 20% à 30% par rapport aux appareils classiques. Mais il s'agit toujours de convertir l'électricité en hydrogène, et cela dépend donc du cours de l'électricité.
- Ces appareils générateurs d'hydrogène auraient très peu de flexibilité et sont conçus pour fonctionner en permanence, ce qui contredit l'idée d'un régime modulable ou complémentaire des autres énergies.

²²⁴ Allelein H-J et al.(2018) *Major milestones of HTR development in Germany and still open research issues*. Annals of Nuclear Energy – Elsevier <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.02.012>

²²⁵ AIE (2019) *The Future of Hydrogen*, Agence Internationale de l'Energie [rapport]. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>

²²⁶ Idem

²²⁷ Schwoerer P. (2021) *Avec ses électrolyseurs haute température, Genvia veut révolutionner l'hydrogène, H2 Mobile* [site consulté le 30 mai 2023] <https://www.h2-mobile.fr/actus/electrolyseurs-haute-temperature-genvia-revolutionner-hydrogene/>

²²⁸ H2 mobile (2022) *Hydrogène : feu vert pour le plus grand électrolyseur à oxyde solide au monde* [site internet] <https://www.h2-mobile.fr/actus/hydrogene-feu-vert-plus-grand-electrolyseur-oxyde-solide-monde/>

Reste l'idée, parfois avancée, d'utiliser les petits réacteurs comme ressource électrique de pointe ou de semi-base tout en produisant de l'hydrogène lors des périodes de faible demande électrique. Au-delà des aspects liés aux pertes d'énergie lors des opérations de conversion ou de transport, la production d'hydrogène est extrêmement coûteuse. La réaliser avec des SMR durant tout ou partie de l'année serait peu viable sur le plan économique : elle se baserait en effet sur des coûts variables de plus du double de ceux des grands réacteurs. Elle serait ainsi en concurrence avec des autres ressources aux coûts marginaux très faibles voire nuls de l'éolien et du solaire ou même ceux des plus grands réacteurs nucléaires lors des périodes de faible demande. Une telle production n'aurait pas de sens économique, et surtout n'améliorerait qu'à la marge le bilan économique des petits réacteurs. En effet, cette production ne serait possible qu'une faible partie de l'année.

Pour la transition écologique, le GIEC suggère qu'il y a une logique favorable à la constitution de clusters industriels décarbonés, c'est-à-dire de zones d'industries s'appuyant sur une forme d'écologie industrielle par l'interconnexion de réseaux locaux (chaleur, déchets, flux chimiques...). Ces quelques regroupements actuels ou futurs ont une taille critique cohérente avec la taille supposée des réacteurs SMR « industriels ». Mais l'industrie concernée (métallurgie, sidérurgie, chimie, ciment, papier...) est composée de firmes dont les coûts de revient sont pour une grande partie liés au prix de leur approvisionnement en énergie.. Ces clusters, souvent des ports comme Rotterdam (Pays-Bas), reposent ainsi sur une énergie moins chère que l'on va trouver notamment dans la connexion avec l'éolien offshore. Il s'agit donc d'ensembles industriels lourds à fort taux d'énergie dans leurs coûts, reliés d'emblée aux ressources les moins chères ce qui exclut les petits réacteurs. Ces ensembles sont aussi pensés pour avoir la capacité d'absorber des énergies variables grâce à une interconnexion massive. Par exemple, les flux d'électricité issus des champs d'éoliennes de la mer du Nord vont représenter plusieurs centaines de GW, soit une part dominante de l'électricité en Europe du Nord selon une déclaration des Etats riverains dont la France²²⁹. Une partie peut alimenter les électrolyseurs sur la base d'un coût variable très faible sur une part de l'année. Les grands réacteurs nucléaires tentent difficilement de se frayer un chemin dans une telle perspective, comme à Rotterdam, à Dunkerque ou au Nord de l'Angleterre. Cette place dépend notamment du contexte de régulation du marché de l'électricité. Mais le petit réacteur est exclu du match.

Même dans ce cas, les visions les plus favorables au grand nucléaire, comme le rapport "nucléaire" de l'AIE²³⁰, montrent que l'hydrogène sera moins cher s'il est produit par les énergies renouvelables.

²²⁹ Gouvernement du Luxembourg (2023) *Xavier Bettel et Claude Turmes au sommet « Mer du Nord » à Ostende* [communiqué] https://gouvernement.lu/fr/actualites/toutes_actualites/communiques/2023/04-avril/25-bettel-turmes-sommet-ostende.html

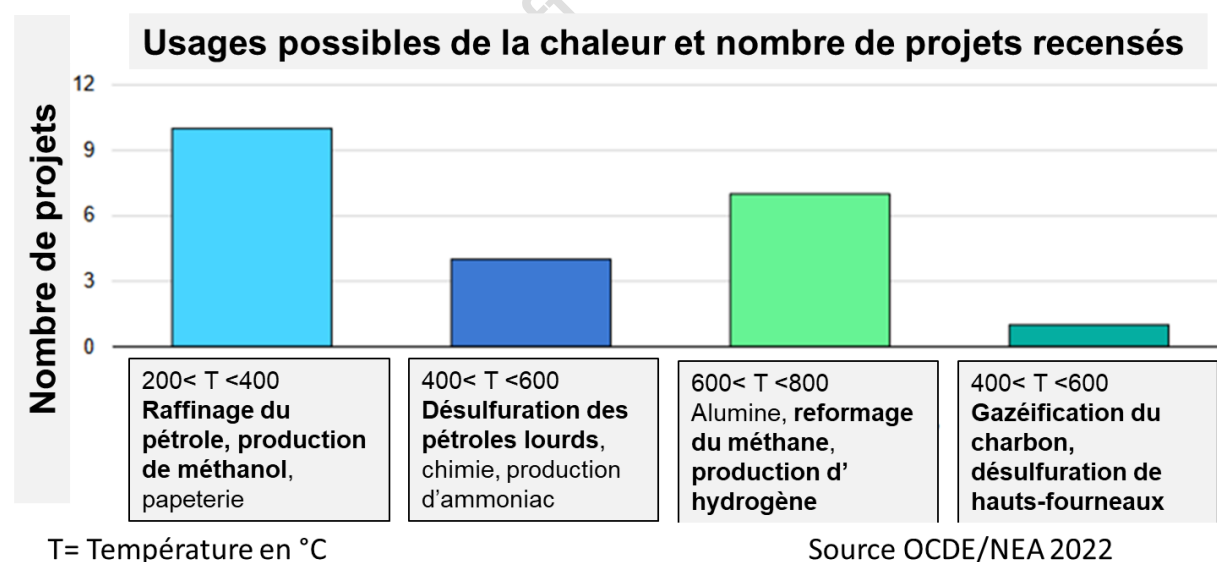
²³⁰ IAE (2020). *Nuclear Power and Secure Transitions*. Agence Internationale de l'Energie [rapport consulté le 20 mai 2023] <https://iea.blob.core.windows.net/assets/016228e1-42bd-4ca7-bad9-a227c4a40b04/NuclearPowerandSecureEnergyTransitions.pdf>

5) Des très petits réacteurs pour développer ou transformer les hydrocarbures en zone isolée ?

Le coût des SMR est d'autant plus élevé que les installations sont réduites en taille. C'est l'une des grandes difficultés subies par le programme de micro-réacteurs au Canada. Ces SMR ont été imaginés pour alimenter des villes minières. D'emblée, le nombre limité des sites empêche - même sur le long terme - la baisse des coûts visée par une production en série. De plus, ces réacteurs produiraient une énergie coûtant le double ou au quadruple de leurs concurrents. Tous ces réacteurs se présentent en effet sous forme de projets unitaires, dont l'ingénierie est complexe et non reproductible. En face, leurs concurrents renouvelables ont évolué sous forme de produits industriels, massifiés à grande échelle. Cela explique la baisse spectaculaire de leurs coûts.

Une étude de l'AIE de 2022 recense les projets de petits réacteurs à finalité non-électrique. Cette typologie par technique ou branche industrielle montre que ces projets se situent au stade très préliminaire. Plus que l'hydrogène, ils concernent en grande majorité la transformation des hydrocarbures, ou encore des industries basées sur le charbon comme la sidérurgie, ou des usines chimiques.²³¹ De plus, le reformage du méthane à 700°C vise à produire de l'hydrogène à partir du gaz naturel et à capturer le carbone dégagé, ce qui peut être contradictoire avec la production décarbonée. Il s'agirait donc de projets visant à prolonger l'exploitation des hydrocarbures plutôt qu'à s'y substituer.

Projets SMR « industriels » par usage et par température (OCDE/NEA)



De même, l'exploitation des hydrocarbures dans l'Arctique ou des zones inaccessibles peut être facilitée par un très petit réacteur. Par exemple, les sociétés pétrolières

²³¹ IEA-NEA 2022. *Nuclear Power and Secure Energy Transitions Small Modular Reactors* Agence Nucléaire de l'OCDE (p.85) <https://www.iea.org/reports/nuclear-power-and-secure-energy-transitions>

exploitant des sables bitumineux de l'Alberta (Canada) consomment des quantités importantes de gaz naturel. Elles proposent de le remplacer par un réacteur nucléaire, qui permettrait ainsi de produire beaucoup plus de pétrole très carboné, pendant bien plus longtemps, ainsi que de l'exporter. Cela créerait de facto une situation de « lock in », où l'investissement réalisé avec la mise en place du très petit réacteur justifie de poursuivre l'exploitation d'hydrocarbures sur des décennies ! Cet exemple de projet très émetteur en carbone est d'autant plus paradoxal que l'exploitation de ces gisements au Canada ou au Venezuela a connu des périodes de crises abruptes allant jusqu'à la fermeture des installations, faute de rentabilité.

Dans le contexte d'exigence climatique de ne pas exploiter les deux tiers des réserves d'hydrocarbures, il y a donc un paradoxe à tenter d'abaisser leur coût de revient et à tenter de faciliter l'exploitation de tels gisements.

Au final, ces projets destinés aux sites isolés ou hors réseau sont à la fois marginaux, fragiles et ne représentent qu'une faible quantité d'hydrocarbures à substituer. Le rapport du Massachusetts Institute of Technology de 2018, se fait très critique sur ce créneau²³²: « Du point de vue des politiques publiques, il est important de considérer comment les micro-réacteurs contribuent ou pas à l'objectif de réduction d'émissions de carbone. Le marché hors-réseau est extrêmement petit et ne peut donner qu'une contribution très faible aux réductions globales d'émissions. [...] S'ils pouvaient voir le jour, ces réacteurs auraient une contribution très faible voire négative... »

Ce caractère marginal est illustré par les provinces canadiennes, qui avaient imaginé de tels réacteurs dans le Grand Nord pour les villes minières et pour les communautés isolées. En réalité, les usagers de ces réseaux lointains, notamment dans les communautés autochtones, souhaitent garder la main sur les décisions et n'ont pas très envie de nucléaire. En juin 2019, par exemple, l'assemblée des chefs Anishinabek, représentant de 40 groupes des "Premières Nations" à travers l'Ontario, a été unanime contre les SMR. Le chef de ce grand conseil, Glen Hare, a annoncé son opposition "véhémement" à ces projets selon l'institut indépendant IRPP²³³. De plus, selon les auteurs de cette étude, citant Natural Resources Canada, il faudrait une baisse de coût de 95% des SMR pour les rendre compétitifs vis-à-vis des combinaisons diesel-vent. Les provinces de l'Ontario, du New Brunswick et du Saskatchewan ont pourtant annoncé leur soutien à un développement de ces réacteurs malgré leur caractère cher et marginal²³⁴. Selon cette dernière étude, publiée par Energy Policy, 24 projets miniers pourraient candidater à un tel déploiement, pour

²³² Buongiorno J. et al. (2018). *The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World: An Interdisciplinary MIT Study*. Massachusetts Institute of Technology, Energy Futures (p.80) https://www.hbs.edu/ris/Publication%20Files/The-Future-of-Nuclear-Energy-in-a-Carbon-Constrained-World_62558c01-8747-4fc8-a026-9d62032488a9.pdf

²³³ Institute for Research on Public Policy (2020) *Small modular reactors aren't the energy answer for remote communities and mines*. Policy Option 26 aout. <https://policyoptions.irpp.org/magazines/august-2020/small-modular-reactors-arent-the-energy-answer-for-remote-communities-and-mines/>

²³⁴ Froese S. et al. (2020) *Too small to be viable? The potential market for small modular reactors in mining and remote communities in Canada* Energy Policy Volume 144, September 2020, 111587 <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111587>

substituer un total de 617 MW de diesels (les communautés isolées consomment un peu moins que cette puissance).

De tels projets posent aussi la question de la sûreté dans des lieux inaccessibles. Dans son rapport sur les impacts environnementaux des petits réacteurs²³⁵, l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique prévient que même si les plus petits réacteurs présentaient l'intérêt de s'adapter à des sites plus reculés et de moindre étendue, il faut précisément tenir compte du facteur inaccessibilité qui pourrait s'avérer problématique en cas d'accident. De plus, selon l'AIEA, l'impact environnemental de la construction d'infrastructures (routes, chemins de fer...) destinées à augmenter l'accessibilité du site, est également à prendre en compte dans le bilan de tels projets de réacteurs en zones lointaines.

6) Les SMR : les illusions de start-up et de milliardaires mal inspirés

Le milliardaire emblématique des GAFAM Bill Gates a investi dans un réacteur au sodium fondu à stockage de chaleur nommé Natrium, porté par la société TerraPower²³⁶. Selon l'entreprise, les levées de fonds ont associé des entreprises telles que Mittal²³⁷ pour s'approcher de l'investissement nécessaire de 2 milliards de dollars. Il s'agit en effet de décrocher la subvention fédérale en affichant des sommes privées équivalentes. Le milliardaire déclare investir l'essentiel de la somme soit au total 2 milliards issus de son énorme fortune selon Forbes²³⁸. L'estimation sommaire du premier prototype de réacteur est de 1 milliard de dollars selon Reuters²³⁹. Comme pour les autres petits réacteurs, la réduction de coût proviendrait d'une construction en atelier et d'un simple assemblage sur place. Le discours de Bill Gates est que le privé -aidé par les fonds publics- va réparer le nucléaire tant il est mal parti actuellement²⁴⁰.

En France, une start-up issue de grandes écoles dont Polytechnique propose aussi aux investisseurs de participer à cette "grande aventure". Le projet Jimmy²⁴¹ (mentionné plus haut) souhaite « réinventer la fission pour décarboner l'industrie ». Il

²³⁵ AIEA-IAEA (2020), *Considerations for Environmental Impact Assessment for Small Modular Reactors*, IAEA-TECDOC-1915, IAEA, Vienna (2020) (p.9). <https://www.iaea.org/publications/14676/considerations-for-environmental-impact-assessment-for-small-modular-reactors>

²³⁶ Terrapower (2022) *Terrapower Media Coverage* [site internet consulté le 20 mai 2023] <https://www.terrapower.com/cnbc-clean-energy-future/>

²³⁷ TerraPower (2022). *TerraPower Announces \$830 Million Secured in 2022* [communiqué de société] <https://www.terrapower.com/terrapower-announces-830-million-secured-in-2022/>

²³⁸ Carpenter S.(2020) *Bill Gates 'Nuclear Startup Unveils Mini-Reactor Design Including Molten Salt Energy Storage*, Forbes 31/08/2020 <https://www.forbes.com/sites/scottcarpenter/2020/08/31/bill-gates-nuclear-firm-says-new-reactor-can-backstop-grid-with-molten-salt-storage/?sh=441cd4c55e65>

²³⁹ Gardner T. et al.(2012) *Bill Gates 'next generation nuclear reactor to be built in Wyoming*. Reuters [dépêche d'agence] <https://www.reuters.com/business/energy/utility-small-nuclear-reactor-firm-select-wyoming-next-us-site-2021-06-02/>

²⁴⁰ Price-Walman S. (2015) *The Company Determined to Fix Nuclear Energy*, the Atlantic [interview video] <https://www.youtube.com/watch?v=e7gL2iBMAeY>

²⁴¹ Jimmy (2020) *le projet Jimmy* [site internet consulté le 20 mai 2023] <https://www.jimmy-energy.eu/a-propos>

a réalisé une levée de fonds de 2,2 millions d'euros puis de 15 millions en promettant un prototype industriel à l'horizon particulièrement proche de 2026 voire fin 2025²⁴². L'entreprise affirme mettre rapidement en place des « partenariats avec des fournisseurs industriels pour la production de son générateur », pour leur fournir de la chaleur « décarbonée et compétitive ». L'idée est de brancher directement un petit réacteur calogène sur un processus industriel. Le prospectus d'appel de fonds élude ainsi largement les règles légales, particulièrement complexes et longues, voire impossibles à tenir. Mais leur l'entourage de la start-up est prestigieux puisqu'il inclut même un fonds de son école d'origine²⁴³. À son échelle, comme pour le projet Terra-Power, le projet Jimmy vise à combiner les fonds privés et publics. Mais ici par exemple, les fonds « start-up » de l'École Polytechnique sont-ils vraiment de nature privée ?

Ce cas extrême de bluff sur le calendrier est probablement motivé par la nécessité de forcer les levées de fonds par une sorte de « pied dans la porte ». Le projet de Jimmy²⁴⁴ est en effet d'un réacteur dit « avancé » à modérateur graphite et un fonctionnement à 600°C et 50 bars, associé à des radioactivités très élevées et des technologies non encore prouvées²⁴⁵. Le combustible nucléaire proposé est composé de billes de carbures contenant l'uranium enrichi, inclus dans des cylindres de graphite. Ce type de combustible n'a déjà été mis en œuvre que dans des réacteurs expérimentaux²⁴⁶. Il ne dispose pas d'une usine de fabrication²⁴⁷, seulement de projets. De tels projets de réacteurs à haute température et à boulets de combustible ont aussi subi des déboires importants par le passé²⁴⁸. Pour une société privée, cette contradiction illustre le problème du modèle des start-up, habituées à des levées de fonds et des prises de gains rapides des investisseurs. À l'opposé, le petit réacteur relève d'un secteur régulé et encadré par des procédures légales strictes, complexes et fastidieuses.

En France, les projets de SMR, comme tout réacteur nucléaire même les plus « miniatures », relèvent de la loi française sur les « Installations Nucléaires de Base (INB) ». Leur contenu radioactif est supérieur de plusieurs ordres de grandeur aux

²⁴² Jimmy (2022) *Communiqué Jimmy Nuclear Valley* [Site internet] novembre 2022 <https://www.nuclearvalley.com/success-story-jimmy/>

²⁴³ Polytechnique Ventures (2022). *Polytechnique Ventures participe à une 1ère levée de fonds de Jimmy Energy*. Institut Polytechnique de Paris. <https://www.polytechnique.edu/actualites/polytechnique-ventures-participe-une-1ere-levee-de-fonds-de-jimmy-energy>

²⁴⁴ IAEA (2022) *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments* (p.155) AEA Advanced Reactors Information System (ARIS) https://aris.iaea.org/Publications/SMR_booklet_2022.pdf

²⁴⁵ Fontecave M. et al.(2022) *Les réacteurs nucléaires modulaires de faible puissance (SMR)*. Avis et rapport du Comité de Prospective de l'Académie des Sciences (p.5-17). https://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/221020_SMR.pdf PE 2022/Académie des Sciences

²⁴⁶ Demkowicz P. (2019) *TRISO Fuel: Design, Manufacturing, and Performance*, Idaho National Laboratory INL/MIS-19-52869-Revision-0 https://inldigitallibrary.inl.gov/sites/sti/sti/Sort_24838.pdf

²⁴⁷ Framatome (2023) *Framatome et Ultra Safe Nuclear envisagent de former une coentreprise pour fabriquer du combustible TRISO et FCM* [communiqué] <https://www.framatome.com/medias/framatome-et-ultra-safe-nuclear-envisagent-de-former-une-coentreprise-pour-fabriquer-du-combustible-triso-et-fcm/>

²⁴⁸ Thomas S.(2011) *The Pebble Bed Modular Reactor: An obituary* Energy Policy, 2011, vol. 39, issue 5, 2431-2440

seuils légaux nécessitant une telle autorisation²⁴⁹. Cette seule création d'une INB comprend les avis techniques de l'Autorité de Sûreté, une enquête publique... Cela représente un délai incompressible d'au moins cinq, dix ans ou plus. À cela s'ajoute la complexité supplémentaire de brancher un circuit à haute température sur un processus industriel, une connexion bien différente de la connexion au réseau électrique.

Comme le souligne Bernard Laponche, il est dangereux d'aller aussi loin dans la banalisation du risque : « on ne peut pas admettre la présence d'une installation nucléaire de base, contenant des matières hautement radioactives au sein d'une installation industrielle classique, de type ICPE dans laquelle une situation accidentelle grave (AZF, Lubrizol) pourrait endommager l'unité SMR et transformer l'accident en catastrophe ».²⁵⁰ Cette superposition inéluctable de statuts administratifs et de risques combinés ajouterait encore à la difficulté de chaque projet envisagé.

Bernard Laponche souligne bien la complexité de combiner une industrie classée car dangereuse à une installation nucléaire. A cela s'ajoute le problème de confier la responsabilité de concevoir, de construire et de faire fonctionner un réacteur nucléaire à des entités privées. Dans les projets cités, il s'agit même de sociétés créées récemment, qui dépendent de capitaux privés et même voyageurs de type start-up. Une telle structure peut être antinomique avec de tels projets dangereux, à réguler sur le long terme tant sur les processus de validation technique que sur le devenir des ensembles ainsi construits. Qui prendra la responsabilité des conséquences de ces projets ? L'absence d'assurance contre l'accident majeur doit-elle être dévolue à ces entités, alors qu'elle est déjà discutable pour une société nationale ?

Une autre start-up qui promet des délais courts pour un projet aux contraintes pourtant incompressibles est la société Naarea²⁵¹. L'entreprise a tenté (avant de renoncer) d'associer l'Agglomération d'Arras à ses projets. Elle avait aussi recruté pour sa communication l'ancien Haut-Commissaire aux Retraites Jean-Paul Delevoye. Elle défend un réacteur à sels fondus à 700°C, intégrant un combustible spécialement réalisé à La Hague à partir des combustibles usagés d'EDF²⁵². Le projet annonçait en 2022 un calendrier ébouriffant²⁵³ « 18 mois de préconception (jumeau numérique), 24 mois de test et 12 mois de retour d'expérience, 36 mois de développement, 12 mois

²⁴⁹ Légifrance (2016) *Les installations nucléaires de base* Code de l'Environnement articles L593 1-6. [site consulté le 20 mai 2022] https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000032044016

²⁵⁰ Laponche B. (2024) *Le dangereux engouement pour les SMR*. Revue Global Chance <https://global-chance.org/Le-dangereux-engouement-pour-les-SMR>

²⁵¹ Naarea Partners (2022) *Naarea poursuit son développement ambitieux* [site internet] (consulté le 30 juillet 2023) <https://www.naarea.fr/fr/france-2030-naarea-accelere-dans-le-nucleaire-durable-et-poursuit-son-developpement-ambitieux>

²⁵² Fontecave M. et al.(2022) *Les réacteurs nucléaires modulaires de faible puissance (SMR)*. Avis et rapport du Comité de Prospective de l'Académie des Sciences (p.13). [https://www.academie-sciences.fr/fr/Rapports-ouvrages-avis-et-recommandations-de-l-Academ\[...\]teurs-nucleaires-modulaires-de-faible-puissance-smr.html](https://www.academie-sciences.fr/fr/Rapports-ouvrages-avis-et-recommandations-de-l-Academ[...]teurs-nucleaires-modulaires-de-faible-puissance-smr.html)

²⁵³ Naarea (2022). *18 mois de préconception (jumeau numérique), 24 mois de test et 12 mois de retour d'expérience, 36 mois de développement, 12 mois de marche à blanc* [dossier de presse] (site consulté le 20 mai 2023) Naarea <https://www.naarea.fr/fr/actualites>

de marche à blanc ». Il s'agit non seulement créer un pilote avant 2030, mais aussi à lancer une activité économique de fabrication en série.

Dans la vision de Naarea, le client est un industriel, qui reçoit dans son site une unité nucléaire étanche. Celle-ci serait échangée régulièrement par un autre module complet. Ce modèle économique est celui d'un fournisseur intégré d'énergie classique avec contrat de performance, où l'investisseur avance l'ensemble des frais et des coûts. Un tel modèle serait évidemment hors épure sur le plan légal en termes de sécurité et de prolifération. De plus, une telle proposition commerciale suppose une fabrication très fiable en grande série pour mériter la confiance des banquiers pour organiser une sorte de leasing. Par exemple, Michelin le fait pour ses pneus de camions, mais ce système repose sur des centaines de millions de kilomètres parcourus. Naarea a pourtant été lauréate à hauteur de 10 millions d'euros de l'appel à proposition France 2030, et elle se pique de lever des milliards d'euros²⁵⁴.

Pourtant, les barrières et ces procédures dans le nucléaire ne sont pas des inventions bureaucratiques. Il s'agit des nécessités de la régulation d'un procédé risqué pour la sûreté des populations. La procédure veut aussi éviter la prolifération de l'arme nucléaire et s'assurer de la gestion des déchets. Il s'agit aussi de la mise au point d'ensembles particulièrement complexes, qui doivent avoir une fiabilité parfaite sur une très longue période. Des capitaux privés, par définition « à responsabilité limitée » ne devraient pas pouvoir déclencher la construction d'un tel équipement complexe. Le seul nettoyage en cas d'incident mettrait des décennies et coûterait des milliers de fois l'investissement limité de ces fonds.

Même avec l'exemple de l'investisseur aux poches très pleines qu'est Bill Gates, le projet privé, même très doté initialement, se retrouve pris dans un long processus d'homologation et de mise au point. Celui-ci va durer des décennies, parallèlement aux efforts d'industrialisation, avant de déboucher sur un produit compétitif. Ce qu'on appelle la "vallée de la mort" des projets en développement. Quelle que soit la valeur technique des projets ou les prouesses des équipes, le projet ne peut devenir un produit industriel sans avoir passé les différentes barrières institutionnelles. Ainsi, pour assurer son autorisation aux États-Unis, le défunt projet NuScale -un réacteur plutôt simple fonctionnant à l'eau- a ainsi passé dix ans et dépensé 500 millions de dollars²⁵⁵ sur ses études initiales et sur son processus d'autorisation.

Au final, la présentation d'un nucléaire « start-up » mené par des entreprises jeunes et dynamiques donne une image trompeuse de cette industrie complexe et exigeante, très liée aux États. Le nucléaire a notamment été qualifié à raison de « colbertiste »

²⁵⁴ BFM (2021) NAAREA, *la start-up qui veut renouveler le nucléaire français*. Interview de Jean-Luc Alexandre sur BFM-TV du 2 décembre 2022 [vidéo] https://www.bfmtv.com/economie/replay-emissions/good-morning-business/jean-luc-alexandre-naarea-naarea-la-start-up-qui-veut-renouveler-le-nucleaire-francais-02-12_VN-202112020047.html

²⁵⁵ Plumer B. et al. (2023) *U.S. Bets on Small Nuclear Reactors to Help Fix a Huge Climate Problem* New York Times [article de presse, 12 novembre 2013]. <https://www.nytimes.com/interactive/2023/11/12/climate/nuclear-reactors-clean-energy.html?searchResultPosition=2>

par l'industriel Louis Gallois ce qui est à l'opposé de cette image projetée²⁵⁶. Celui-ci lie même la force de l'État et l'autorité de sûreté nécessaire pour ce secteur.

7) Les SMR ne sont pas pertinents pour remplacer les centrales à charbon

L'utilisation de sites existants de centrales à charbon est parfois citée comme le marché des petits réacteurs, car leur puissance est comparable à certaines centrales thermiques. Les partisans des SMR mettent également en avant que leur utilisation pour remplacer les centrales à charbon permet de se placer sur des fleuves à moindre débit que les cours d'eau actuellement équipés de nucléaire. Selon Renaud Crassous, responsable chez EDF des petits réacteurs NUWARD, dans les pays ayant déjà du nucléaire, il y a 3300 centrales à charbon à remplacer d'ici 2050, dont plusieurs centaines en Europe, dont la puissance est similaire, entre 300 et 400 MW, au couple de réacteurs de NUWARD. Ces centrales se situent notamment dans l'est de l'Europe. C'est aussi l'estimation d'une étude de l'AIEA pour les États-Unis²⁵⁷, selon qui ces centrales représenteraient 300 GW de puissance dans ce seul pays.

Cependant, cette substitution pose question, car il s'agit d'une création de sites nucléaires nouveaux. Cela impose des procédures complexes et contraignantes, comme l'estime pour les États-Unis le cabinet d'avocats White&Case²⁵⁸. Comme vu précédemment, transformer un site thermique en site nucléaire suppose de devenir une Installation Nucléaire de Base ou l'équivalent au titre des lois nationales ou des exigences du traité de non-prolifération. Le changement imposerait aussi une protection anti-sismique ce qui suppose de démolir l'ensemble des infrastructures, sans pouvoir récupérer les fondations par exemple. Il faut aussi prendre en compte la protection des eaux, car selon l'AIEA ces petits réacteurs sont souvent conçus pour être enterrés, partiellement ou complètement, afin de limiter les risques de sécurité et de sûreté. L'Agence rappelle que les impacts de ce type de centrales ensevelies sur les nappes phréatiques et différents composants du sol nécessiteraient une étude approfondie et l'infrastructure adaptée²⁵⁹. Ainsi, remplacer une centrale à charbon par une centrale nucléaire est un projet complexe et chaque cas est spécifique et se heurte à des règles lourdes et incontournables.

De plus le calendrier pose ici aussi question, car ces centrales charbon à déclasser sont souvent vétustes voire déjà en cours de remplacement à court terme. Les offres

²⁵⁷ Joanne Liou (2021), *What are Small Modular Reactors (SMRs)?* Office of Public Information and Communication de l'AIEA [site internet, consulté le 20 mai 2023] :

<https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs>

²⁵⁸ Garton D. (2021) *Why small modular reactors will shape the future of nuclear debate*. Cabinet White&Case [note] <https://www.whitecase.com/sites/default/files/2021-10/why-small-modular-reactors-will-shape-future-nuclear-debate-final-web-v2.pdf>

²⁵⁹ IAEA (2020), *Considerations for Environmental Impact Assessment for Small Modular Reactors*, IAEA-TECDOC-1915, AIEA, Vienne (2020); (p.10). https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1915_web.pdf

de petits réacteurs ne sont promises que pour des horizons nettement plus lointains - et hypothétiques - à vingt ou trente ans.

Au final, selon l'AIE, la plupart des réacteurs SMR d'ici à 2040 sont destinés à des sites nucléaires existants, soit sous forme de prototype, soit pour le cas des États-Unis pour rendre possible l'autorisation et le financement de réacteurs trop difficiles à construire. Selon l'Agence, cela signifie que le déploiement à plus grande échelle des SMR, sur lequel repose la baisse de coûts annoncée, ne devrait se produire qu'après cette phase de confirmation (et peut être jamais). Implicitement, c'est aussi une phase de sélection entre les modèles et les constructeurs qui bénéficieront ou non du soutien le plus important. L'horizon est donc en réalité bien plus éloigné (pas avant 2040), notamment pour les réacteurs qui auraient vocation à produire autre chose que de l'électricité (vapeur, hydrogène...).²⁶⁰ Et encore ne s'agit-il que des réacteurs classiques à eau pressurisée et vapeur²⁶¹, les autres cycles ayant encore besoin de nettement plus de temps de développement et de mise au point.

8) Pas de marché magique

Aujourd'hui, il n'existe pas de clients suffisamment intéressés par les SMR pour lancer un marché des SMR. D'après le rapport du MIT de 2018, "le problème de l'industrie n'est pas qu'elle a négligé des segments de marché précieux qui ont besoin de réacteurs plus petits. Le problème est que même ces réacteurs à échelle optimale sont trop chers par unité de puissance. Se concentrer sur les segments de marché qui ont besoin de réacteurs plus petits ne sera d'aucune utilité si la conception plus petite ne permet pas d'abord de réduire radicalement le coût d'investissement par unité. Si la technologie nucléaire ne peut pas être compétitive à son échelle optimale de production, qu'elle soit grande ou petite, il est difficile de voir comment elle réussira en réduisant la taille des centrales en deçà de la taille optimale". Le rapport précise que "si, en revanche, les centrales de petite taille sont optimales et permettent de réduire radicalement les coûts d'investissement unitaires, les avantages annexes liés à l'accès à un marché plus vaste ne seront qu'un bonus appréciable ». Seulement, ils insistent aussi sur le fait que les avantages spécifiques d'un réacteur de petite taille ne vont pas compenser l'échec d'une baisse radicale des coûts d'investissement unitaires.

En 2014, le PDG de Westinghouse Danny Roderick, explique l'abandon de son projet de SMR : "le problème avec les SMR n'est pas la technologie, ce n'est pas le déploiement, c'est qu'il n'y a pas de clients"²⁶².

²⁶⁰ AIE (2018). *Nuclear Power and Secure Energy Transitions Small Modular Reactors*, Agence Internationale de l'Energie (p.93) <https://iea.blob.core.windows.net/assets/016228e1-42bd-4ca7-bad9-a227c4a40b04/NuclearPowerandSecureEnergyTransitions.pdf>

²⁶¹ Glaser A. et al.(2015) *Small Modular Reactors, an Energy Technology Distillate*, Andlinger Center / Princeton [fiches synthétiques]. <https://acee.princeton.edu/wp-content/uploads/2015/06/Andlinger-Nuclear-Distillate-Article-2.pdf>

²⁶² FOE Australia (2019) *Westinghouse Backs off Small Nuclear Plants*, [article de presse, Litvak A.(2014)] dans *Small Modular Reactors*, Soumission au Gouvernement Fédéral Australien N°36 (p.22) <https://nuclear.foe.org.au/wp-content/uploads/2019-Federal-Nuclear-Inquiry-Joint-ENGO-Submission-Final.pdf>



Enfin, à toutes ces formidables contraintes, il faut ajouter le refus probable du public d'une telle implantation. Le GIEC note par exemple que le soutien pour des installations nucléaires est moins fort que pour les renouvelables²⁶³.

9) Un monopole sinon rien ?

Le groupe de recherche Andlinger de l'Université Princeton²⁶⁴ compare le paysage des fournisseurs et des clients pour les SMR à une architecture en étoile : "dans ce paysage, quelques fournisseurs internationaux ou régionaux situés dans les centres, fourniraient non seulement des réacteurs aux pays, mais offriraient également des services d'amont et d'aval du cycle du combustible. Cette situation peut être comparée à celle de l'industrie aéronautique civile, où un très petit nombre de fournisseurs (Boeing et Airbus) ont essentiellement conquis le marché mondial après avoir absorbé la plupart de leurs concurrents plus petits. Ces deux entreprises fabriquent leurs avions sur un très petit nombre de chaînes de montage pour l'ensemble des clients internationaux et assurent également un service après-vente étendu".

En effet, tout comme Airbus ou Boeing, des services intégrés pour les combustibles nucléaires et pour les déchets seraient proposés, au point de prendre en charge ces questions pour les clients. C'était d'ailleurs le modèle implicite du traité Euratom des origines, qui aurait évité aux usagers du nucléaire de dépendre d'un état fournisseur du combustible. Il a pourtant été régulièrement rejeté, notamment par les états possesseurs de l'arme atomique - dont la France - ou souhaitant le devenir. Cette structure viserait à décourager les capacités de retraitement permettant de développer des armements, estime le Andlinger Center. Une concentration en très peu de modèles suppose aussi la confiance totale entre pays sur les technologies, voire une autorité de sûreté mutuellement reconnue, ce qui n'existe pas dans ce marché particulièrement fragmenté.

Cette absence de confiance dans la coopération future mine les projets de petits réacteurs. En effet à ce stade, il n'existe aucune usine dans le monde capable de produire ces modules à la chaîne. Comme le souligne Renaud Crassous, directeur du projet SMR chez EDF, " le marché n'existe pas encore aujourd'hui", et il n'y a quasiment pas de clients prêts à acheter des SMR"²⁶⁵. Une synthèse du journaliste Fabien Magnenou exprime bien ce dilemme : afin de faire décoller cette industrie, il faudrait d'abord uniformiser les normes internationales de sûreté afin de proposer un modèle unique, qui n'a pas besoin d'être adapté à chaque pays. La standardisation, au cœur du modèle économique de ces réacteurs, doit en effet permettre d'abaisser les coûts"²⁶⁶. Ces considérations économiques percutent en plein l'idée de

²⁶³ Clarke, L. et al. (2022). *Energy Systems : Mitigation of Climate Change*. (ch.6 p.640) Cambridge University Press doi: 10.1017/9781009157926.008. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>

²⁶⁴ Glaser A. et al.(2015) *Small Modular Reactors, an Energy Technology Distillate*, Andlinger Center / Princeton [fiches synthétiques]. <https://acee.princeton.edu/wp-content/uploads/2015/06/Andlinger-Nuclear-Distillate-Article-6.pdf>

²⁶⁵ Magnenou F. (2021) *France 2030 : quel avenir industriel pour les SMR?*, [Emission Radio] 13/10/2021 https://www.francetvinfo.fr/economie/industrie/france-2030-quel-avenir-industriel-pour-les-smr-ces-petits-reacteurs-nucleaires-vantes-par-emmanuel-macron_4803423.html

²⁶⁶ Idem.

souverainisme industriel, qui sous tend le discours de relance du nucléaire par les petits réacteurs, une vision qui domine en France mais aussi dans de nombreux pays fournisseurs comme la Corée ou le Royaume-Uni.

Provisoire / Draft



8. Les SMR : le dessein caché de l'industrie nucléaire

***E**n France, les SMR ne sont pas une priorité stratégique des pouvoirs publics pour développer le nucléaire civil. Les fonds alloués visent surtout à consolider des industries militaires comme la propulsion des sous-marins ou à justifier des structures de recherche héritées du passé.*

1) Les SMR présentent un faible intérêt pour l'industrie française

L'intérêt objectif des petits réacteurs peut sembler assez faible pour la France, tant pour son propre système électrique que pour ses chances à l'export.

Initialement en effet, le réacteur NUWARD n'a pas été pensé pour le marché domestique. Le responsable du programme SMR au CEA explique ainsi à La Tribune²⁶⁷ que le réseau en France est déjà adapté à supporter de grosses puissances nucléaires et n'a pas besoin de se décarboner. Le démonstrateur NUWARD en France vise à se donner des chances de succès à l'international, une « robustesse industrielle », selon Renaud Crassous de EDF²⁶⁸.

Cependant, l'industrie française du nucléaire et EDF touchent à leurs limites de capacités technique, humaine et financière. En effet, l'industrie est mobilisée dans les prochaines années par une série de chantiers stratégiques pour elle et pour la production électrique :

- D'abord pour retrouver des niveaux de production plus élevés dans le parc nucléaire actuel. Sa productivité reste en effet très inférieure à celle de ses homologues (États-Unis, Finlande...), ce que soulignent les éditions successives du rapport sur l'industrie nucléaire WNISR²⁶⁹. Dans ce cadre il s'agit aussi de travaux de mise en sécurité suite aux incidents de corrosion sous contrainte ou d'autres pannes affectant ces centrales.
- Ensuite, pour le "Grand Carénage", c'est-à-dire la prolongation des réacteurs existants à 50 ans ou à 60 ans de durée de fonctionnement. Pour l'instant seul un réacteur à Tricastin²⁷⁰ a été formellement autorisé à poursuivre son fonctionnement dix ans de plus au-delà des 40 ans, sous conditions et après

²⁶⁷ Raynal J. (2021) *Nucléaire : dix questions pour comprendre la révolution promise par les petits réacteurs* La Tribune de l'Economie 25 mai 2021. <https://www.latribune.fr/entreprises-finance/industrie/energie-environnement/nucleaire-dix-questions-pour-comprendre-la-revolution-promise-par-les-petits-reacteurs-885334.html>

²⁶⁸ Idem (§5)

²⁶⁹ Schneider et al (2022) *Indisponibilités du parc nucléaire 2019-2021* [WNISR version française] (pp.41-50) https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/wnisr2022-re_sume_-fr.pdf

²⁷⁰ ASN (2023) *Décision N°2023-DC-0764*, Autorité de Sûreté du Nucléaire. <https://www.asn.fr/l-asn-informe/actualites/poursuite-de-fonctionnement-du-reacteur-1-de-la-centrale-nucleaire-du-tricastin>

un processus lourd. Le passage de l'ensemble du parc nucléaire représente un processus coûteux et fastidieux qui ne fait que commencer.

- La construction de l'EPR de Flamanville²⁷¹ et des réacteurs de Hinkley Point n'est pas encore achevée. De même, leurs homologues chinois ont également des difficultés non résolues, inquiétantes pour les constructeurs de ces réacteurs²⁷².
- EDF et l'industrie nucléaire se proposent de mettre en service un nouveau modèle de grand réacteur, le EPR2, à valider et à construire d'abord à Penly puis dans d'autres sites à l'horizon des vingt prochaines années. La conception de ce modèle nouveau, sa validation et son industrialisation sont cruciaux pour la survie des industries de construction nucléaire.
- De plus, EDF, désormais nationalisée, a aussi un objectif élevé de développement des renouvelables solaire et éolien à plus court terme, avec les réseaux de transport associés. À terme, ces productions représentent entre la moitié et les deux tiers de la production en France. Avec leurs réseaux associés, elles représentent le maillon le plus urgent de la décarbonation du système électrique.
- L'électrification massive en cours du transport et de l'industrie, dans le cadre de la transition de ces secteurs, demande aussi un fort investissement dans la distribution électrique.

En face de ces chantiers colossaux et d'importance stratégique, que pèsent les petits réacteurs ? La construction de un ou plusieurs prototypes de petits réacteurs et leur industrialisation en vue de leur exportation est une tâche de bien plus longue haleine, risquée à la fois sur les délais, les coûts et les débouchés commerciaux. Ce chantier suppose un soutien considérable de l'État. Plusieurs écueils sont déjà en vue pour les petits réacteurs :

- Le recrutement de professionnels et d'ingénieurs est particulièrement tendu dans ces professions. Les chantiers cités plus haut sont prioritaires pour la filière, bien plus que le développement de petits réacteurs. En particulier, pour EDF et pour les autres acteurs de l'énergie, un niveau d'embauche et de qualification inédit est déjà nécessaire, estimé à plus de 100 000 ingénieurs et techniciens par leur syndicat professionnel soit 10 000 à 15 000 nouveaux recrutements annuels contre 1500 jusqu'ici. Ces embauches proviendraient en grande partie de métiers en tension²⁷³. Le développement hypothétique des

²⁷¹ Schneider et al (2022) *La saga sans fin de Flamanville 3* [WNISR version française] (p. 52) https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/wnisr2022-re_sume_-fr.pdf

²⁷² De Beaupuy et al (2023) *EDF Is Changing Nuclear Fuel Cladding Amid Report of China Issue* [article de presse] <https://www.bloomberg.com/news/articles/2023-07-05/edf-is-changing-nuclear-fuel-cladding-amid-report-of-china-issue#xj4y7vzkg>

²⁷³ Godelier M. (2023) *Comment la filière nucléaire compte recruter au pas de course des dizaines de milliers de travailleurs.* *La Tribune* 17 mars. <https://www.latribune.fr/entreprises->

petits réacteurs viendrait donc après la vague de construction renouvelable (notamment l'éolien offshore), le grand carénage du nucléaire ancien, et la construction annoncée de six voire quatorze EPR2.

- Ensuite, parce que la logique industrielle du développement de petits réacteurs à l'échelle mondiale suppose la constitution d'un ou plusieurs oligopoles, initialement largement aidés par la puissance publique du chef de file pour les prototypes, la fabrication, et surtout les débouchés et les cycles du combustible. Or, ni le réacteur NUWARD ni aucun autre projet n'est la "pièce centrale" du jeu en France. Par ailleurs, le "grand jeu" nucléaire laisse peu de place à la France pour des alliances plus larges, hors d'une inféodation à des entreprises chinoises voire russes²⁷⁴. D'ailleurs, la France tente de masquer sa dépendance vis-à-vis des autres pays. Par exemple les forgeages des cuves des EPR de Flamanville ou de Olkiluoto (Finlande)²⁷⁵ ont été réalisés à 80% au Japon par les industriels JSW et Mitsubishi Heavy Industries. D'autres pièces dépendent aussi de l'étranger, par exemple les générateurs de vapeur ont été forgés à 30% au Japon. Le reste de la fabrication²⁷⁶ a été réalisée en France. - Ces accrocs au « made in France » contredisent le souverainisme affiché des politiques sur le sujet nucléaire.
- L'hypothèse d'un "modèle commun" utilisant des normes et des approvisionnements en combustible internationalisés n'est pas envisagée, même entre Européens. C'est ainsi que les discussions visant un cadre commun²⁷⁷ des petits réacteurs entre la France et des pays alliés sur le nucléaire comme la Slovaquie, la Roumanie ou la République Tchèque n'envisagent pas de modèles communs, mais simplement une coordination des processus d'homologation et d'autorisation. Pire, les pays d'Europe centrale envisagent avant tout de s'équiper américain²⁷⁸.
- Pour lancer une filière au niveau nécessaire, il faudrait que les pouvoirs publics soient prêts à subventionner les capacités de production et les pré-séries, mais surtout à soutenir voire financer les exportations de petits réacteurs et garantir

finance/industrie/energie-environnement/comment-la-filiere-nucleaire-compte-recruter-au-pas-de-course-des-dizaines-de-milliers-de-travailleurs-952400.html

²⁷⁴ Cessac M. (2023) *Centrales nucléaires : la Chine et la Russie dominent le commerce mondial de l'atome*. Le Monde 12 avril 2023 [article de presse] https://www.lemonde.fr/economie/article/2023/04/12/centrales-nucleaires-la-chine-et-la-russie-dominent-le-commerce-mondial-de-l-atome_6169137_3234.html

²⁷⁵ Agence France Presse (2014) *Nucléaire: la cuve de l'EPR de Flamanville forgée à 80% au Japon* [Dépêche AFP 30 janvier 2014] <https://www.connaissancedesenergies.org/afp/nucleaire-la-cuve-de-l-epr-de-flamanville-forgee-a-80-au-japon-140130>

²⁷⁶ Note : La **fabrication** comprend l'usinage, les perçages, les finitions, à partir d'une ébauche ou d'une pièce **forgée**. Cette dernière est formée à chaud partir d'un lingot de métal élaboré spécialement pour la pièce, dans cet exemple hors de France.

²⁷⁷ ASN (2023) *For the first time, a joint review has been carried out by three European safety regulators on the safety options of a small modular reactor project*. Autorité de Sureté du Nucléaire [communiqué du 27 septembre 2023] <https://french-nuclear-safety.fr/asn-informs/news-releases/a-joint-review-has-been-carried-out-by-3-european-regulators-on-the-safety-options-of-a-smr>

²⁷⁸ Simon F. (2023). *US aiming to deploy Europe's first small modular reactor 'in late 2020s', official says* Euractiv 29 sept. 2023 [article de presse] <https://www.euractiv.com/section/energy-environment/news/us-aiming-to-deploy-europes-first-small-modular-reactor-in-late-2020s-official-says/>

leur approvisionnement en combustible, et ceci longtemps après le début de la fabrication en série. Au regard des sommes nécessaires et des enjeux diplomatiques, cela semble peu probable.

- Enfin, une autre raison essentielle, déjà mentionnée, est la poursuite spectaculaire des baisses de coût des alternatives, comme les énergies renouvelables, en production et en stockage, partout dans le monde. Cela laisse peu de place à des projets visant un développement à la fin des années 2030 au plus tôt pour les réacteurs à eau, et à fortiori pour des réacteurs d'autres cycles quinze ans plus tard.

Cet intérêt limité se retrouve dans les débats du gouvernement français sur "les travaux relatifs au nouveau nucléaire", de 2022. Il ne mentionne qu'en passant les "éventuels chantiers SMR" (sic)²⁷⁹. Ce document gouvernemental de préparation de la loi de programmation PPE se concentre avant tout sur l'EPR2. De façon très intéressante, ce document cite les avis des représentants de la filière nucléaire (le GIFEN), qui estiment indispensable le lancement de la construction de nouveaux grands réacteurs mais ne mentionnent pas les SMR. Il dresse un état des lieux plutôt inquiétant des différents segments industriels (ingénierie, génie civil, chaudronnerie, etc.) du point de vue de 6 catégories de risques. L'analyse montre qu'il existe des monopoles ou quasi-monopoles pour 12 segments industriels sur 16, une capacité industrielle insuffisante pour 6 segments et des métiers en tension pour 6 segments notamment²⁸⁰. Trois segments sont identifiés comme particulièrement à risques car cumulant plusieurs facteurs de risques : tuyauterie-soudage, chaudronnerie et process nucléaire (circuit primaire et échangeurs). La conclusion inclut même "un risque élevé (de 30 à 75% des répondants) de ne pas être en mesure d'assumer la charge liée à la construction de nouveaux réacteurs"²⁸¹!

Le discours sur la relance du nucléaire d'Emmanuel Macron, à Belfort en février 2022, est emblématique du volontarisme souverainiste, avec des références appuyées à Charles De Gaulle, Georges Pompidou, à la grandeur passée de l'« entreprise nationale EDF » et de son ancien patron Marcel Boiteux²⁸². Le discours mentionne les petits réacteurs, mais insiste surtout sur la priorité pour l'industrie nucléaire de remettre en ordre de marche le nucléaire ancien et surtout de construire des grands réacteurs. Les SMR ne sont ainsi mentionnés qu'une fois, contre 10 pour les EPR²⁸³.

Dans son discours, Emmanuel Macron admet aussi *mezza voce* que la majorité du courant électrique produit d'ici deux décennies proviendra de l'éolien et du solaire. Il annonce également pour 2050 100 GW de solaire photovoltaïque, 30 GW en éolien offshore et 29 en éolien terrestre, soit environ 430 TWh/an²⁸⁴. En tout état de cause il

²⁷⁹ PPE (2022). *Travaux relatifs au nouveau nucléaire, PPE 2019-2028* [rapport février 2022] <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-39140-PDF1-2022-02-18-Rapport-nucleaire.pdf>

²⁸⁰ Idem

²⁸¹ Idem

²⁸² Macron E. (2022), *Reprendre en main notre destin énergétique*. Site de la Présidence <https://www.elysee.fr/emmanuel-macron/2022/02/10/reprendre-en-main-notre-destin-energetique>

²⁸³ Idem

²⁸⁴ Idem

s'agit de couvrir une part majoritaire de la consommation française, voire des deux tiers avec l'électricité hydraulique (60 TWh/an).

2) Bercy participe au discours de soutien en faveur des SMR

Lors de la présentation du volet nucléaire du plan "France Relance", un plan du Ministère des Finances, celui-ci affirme qu'il souhaite « accélérer l'innovation avec l'émergence de nouveaux réacteurs nucléaires de petite taille ». Les SMR y sont décrits comme une « solution compétitive pour l'industrie et les particuliers », qui pourraient permettre de remplacer les centrales thermiques « à un coût raisonnable sous l'effet d'une production en grande série »²⁸⁵. Les arguments traditionnels en faveur des SMR sont repris : Bercy mentionne « la réduction des volumes et de la radioactivité des déchets », le « multi-recyclage des matières nucléaires », « l'amélioration de la sûreté »²⁸⁶, trois arguments dont le présent exposé a montré la faiblesse. Bercy affirme enfin que les SMR permettront « l'émergence de jeunes entreprises innovantes »²⁸⁷ et lance un appel à propositions, une porte ouverte à tous les dangers.

Le ministère fait également le lien entre les SMR et le parc nucléaire existant : il s'agit d'accélérer (les) programmes de recherche sur les SMR, et « en parallèle de ces [derniers] », de continuer d'entretenir le parc nucléaire existant et de développer la construction des EPR2. Ce soutien gouvernemental en termes de discours, mais aussi de subventions apportées est loin d'être anodin. Ses déterminants sont à chercher dans plusieurs directions, indépendantes de la crise climatique ou de la transition énergétique.

3) Maintenir à flot le secteur de la recherche française sur le nucléaire

La France est le dernier pays industriel à afficher la moitié de ses dépenses en recherche-développement (R&D) dans le domaine énergétique, quand le reste du monde est descendu autour de 20% et se tourne vers l'efficacité et les énergies renouvelables, selon l'OCDE. Le graphe suivant illustre cette évolution depuis une situation très majoritairement nucléaire dans le monde en 1974 vers des dépenses désormais plus équilibrées entre les secteurs de l'énergie²⁸⁸.

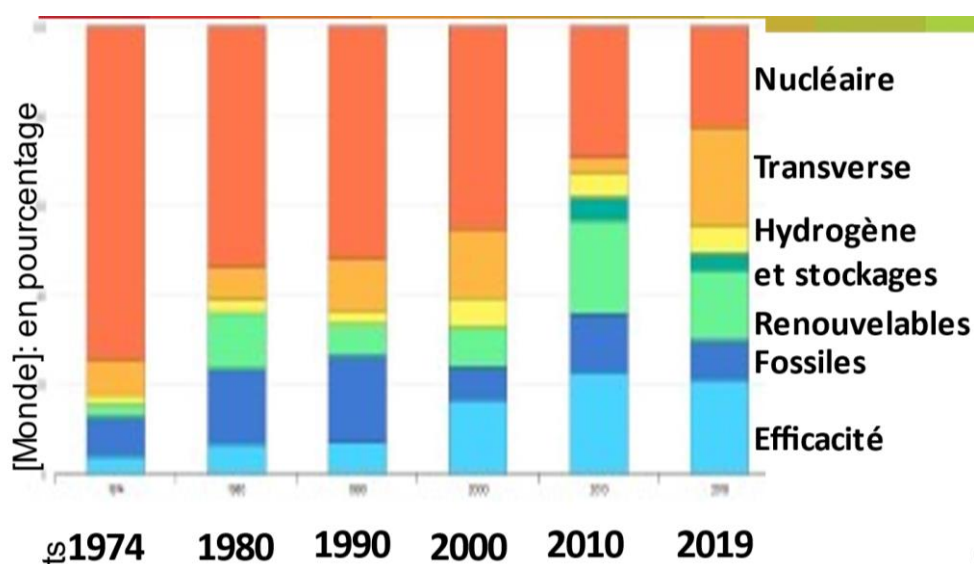
Évolution de la part du nucléaire dans la recherche publique

²⁸⁵ Ministère de l'Économie (2023) *De nouveaux réacteurs innovants* [Site Internet] (consulté le 20 juillet 2023) <https://www.economie.gouv.fr/france-2030-plan-ambitieux-nucleaire-demain>

²⁸⁶ Idem

²⁸⁷ Idem

²⁸⁸ IAE-AIE (2023) *Energy Technology RD&D Budgets May 2023* Edition http://wds.iea.org/wds/pdf/rdd_documentation.pdf



Part des dépenses publiques de R&D énergie dans le Monde

La recherche sur l'énergie est essentiellement publique, avec environ 1,3 Mds\$ issus de l'industrie privée contre 90 Mds\$ issus du public. Le tableau suivant montre les dépenses en valeur absolue (moyenne des années 2019-2020) et en pourcentage pour les principaux pays nucléaires de l'OCDE.²⁸⁹

	R&D Nucléaire Millions de US\$	Part R&D nucléaire Part en pourcent
France	910	50%
Japon	1008	35%
Etats Unis	1429	16%
Royaume-Uni	384	31%
Allemagne	270	18%
Canada	117	11%
Belgique	126	39%
UE	215	10%
Total OCDE	4750	20%

Source OCDE 2022 valeurs 2019-2020

Tout ce soutien institutionnel vise ainsi à pérenniser sur le long terme les développements, et non à fournir de l'énergie dans les prochaines décennies. La commission Fontecave indique ainsi que le programme vise à définir les réacteurs à neutrons rapide au sodium pour le prochain siècle, et « permettre [ainsi] au CEA de maintenir la compétence de la France sur les réacteurs à neutrons rapides. Pour

²⁸⁹ IEA (2020) *IEA public energy technology R&D and demonstration spending by technology, 1977-2019*, IEA Statistics [site internet] consulté le 20 mai 2022. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/iea-public-energy-technology-r-and-d-and-demonstration-spending-by-technology-1977-2019>



l'instant, le CEA n'en est qu'à des esquisses²⁹⁰. Selon le même rapport, Orano reconnaît un retour d'expérience inexistant des projets proposés, et que pour d'autres, l'indice technologique TRL (Technology Readiness Level) est proche de 2²⁹¹. Une telle valeur (sur une échelle de huit) dans le développement suggère que ces réacteurs n'en sont qu'à une phase très préliminaire de leur conception. Leur concrétisation industrielle mettrait des décennies.

Le rapport conclut que le projet porté également par le CNRS d'un réacteur incluant un flux de déchets comme combustibles et intégrant un traitement en continu, est d'une complexité chimique élevée voire rédhibitoire²⁹². De tels projets « pour le prochain siècle » (sic) demandent « une recherche considérable ». La lutte contre le changement climatique - 1,5 degrés atteints d'ici une décennie et non à la fin du siècle est pourtant bien plus urgente. Ce choix d'orientation de la recherche est fait au détriment d'autres secteurs qui pourraient avoir un bien plus grand impact sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

4) Pérenniser les motoristes navals militaires

Dans son discours de Belfort de février 2022, le Président Macron a confirmé deux axes pour l'allocation de fonds importants aux petits réacteurs : d'une part, 500 millions d'euros vont aller au projet NUWARD ; d'autre part une somme équivalente sera allouée dans des appels à proposition pour d'autres réacteurs.

Le premier projet, celui de la société NUWARD s'est vu ainsi garantir le financement d'études pour environ 500 Millions d'euros. Elle est filiale de grands noms comme EDF et comme le CEA, mais aussi et surtout de Naval Group et Technicatome, le bureau d'étude souvent associé aux chantiers navals militaires pour la construction de moteurs de sous-marins ou du porte-avion.

- « compléter les programmes cycliques et peu volumineux de la Marine nationale en matière de bâtiments à propulsion nucléaire²⁹³.
- maintenir ses compétences très spécifiques et pointues, tant en conception qu'en production. Cela a un prix, qu'il faut parfois consentir, pour éviter qu'il soit encore plus coûteux en cas de perte de savoir-faire.
- [obtenir] à moyen et long terme un apport de charge à ses ateliers spécialisés dans la propulsion nucléaire
- contribuer au développement et s'approprier des technologies innovantes potentiellement communes au SMR français et à d'autres projets liés à la propulsion nucléaire.

²⁹⁰ Fontecave M. et al.(2022) *Les réacteurs nucléaires modulaires de faible puissance (SMR)*. Avis et rapport de l'Académie des Sciences (p.16). https://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/221020_SMR.pdf

²⁹¹ Note : L'échelle **TRL** pour « Technology Readyness Level » décrit l'état de maturité d'une technologie. Un TRL de 2 est très préliminaire et s'apparente à de la recherche.

²⁹² Fontecave M. et al.(2022) *Les réacteurs nucléaires modulaires de faible puissance (SMR)*. Avis et rapport de l'Académie des Sciences (p.15-16). https://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/221020_SMR.pdf

²⁹³ Mer et Marine (2019) *Naval Group se relance dans le nucléaire civil* [site internet] <https://www.meretmarine.com/fr/defense/naval-group-se-relance-dans-le-nucleaire-civil>



- parfaire sa connaissance et sa pratique des exigences des autorités de sûreté et des clients dans le domaine du nucléaire civil pour anticiper celles qui s'appliqueront de facto, un jour, au domaine militaire, y compris en matière de cyber sécurité »²⁹⁴.

Ces motivations sont donc assez éloignées de la conception d'un réacteur commercial privé, destiné à participer à la transition énergétique.

Quant au bureau d'étude Technicatome, il a déjà réalisé des mini-réacteurs sur un modèle similaire pour des navires militaires français. Mais l'entreprise a été fragilisée par la perte d'un contrat de sous-marins avec l'Australie en 2022. Il s'agissait d'une commande à propulsion classique, supplantée par une proposition nucléaire émanant des États-Unis et de la Grande-Bretagne. Cet échec a entraîné de graves difficultés pour ces technologies et sur le plan géopolitique²⁹⁵. Le bureau d'étude regonfle ainsi ses commandes en attendant de construire la propulsion d'un futur porte-avions.

Ce lien fort entre les nucléaires civil et militaire a été réaffirmé par le Président de la République dans ses discours récents. Selon lui, il n'y a pas de sens à les dissocier : « sans nucléaire civil, pas de nucléaire militaire, sans nucléaire militaire, pas de nucléaire civil », cite Jean-Michel Bezat dans Le Monde²⁹⁶. Le chroniqueur estime que pour Emmanuel Macron, c'est la filière militaire qui prime et explique ses choix. C'est certainement le cas pour les moteurs navals nucléaires. Pour la production de plutonium et d'uranium enrichis destinés à la Force Nucléaire, c'est moins certain vu les inventaires de plutonium déjà particulièrement importants dans les stockages de La Hague, recensés à plusieurs reprises par l'association d'experts Global Chance²⁹⁷.

²⁹⁴ Idem

²⁹⁵ Fayet H. et al. (2023) *La propulsion nucléaire navale : enjeux techniques et stratégiques d'une technologie confidentielle* Prolifération Papers, n° 66, novembre 2023 <https://www.ifri.org/fr/publications/etudes-de-lifri/prolifération-papers/propulsion-nucleaire-navale-enjeux-techniques>

²⁹⁶ Bezat J-M (2020) *Nucléaire : pour Emmanuel Macron, c'est la filière militaire qui compte*. Le Monde 21 décembre 2020 [article de presse] https://www.lemonde.fr/idees/article/2020/12/21/nucleaire-pour-emmanuel-macron-c-est-la-filiere-militaire-qui-prime_6064052_3232.html

²⁹⁷ Global Chance (2013) *Plutonium : Ressource énergétique ou fardeau mondial ?* Les cahiers de Global Chance N°34 novembre 2013 <https://www.cigeo.gouv.fr/sites/default/files/2018-09/Global-chance-Le%20casse-tete-des-mati%C3%A8res-et-dechets-nucl%C3%A9aires.pdf>

9. Les SMR : hors sujet face à la crise climatique

Les petits réacteurs sont des projets dépourvus de perspective d'industrialisation ou de rentabilité économique sérieuse. Leur calendrier les placerait bien au-delà des échéances de la crise climatique.

Le rôle de l'énergie nucléaire dans la production d'électricité reste un sujet de forte controverse, partout dans le monde. La discussion sur les petits réacteurs n'échappe pas à ce contexte polémique. D'emblée, il faut souligner que les petits réacteurs ne sont pas une option pour le climat.

La transition énergétique pour sortir des hydrocarbures s'inscrit dans cette urgence, une évolution désormais balisée par des trajectoires contraintes. Celles-ci sont décrites notamment par les agences inter-gouvernementales et surtout par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).- Ses derniers rapports soulignent l'urgence du changement, néanmoins possible par le déploiement des technologies disponibles. Des inflexions majeures dans les investissements énergétiques pourraient amorcer la substitution de la majeure partie des hydrocarbures à l'échéance de 2040 ou 2050. Ce calendrier contraint exclut l'ensemble des petits réacteurs.

Dans cette bataille du climat, le choix du nucléaire est présenté à nous sous trois formes :

- Les prolongements de réacteurs existants, qui posent la question des coûts mais aussi de la sécurité des équipements vieillissants ;
- la construction de grands réacteurs neufs, qui posent des questions épineuses de délais de construction et de coûts ;
- enfin, les petits réacteurs SMR et les cycles avancés. Ceux-ci ne sont en aucun cas une option. En effet, ils sont risqués dans leur mise au point et leur industrialisation ; ils sont bien plus chers que leurs concurrents nucléaires ou les alternatives ; mais surtout, ils ne peuvent pas contribuer à temps à la transition climatique, puisque, dans le meilleur des cas, ils ne pourraient être réellement opérationnels avant 30 ans et au-delà. Pire, les sommes importantes investies pour leur développement n'iront pas dans les énergies renouvelables et l'efficacité, seules à même de garantir les réductions rapides d'émissions.

1) « Trop tard, trop cher, trop risqué, trop incertain »²⁹⁸

Même à très long terme, les petits réacteurs auraient un impact faible sur la réduction des émissions mondiales de gaz à effet de serre. Leur mise en œuvre serait trop tardive pour contribuer aux objectifs de l'Accord de Paris de décarbonation. Durant

²⁹⁸ Granger M. et al. (2018) *US nuclear power: The vanishing low-carbon wedge* Proceedings of the National Academy of Science (PNAS), <https://www.pnas.org/content/115/28/7184>

cette période, les autres sources d'électricité ou d'énergie font mieux et plus rapidement, notamment au regard du potentiel commercial limité des SMR.

- « Trop tard, trop cher, trop risqué et trop incertain, estiment les auteurs »²⁹⁹ d'une critique du réacteur NuScale (États-Unis). De façon abrupte, le bénéfice climatique à attendre dans l'hypothèse d'un succès des SMR est nul, tant par rapport au nucléaire existant qu'aux alternatives. Tout d'abord, le démarrage tardif proposé de la diffusion et de l'industrialisation limite fortement leur potentiel face aux concurrents nettement moins chers, ou même à celui de la prolongation des centrales nucléaires existantes. Les objectifs de décarbonation massive demandés par l'Accord de Paris dans le cas de l'électricité visent déjà une division des émissions dès les années 2030 dans les pays développés, et dans la décennie suivante pour les pays en développement. Ces horizons pour une industrialisation à grande échelle sont hors du champ - même optimiste - des petits réacteurs.
- À un horizon plus lointain tel que 2040, la substitution annoncée d'hydrocarbures par les SMR paraît peu probable au regard des objectifs de décarbonation des réseaux électriques programmés en Europe et aux États-Unis et dans les pays où le nucléaire est déjà présent

La période la plus importante pour la lutte contre le réchauffement climatique est celle précédant 2030 (rapport AR6 de 2022 du GIEC). Le GIEC souligne aussi que dans le secteur de l'électricité, le solaire et l'éolien ont un potentiel sérieux pour contribuer à la division par deux des émissions dans la prochaine décennie..

2) Une chronologie qui néglige les inerties et les règles des mises au point industrielles

Les promoteurs des petits réacteurs annoncent des prototypes, des pilotes industriels voire des centrales commercialisables dans les dix ans, avec même dans le cas de la start-up Jimmy l'annonce d'un prototype en 2026. De tels horizons sont incompatibles avec le sérieux exigé par une telle activité, dangereuse et complexe. La mise au point technique des composants puis des ensembles, les procédures et les validations de sûreté, et la mise en place de filières industrielles demandent dans le meilleur des cas plusieurs décennies incompressibles. Ces exigences sont intrinsèques à l'activité nucléaire et à ses risques, qui demande de surcroît une intervention exigeante des pouvoirs publics.

Le développement de nouveaux réacteurs nucléaires et de cycles de combustibles innovants implique des délais considérables entre la mise au point de prototypes et sa validation par les autorités. L'industrialisation n'est ensuite envisageable qu'en cas de réussite de ces phases initiales, notamment s'il s'agit de séries à vocation d'exportation. Celle-ci exige la confiance des régulateurs et des clients d'autres pays que celui du constructeur. Ces procédures sont complexes et inéluctables.

²⁹⁹ Idem

Pour éviter les accidents, développer la confiance entre fournisseurs et créer une industrie la plus sûre possible, des méthodes procédurales poussées sont utilisées dans l'industrie. Elles ne sont pas toujours comprises du grand public. Ces processus sont de plusieurs ordres :

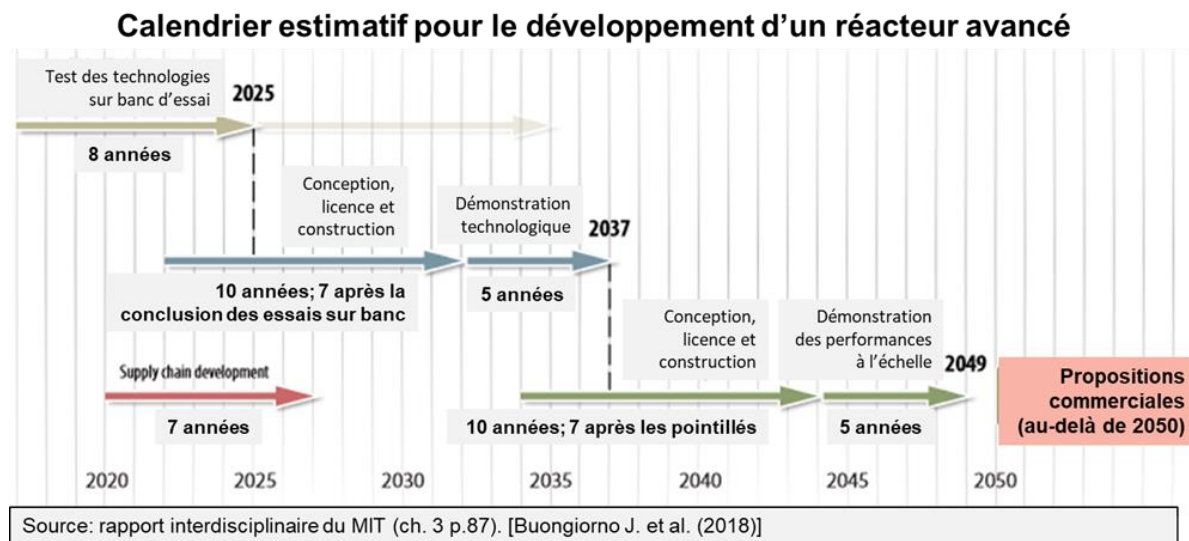
- Sûreté nucléaire. Quel est le risque d'accident, et que doit-on faire pour en minimiser les conséquences ? Ces calculs doivent être transparents vis-à-vis des autorités de sûreté. Elles supposent des formations et des procédures de validation qui ne peuvent pas être abrégées ou simplifiées.
- Assurance-qualité. Comment faire pour garantir des pièces métallurgiques critiques? Il n'est en effet pas possible de connaître en détail leurs défauts et leurs caractéristiques internes sans les détruire.
- Enfin, la création de la confiance suppose une protection contre des dérives de connivence, voire de corruption, tout en ayant le soutien de l'opinion publique. Le discours « start-up » sur l'agilité du privé voire sa supériorité masque ainsi une réalité de l'industrie nucléaire. Pour fonctionner, celle-ci est intrinsèquement liée aux États, d'abord pour des recherches et développements de longue durée, ensuite pour l'encadrement des autorisations et des procédures de sûreté ou de non-prolifération.

Ces trois points sont examinés dans la suite du texte. Un processus sur le long terme pour l'autorisation et les mises au point reste en effet incontournable. Pour les petits réacteurs, il faut considérer les chronologies des ingénieurs, des régulateurs, plus celles tout aussi incompressibles de l'industrialisation et de la commercialisation.

- **Prototype**. La mise au point vise à passer d'un concept de réacteur « de papier » à un prototype fonctionnel. Cela impose un cycle de mise au point pour passer du stade de concept à une machine en service pérenne. Ce calendrier va être contraint par l'existence de systèmes homologues ailleurs dans l'industrie, ou à l'inverse par la mise au point des parties inédites des réacteurs. Elles font appel à des matériaux ou à des techniques à mettre au point et à valider. Les cycles dits « avancés » partent ici avec un retard qui peut s'élever à plusieurs décennies.
- **Autorisations**. Le calendrier des autorisations vise d'abord la sûreté du modèle et de son cycle, acceptable ou non du point de vue des régulateurs puis des clients éventuels. La validation des choix détaillés de plans et de leurs modifications ultérieures passe par des études ouvertes aux experts et aux contradicteurs, garantissant le comportement de la machine homologuée puis de ses variantes. Les processus d'autorisation d'implantation dans un territoire ou un pays de construction s'y ajoutent. Ceux-ci peuvent inclure d'autres paramètres comme les rejets thermiques, les contraintes du réseau électrique local ou régional, les déchets nucléaires ou les impacts sur les milieux naturels.
- **Performance et industrialisation**. Enfin, le calendrier d'industrialisation doit baliser le passage d'un prototype à un modèle de série. L'enjeu est double.

- D'une part le service du client suppose de lui garantir la performance de la machine et son approvisionnement en combustible adapté.
-
- D'autre part le passage à une fabrication en série suffisante a pour objectif d'abaisser le coût des composants du réacteur. L'enjeu est aussi à ce stade de financer les usines de capacité suffisante avec leur fonds de roulement, leurs approvisionnements pour des années. Il faut aussi prévoir les unités de fabrication des combustibles voire les systèmes d'entreposage des futurs déchets.

Le rapport nucléaire du Massachusetts Institute of Technology (MIT), l'un des plus complets sur le sujet, mentionne un délai administratif d'au moins quinze à vingt ans pour en arriver à la phase commerciale après les premiers essais de prototypes. Selon les auteurs - issus d'un panel de laboratoires plutôt favorables à l'énergie nucléaire - aboutir à une offre cohérente et validée, acceptable pour les autorités de sûreté et de régulation, suppose de dépenser plusieurs millions d'heures d'ingénierie. Le schéma ci-dessous présente une telle chronologie pour les petits réacteurs, toujours selon le MIT (traduction E&E Consultant).



Légende : Chronologie estimée pour des réacteurs à cycle avancé selon le MIT. La fabrication en série ne commence qu'après ce long processus

Dans un tel agenda, le processus de commercialisation des réacteurs ne commencerait qu'à la fin des années 2040, à condition qu'ils aient franchi les obstacles techniques et légaux. Pourtant, le GIEC estime que le besoin de ressources décarbonées est immédiat ou à un horizon de moins de dix à vingt ans. L'Agence Internationale de l'Energie suggère des systèmes prédictibles de licence, avec des

démonstrations sur longue période, suivies de processus prédictibles d'autorisation pour la suite du développement³⁰⁰.

Chaque étape correspond à des niveaux d'exigence de plus en plus élevés des régulateurs. Enfin, le passage à une série commerciale change la nature du financement. Celui-ci sort d'une recherche-développement publique ou privée vers un modèle commercial bien plus cher, qui représente des sommes bien plus importantes. Même en imaginant des subventions initiales, les modèles économiques supposent d'avoir passé les étapes d'autorisation et de validation, mais aussi d'avoir la confiance du client. La rentabilité n'est testée qu'à ce moment-là.

a) Des règles d'autorisation complexes

L'homologation de sûreté du modèle de réacteur, ainsi que les procédures suivantes pour construire et localiser un réacteur vont être à la fois indispensables du point de vue légal, mais aussi pour avoir la confiance des investisseurs puis des clients. Il peut être tentant pour les promoteurs de « bluffer » sur leur chronologie, par exemple en indiquant que le dossier a été « déposé »³⁰¹. Dans ce registre, le système des « pré-licences » peut être trompeur. La Commission de Sûreté du Nucléaire du Canada (CNSC) propose un « service optionnel » appelé « *pre-licensing vendor design review* » destiné aux constructeurs et basé sur leurs déclarations. Ce processus a déjà été sollicité par dix propositions de petits réacteurs. La commission a dû ensuite préciser publiquement que cette revue ne certifie pas la sûreté, ni ne préjuge d'une future licence³⁰². Ce système de « pre-licensing » semble comparable au processus de dialogue technique « dossier d'options de sûreté » utilisé par l'Autorité de Sûreté Nucléaire en France, avant le Dossier d'Autorisation de Création bien plus lourd et contradictoire³⁰³.

Au final, l'homologation est une procédure très technique et fastidieuse, mais aussi le témoin d'un engagement plus politique, car elle est prise en charge par le régulateur, aux frais du contribuable. Pour le petit réacteur NuScale, le plus avancé des projets aux États-Unis, la NRC a investi 115 000 heures dans l'étude du dossier depuis son dépôt en 2017, selon Forbes³⁰⁴. Encore ne s'agit-il que de la première phase d'un processus beaucoup plus long. Entre-temps, l'industriel a retiré sa proposition pour annoncer un réacteur plus grand... abandonné peu de temps après faute de clients

³⁰⁰ AIE (2022). *Nuclear Power and Secure Energy Transitions* (p.90) [rapport] <https://iea.blob.core.windows.net/assets/016228e1-42bd-4ca7-bad9-a227c4a40b04/NuclearPowerandSecureEnergyTransitions.pdf>

³⁰¹ Schneider M. et al. (2020) *World Nuclear Industry Status Report 2019* (p. 201) <https://www.worldnuclearreport.org/-World-Nuclear-Industry-Status-Report-2019-.html>

³⁰² Canadian Nuclear Safety Commission(2022). *Pre-Licensing Vendor Design Review* [site internet consulté le 20 mai 2023] <http://nuclearsafety.gc.ca/eng/reactors/power-plants/pre-licensing-vendor-design-review/index.cfm>

³⁰³ Le Gros G. (2023) *Nuward remet son dossier d'options de sûreté à l'ASN*, Revue Générale Nucléaire [site consulté le 30/8/2023], <https://www.sfen.org/rgn/nuward-remet-son-dossier-doptions-de-surete-a-lasn/>

³⁰⁴ Carpenter S. (2020). *Bill Gates 'Nuclear Startup Unveils Mini-Reactor Design Including Molten Salt Energy Storage*, Forbes 31/08/2020 <https://www.forbes.com/sites/scottcarpenter/2020/08/31/bill-gates-nuclear-firm-says-new-reactor-can-backstop-grid-with-molten-salt-storage/?sh=441cd4c55e65>



pour y souscrire. Selon les promoteurs du projet américain de surgénérateur Oklo³⁰⁵, depuis sa création en 1975, la Nuclear Regulatory Commission (NRC) n'a autorisé aucun nouveau réacteur. L'entreprise promouvant les SMR propose donc de simplifier la procédure pour parvenir à ses fins !

Cette complexité extrême est aussi illustrée par le soutien proposé par le gouvernement fédéral, qui a investi plusieurs milliards à intervalles réguliers sous Georges W. Bush, Obama Barack, Donald Trump et plus récemment Joe Biden. Aux États-Unis, une partie importante du soutien public consiste en une sorte d'assurance contre les changements de règles, qui minent la confiance des fournisseurs et des financeurs. L'État Fédéral s'engage à compenser les pertes liées à l'action même des pouvoirs publics (changements de dessins, normes, procédures...). Un rapport au gouvernement fédéral décrit un cycle d'autorisation de dix ans de conception, suivi par 7,5 ans de processus d'autorisation, puis 3 à 4 ans de construction³⁰⁶.

Ailleurs qu'aux États-Unis, le SMR britannique proposé par Rolls-Royce prévoit un processus d'autorisation d'une dizaine d'années pour aboutir à une construction de son pilote « au début des années 2030 » en commençant par une revue publique de quatre ans au moins³⁰⁷. Pourtant, il s'agit d'un réacteur à eau pressurisée plutôt classique, à trois boucles primaires, et donc d'un cousin proche des réacteurs existants REP-PWR.

b) Les exigences de l'assurance qualité

Pour éviter les accidents et créer une industrie la plus sûre possible, des méthodes procédurales poussées sont utilisées dans les industries concernées par les pièces métalliques critiques³⁰⁸, très sollicitées. Pour être certain que les fabrications répondent aux exigences, on se base sur l'assurance-qualité pour la fabrication des ensembles et les pièces. Cet ensemble de règles comprend des procédures et des procédés figés, une hiérarchie stricte, et l'enregistrement méthodique des incidents ou des dérogations. La procédure suppose d'une part le suivi d'une procédure prévue à l'avance, d'autre part un ensemble d'intervenants respectueux des règles.

L'objectif est de garantir une fiabilité des ensembles affectant la sûreté du public ou des usagers. La conformité ne peut en effet être démontrée que par la répétition

³⁰⁵ Clifford C. (2021) *Oklo has a plan to make tiny nuclear reactors that runoff nuclear waste*. Site CNBC [consulté le 20 mai 2023] <https://www.cnbc.com/2021/06/28/oklo-planning-nuclear-micro-reactors-that-run-off-nuclear-waste.html>

³⁰⁶ Scully Capital & KutakRock (2018) *Examination of Federal Financial Assistance in the Renewable Energy Market* (P.68) [Rapport au DOE-US] https://www.energy.gov/sites/default/files/2018/11/f57/Examination%20of%20Federal%20Financial%20Assistance%20in%20the%20Renewable%20Energy%20Mark..._1.pdf

³⁰⁷ Gouvernement du Royaume-Uni (2023). *New nuclear power plants: Generic Design Assessment guidance for Requesting Parties* [site internet] <https://www.gov.uk/government/publications/new-nuclear-power-plants-generic-design-assessment-guidance-for-requesting-parties/new-nuclear-power-plants-generic-design-assessment-guidance-for-requesting-parties#timeline-and-outcomes-for-gda>

³⁰⁸ Note : La **pièce critique** est un élément dont la destruction risque d'entraîner la perte de l'ensemble, soit ici pour un accident nucléaire : coude de circuit primaire de centrale nucléaire; couvercle de cuve, et bien sûr la cuve elle-même... Dans une signification différente, les mots « **critique** » et « **criticité** » sont aussi employés par l'industrie nucléaire pour désigner la masse de matière fissile permettant la réaction nucléaire.

exacte des processus de fabrication. En effet, les pièces – notamment métalliques - ne peuvent être contrôlées sans destruction (par ex. disque de turbine d'avion...). Un tel système est procédural à l'extrême pour habilitier et valider les fournisseurs et conserver la mémoire de toute la chaîne de fabrication. Il a réussi de façon spectaculaire dans l'aviation.

A l'inverse, pour le nucléaire, la confiance nécessaire entre acteurs de l'industrie nucléaire s'est érodée. En France, dans l'affaire Creusot-Loire/Framatome révélée en 2016³⁰⁹, de nombreuses pièces non conformes ont notamment été validées irrégulièrement. Areva, propriétaire de la forge, a ainsi avoué que plus de 400 pièces produites depuis les années 60 comportaient des "irrégularités". 66 de ces pièces sont actuellement utilisées par des réacteurs français en fonctionnement. Selon Le Monde, des documents prouvent qu'EDF et Areva étaient alertées dès 2005³¹⁰.

La construction de la confiance entre acteurs pose en effet la question du risque de corruption. Une affaire de « fausses pièces d'origine » en 2013³¹¹ était au cœur d'un tel scandale en Corée. Les révélations ont souligné les collusions existantes entre la classe dirigeante et l'industrie et ont contribué à la chute du gouvernement³¹².

Japan Steel Works (Toshiba), qui avait été chargé de forger la cuve de l'EPR de Flamanville après le scandale Creusot-Loire, a aussi connu un scandale de corruption³¹³. Aux dérives sur la qualité des pièces livrées s'ajoute la question de la qualification des soudeurs. Ici aussi le respect de la procédure dans le cas de pièces critiques -non vérifiables sans destruction- est essentiel pour s'assurer de la performance des pièces. Dans le cas du Japon, cette dérive a pris la forme d'embauches dictées par les Yakuzas, organisations criminelles bien connue. C'est ce que raconte Mycle Schneider dans son ouvrage périodique de 2021, qui consacrait un chapitre à la criminalité nucléaire³¹⁴. Ce sujet prend en 2024 un tour particulier en France avec la dénonciation inédite par l'Autorité de Sûreté du Nucléaire de 43 cas de falsifications et de fraudes, concernant notamment des composants électroniques et des pièces mécaniques³¹⁵. Ces actes délictueux volontaires, dénoncés par l'Autorité

³⁰⁹ Benezet E. (2026) *L'affaire de trop chez Areva* [article de presse]

<https://www.leparisien.fr/archives/l-affaire-de-trop-chez-areva-04-05-2016-5765657.php>

³¹⁰ Wakim N. (2018) *Nucléaire : la forge du Creusot veut oublier les fraudes* Le Monde, 30/7/2018 [archives] https://www.lemonde.fr/economie/article/2018/07/30/nucleaire-la-forge-du-creusot-veut-oublier-les-fraudes_5337370_3234.html /

³¹¹ Hun-San C. (2013) *Scandal in South Korea over Nuclear Revelations*, NYT 3 août 2013. [article de presse] <https://www.nytimes.com/2013/08/04/world/asia/scandal-in-south-korea-over-nuclear-revelations.html>

³¹² Kim S. (2019) *How greed and corruption blew up South Korea's nuclear industry*, [article de presse] MIT Technology Review <https://www.technologyreview.com/2019/04/22/136020/how-greed-and-corruption-blew-up-south-koreas-nuclear-industry/>

³¹³ ASN (2023) *Irrégularités dans la fabrication d'équipements chez Japan Steel Works* [Note d'Information de l'Autorité de Sûreté du Nucléaire] <https://www.asn.fr/l-asn-informe/actualites/irregularites-dans-la-fabrication-d-equipements-chez-japan-steel-works>

³¹⁴ Schneider M. et al. (2022) *Nuclear Power and Criminal Energy*, World Nuclear Industry Status Report (p.218-233) <https://www.worldnuclearreport.org/World-Nuclear-Industry-Status-Report-2021-773.html>

³¹⁵ Raynal J. (2024) *Nucléaire : le gendarme du secteur alerte sur les risques de falsification et de contrefaçon*, La Tribune de l'Economie [article de presse] <https://www.latribune.fr/climat/energie->

à la justice, s'ajoutent aux manquements à la rigueur procédurale, notamment dans les chaînes de sous-traitance.

Ainsi, la fabrication des réacteurs nucléaires impose des dossiers imposants à tous les stades, de la conception à la fabrication. Ces procédures ne peuvent émerger et se stabiliser rapidement puisqu'elles reposent sur des réseaux de fournisseurs de confiance et sur un travail patient d'homologation et de surveillance. Ces règles complexes sont aussi très difficiles à maîtriser pour des "start-up" de création récente. Il semble que les médias et une partie des promoteurs des SMR sous-estiment largement l'inertie d'une telle garantie procédurale, mais aussi le caractère indispensable de ces pratiques.

c) Les dérives des régulateurs

À cette dérive s'ajoute la « capture » de l'État ou du régulateur par l'industrie. Les régulateurs ont notamment en tête l'affaire des crashes des Boeings 737 MAX de Lion Air à Jakarta en 2018 et d'Ethiopian Airlines au Congo en 2019. Une modification du moteur validée trop rapidement par le régulateur FAA aux États-Unis est en cause. L'Autorité voulait éviter à Boeing des délais coûteux. Le constructeur, responsable, a dû indemniser les passagers³¹⁶. Un passage en force du gouvernement ou une proximité trop grande des contrôleurs ou des autorités de sûreté avec les industriels représente des enjeux essentiels face aux risques - autrement plus importants - du nucléaire.

Calcul simplifié du coût de kWh de petits réacteurs

Il existe de nombreuses façons de calculer les coûts complets actualisés, décrits notamment par la Cour des Comptes³¹⁷. Cette estimation simplifiée se base à la fois sur les conséquences de la petite taille³¹⁸ du réacteur (qui augmente fortement le prix d'un même modèle) et sur les effets éventuels de construction en série (qui abaissent le prix via les effets d'apprentissage³¹⁹). Ces techniques et leur impact sur les calculs sont détaillées annuellement dans les données publiées par la banque Lazard³²⁰.

D'abord, la taille des SMR par rapport aux réacteurs connus, est mesurée, pour des projets sur lesquels plus d'information est disponible : le NuScale et le NUWARD.

environnement/nucleaire-le-gendarme-du-secteur-alerte-sur-les-risques-de-falsification-et-de-contrefacon-989229.html

³¹⁶ Jennings T. (2021) *How 'Boeing's Fatal Flaw' Grounded the 737 Max and Exposed Failed Oversight* [Documentaire du New York Times]. <https://www.nytimes.com/2021/09/13/NYT-Presents/boeing-737-max-crash-frontline.html>

³¹⁷ Cour des Comptes (2012) *Les diverses approches des coûts des moyens de production d'électricité*, L'analyse des coûts du système de production électrique en France, (p.14) <https://www.ccomptes.fr/fr/documents/58078>

³¹⁸ Note: En sciences de l'ingénieur, l'**effet de taille** permet d'estimer la masse et le coût d'un équipement en interpolant ou en extrapolant le coût d'un équipement similaire via une fonction exponentielle.

³¹⁹ Note: Sous certaines conditions, les **effets d'apprentissage** peuvent aboutir à une baisse de coût des fabrications en série. Celle-ci est fonction des quantités totales construites, par exemple un doublement du nombre d'équipements fabriqués va se traduire par une baisse de coût de 5% sur les équipements suivants. Le taux d'apprentissage est alors de 5%.

³²⁰ Lazard (2023) *Lazard's levelized cost of energy analysis version 16.0* Lazard Reports and Studies (p.2) <https://www.lazard.com/research-insights/2023-levelized-cost-of-energyplus/>

Pour le NuScale, E&E Consultant se base sur le dernier coût publié avant l'abandon du projet. Cette estimation est, de plus, cohérente avec une extrapolation de taille calculée par la formule traditionnelle dans l'industrie³²¹. Pour le NUWARD, est utilisé le coût du nucléaire de grande taille publié par Lazard, là aussi ajusté par un facteur de taille (d'exposant 0,6) pour un réacteur de 175MW.

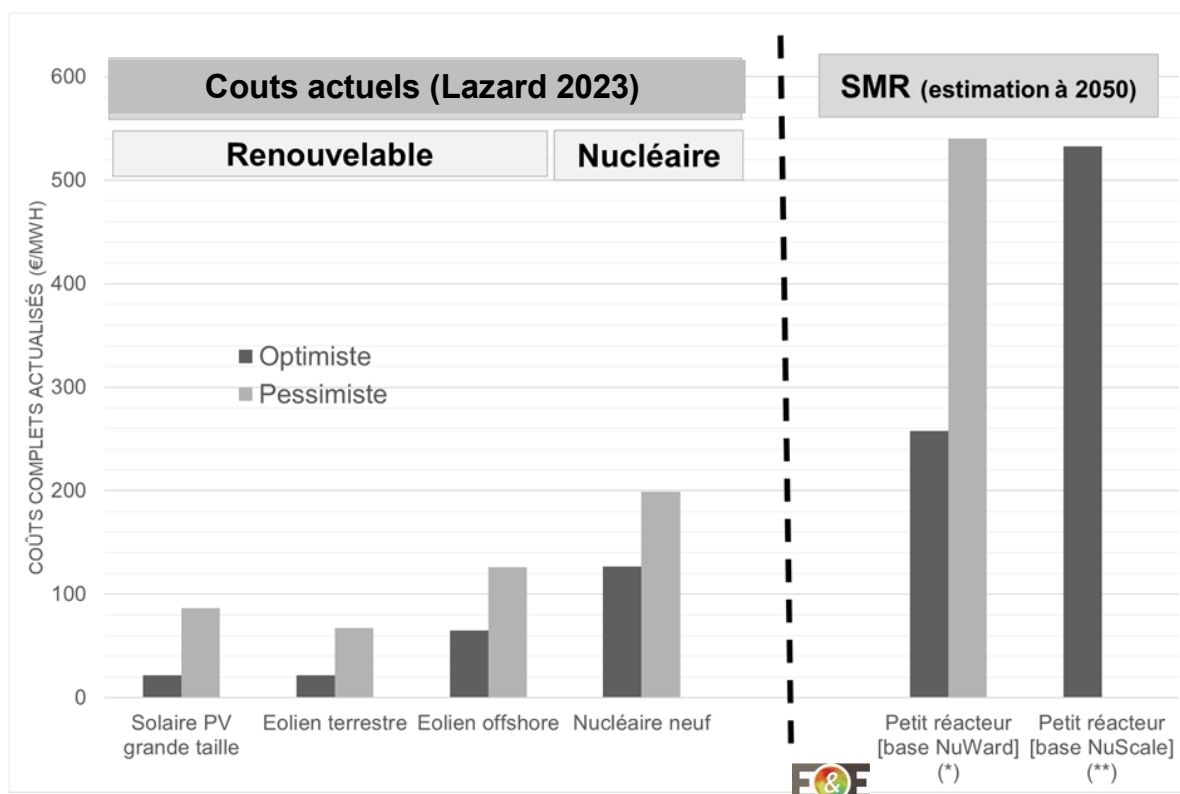
Ensuite, en hypothèse optimiste, on a considéré qu'un fort effet d'apprentissage sur le coût de série s'applique, soit une baisse de 10% par doublement des quantités cumulées produites. Il s'applique après la seconde centrale de deux NUWARD et pour une série anticipée de 32 réacteurs. En hypothèse haute il n'y a pas d'effet de série, conformément à l'observation empirique du secteur nucléaire. On considère que le combustible est le même que celui des grandes centrales françaises. Malgré ces facteurs particulièrement favorables au petit réacteur, le calcul aboutit à une fourchette de coût de 248-540 €/MWh (pour une conversion \$/€ de 0,9). Dans ces hypothèses, le petit réacteur produirait -de façon hypothétique et à l'horizon de 2050- un kWh dix fois plus onéreux que celui d'une grande centrale solaire ou éolienne actuelle. (Et combien pour le comparer à une centrale nucléaire "classique" ?)

Le graphe suivant reproduit l'analyse de Lazard pour les énergies renouvelables et le grand nucléaire. Est ajoutée une projection estimée des coûts de production de deux petits réacteurs SMR à eau.

Le graphe suivant présente des fourchettes haute et basse des coûts complets actualisés des petits réacteurs NuScale et NUWARD à l'échéance de leur industrialisation, et leurs concurrents actuels, sans subvention ni prix du carbone (source Lazard 2023 et E&E 2023)

³²¹ Ramana. M-V (2021). *Small Modular and Advanced Nuclear Reactors: A Reality Check*, IEEE Access Volume 9 (p.42092). <https://www.cndpindia.org/wp-content/uploads/2021/04/Small-Modular-and-Advanced-Nuclear-Reactors-A-Reality-Check-from-IEEE-Access.pdf>





Coûts du kWh pour des sources actuelles et estimation de SMR futurs. Source Lazard (2023), Ramana (2021), Cour des Comptes (2012) et calcul E&E Consultant.

Ce décalage entre les renouvelables d'aujourd'hui et les projets nucléaires va en réalité s'accroître. En effet, il s'agit d'un coût des SMR estimé à très long terme, en prenant l'hypothèse d'une industrialisation réussie des petits réacteurs. Cette hypothèse est elle-même largement infirmée par le reste du présent rapport. Les coûts continuent en effet d'évoluer à la baisse pour les énergies renouvelables, grâce aux dynamiques d'investissements industriels massifs en cours. L'investissement réalisé dans les énergies renouvelables est depuis une quinzaine d'années environ vingt à trente fois plus important que dans le nucléaire³²². Selon le rapport WNISR de 2023, l'investissement dans des nouveaux réacteurs -grands comme petits- n'est que de 24 Mds\$ alors que dans le même temps 366 Mds\$ ont été investis dans les renouvelables électriques (hors hydraulique).

Cet investissement fortement majoritaire dans les énergies renouvelables et dans les systèmes d'équilibrage des réseaux font, par effet d'échelle, baisser les coûts des alternatives au nucléaire³²³. Selon l'agence internationale des énergies renouvelables IRENA, le prix complet moyen de l'électricité produite par les projets renouvelables neufs s'établit dans le monde à 33 \$/kWh pour le solaire PV, 49 \$/MWh pour l'éolien terrestre, et 81 \$/MWh pour l'éolien offshore. C'est beaucoup moins que pour celui du

³²² Schneider et al. (2023) *World Nuclear Industry Status Report 2022* (fig.50 p.278) <https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/wnisr2022-v3-lr.pdf>

³²³ Ferroukhi R. et al. (2023) *Global Landscape of Renewable Energy Finance*, IRENA 2023 [rapport] <https://www.irena.org/Publications/2023/Feb/Global-landscape-of-renewable-energy-finance-2023>

grand nucléaire³²⁴. Ce dernier est lui-même nettement en dessous de la fourchette d'estimations de 248-540 €/MWh en 2050, détaillée dans l'encadré pour deux petits réacteurs.

Provisoire / Draft

³²⁴ IRENA (2023). *Renewable Power Generation in 2022*.
<https://www.irena.org/Publications/2023/Aug/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2022>



Conclusion

Le foisonnement des déclarations sur les SMR participe à un brouillard de l'information sur la transition énergétique et sur le rôle possible de l'énergie nucléaire. Des attentes irréalistes quant à ces projets contrastent avec la crise mondiale profonde des réacteurs nucléaires de plus grande taille. Dans un contexte angoissant de crise climatique, les petits réacteurs suscitent l'engouement chez les financeurs publics et dans les médias. Ils y trouvent un « buzz » bienvenu pour présenter leur énergie comme « innovante » et « prometteuse », dans un avenir lointain, sans lien avec la réalité difficile de l'industrie nucléaire existante, ou des actions urgentes pour faire face à la crise climatique.

Les projets de petits réacteurs SMR ne peuvent contribuer à la sortie des énergies fossiles dans les prochaines décennies. Leurs perspectives techniques et économiques sont incertaines et lointaines, hors de portée pour une industrialisation efficace. Ils font courir par surcroît un risque bien plus élevé en termes de sécurité nucléaire (accident, santé, prolifération). Ils font encore moins le poids face aux alternatives de grande diffusion comme les renouvelables électriques, les pompes à chaleur ou les moteurs ou les équipements performants. « Trop tard, trop cher, trop risqué et trop incertain »³²⁵, les SMR ne sont pas une technologie d'avenir, mais un mirage créé de toutes pièces par l'industrie nucléaire.

³²⁵ Morgan G. (2018) *US nuclear power: The vanishing low-carbon wedge*, Proceedings of the National Academy of Science, <https://www.pnas.org/content/115/28/7184>

Bibliographie

Principaux rapports et synthèses

AIEA (2023) Advances in Small Modular Reactor Technology Developments IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) 2022

Édition https://aris.iaea.org/Publications/SMR_booklet_2022.pdf

AIEA (2020) Advances in Small Modular Reactor Technology Developments Agence Internationale de l'Énergie https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf

AIEA (2023), Power Reactors Information System 2022, Agence Internationale de l'Énergie Atomique [base de données]

<https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/ReactorDetails.aspx?current=957>

Buongiorno J. et al. (2018). The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World: An Interdisciplinary MIT Study. Massachusetts Institute of Technology, Energy Futures https://www.hbs.edu/ris/Publication%20Files/The-Future-of-Nuclear-Energy-in-a-Carbon-Constrained-World_62558c01-8747-4fc8-a026-9d62032488a9.pdf

Glaser A. et al. (2015) Small Modular Reactors, an Energy Technology Distillate, Andlinger Center / Princeton [fiches synthétiques]. <https://acee.princeton.edu/wp-content/uploads/2015/06/Andlinger-Nuclear-Distillate-Article-6.pdf>

Laponche L. et Thierry J.-L. (2023) SMRs Two Examples: NuScale in the US, NUWARD in France. Global Chance [Périodique] https://global-chance.org/IMG/pdf/gc_smrs_nuscale_and_nuward_20231130.pdf

Schneider et al. (2022). The World Nuclear Industry Status Report 2022, Résumé en français (WNISR) sur www.worldnuclearreport.org

Documents et références

Clarke, L. et al. (2022). Energy Systems. dans IPCC 2022: Mitigation of Climate Change. (p.627) Cambridge University Press 2022 <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>

Cooper M. (2014), The Economic Failure of Nuclear Power and the Development of a Low-Carbon Electricity Future: Why Small Modular Reactors Are Part of the Problem, Not the Solution, <https://www.nirs.org/wp-content/uploads/reactorwatch/newreactors/cooper-...>

Fontecave M. et al. (2022) Les réacteurs nucléaires modulaires de faible puissance (SMR). Avis et rapport de l'Académie des Sciences (p.15-16). https://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/221020_SMR.pdf

Global Chance (2013) Plutonium : Ressource énergétique ou fardeau mondial ? Les cahiers de Global Chance N°34 novembre 2013 <https://www.cigeo.gouv.fr/sites/default/files/2018-09/Global-chance-Le%20casse-tete-des-mati%C3%A8res-et-dechets-nucl%C3%A9aires.pdf>

IAEA (2021). Technology Roadmap for Small Modular Reactor Deployment, Non Proliferation and Safeguards. International Atomic Energy Agency, Nuclear Energy Series N°NR-T-1.18 (p.16) https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1944_web.pdf

IRSN (2021). Note d'information sur la sûreté des réacteurs modulaires de faible puissance (Small Modular Reactors), Institut de Radioprotection et de sûreté nucléaire (p.2) https://www.irsn.fr/sites/default/files/documents/actualites_presse/actualites/20211007_NI-SMR-102021.pdf

Lyman E. (2013) Small is not always beautiful. Union of Concerned Scientists, ucs. Consulté le 20 mai 2023 <https://www.ucsusa.org/sites/default/files/2019-10/small-isnt-always-beautiful.pdf>

Macron E. (2022) Reprendre en main notre destin énergétique. [discours présidentiel] <https://www.elysee.fr/emmanuel-macron/2022/02/10/reprendre-en-main-notre-destin-energetique>

OCDE-NEA (2021) Nuclear third party liability and SMRs dans Small Modular Reactors Challenges and Opportunities (P.35-37) NEA No. 7560 https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2021-03/7560_smr_report.pdf

RTE (2022) Futurs énergétiques 2050 : les scénarios de mix de production à l'étude permettant d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 [site internet consulté le 22 mai 2022]

Articles à comité de lecture

Granger M. (2018) US nuclear power: The vanishing low-carbon wedge, Proceedings of the National Academy of Science, <https://www.pnas.org/content/115/28/7184>

Grübler A. (2010), The costs of the French nuclear scale-up: A case of negative learning by doing International Institute for Applied Systems Analysis Energy Policy 38 (2010) 5174–5188 <http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/9116/1/IR-09-036.pdf>

Krall L. et al. (2022) Nuclear waste from small modular reactors PNAS 2022 119 (23) <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2111833119>

Markard J. et al. (2021) *Destined for decline? Examining nuclear energy from a technological innovation systems perspective* Energy Research & Social Science <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101512>

Ramana. M.-V. (2021) Small Modular and Advanced Nuclear Reactors: A Reality Check, IEEE Access. <https://www.cndpindia.org/wp-content/uploads/2021/04/Small-Modular-and-Advanced-Nuclear-Reactors-A-Reality-Check-from-IEEE-Access.pdf>

Vinoya, C.-L. et al. (2023) State-of-the-Art Review of Small Modular Reactors. MDPI Énergies 2023, 16, 3224. (chap.3.5.4 fig.9) <https://doi.org/10.3390/en16073224>



Acronymes

Acronymes		Noms complets	
Français	Anglais	Français	Anglais
ACV	LCA	Analyse de Cycle de Vie	Life-cycle Assessment
AEN-OCDE	NEA-OECD	Agence de l'Energie Atomique de l'OCDE	Nuclear Energy Agency of OECD
AIE	IEA	Agence Internationale de l'Energie	International Energy Agency
AIEA	IAEA	Agence Internationale de l'Energie Atomique	International Atomic Energy Agency
ASN		Autorité de Sûreté Nucléaire (France)	
CEA		Commissariat à l'Energie Atomique	
CNDP		Commission Nationale du Débat Public	
DCNS-Naval Groupe		Direction des Constructions Navales et Systemes	
EDF		Electricité de France	
GIEC	IPCC	Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Changement Climatique	Intergovernmental Panel on Climate Change
GIFEN		Groupement des Industriels Français de l'Energie Nucléaire	
Gwe	Gwe	GigaWatt électrique (millions de kiloWatt)	
IRSN		Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire	
kWh	kWh	kiloWatt-heure	kiloWatt-hour
MOx	MOX	Mélange d'Oxydes Uranium Plutonium	
OECD	OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Économiques	Organisation for Economic C-operation and Development
PRM	SMR	Petit Réacteur Modulaire (*)	Small Modular Reactor
REP	PWR	Réacteur à eau pressurisée	Pressurized Water Reactor

SFEN		Société Française d'Energie Nucléaire	
	BWR	Réacteur à eau bouillante	Boiling Water Reactor
	CEFR	Réacteur rapide chinois expérimental	China Experimental Fast Reactor
	EPR		European Pressurized Reactor [ou "Evolutionary"]
	GFR	Réacteur à neutrons rapide refroidi au gaz	Gas-cooled Fast Reactor
	HTGR	Réacteur à haute et très haute température	High Temperature Gas Cooled reactor
	HTR	Réacteur à Haute Température	High Temperature Reactor
	LCOE	Coût complet actualisé	Levelised Cost of Electricity
	LFR	Réacteur à neutrons rapides refroidi au plomb	Lead-cooled Fast Reactor
	MSR	Réacteur à sels fondus	Mosten Salts Reactor
	NRC	Commission de Réglementation nucléaire des Etats-Unis	Nuclear Regulatory Commission (United States)
	SFR	Réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium	Sodium-cooled Fast Reactor
	SMR	Petit Réacteur Modulaire	Small and Medium Reactors [Small Modular Reactor]
	TRL	Niveau de maturité technologique	Technology Readiness Level
	TWR	Réacteur à Ondes Progressives	Travelling Wave Reactor
	WNA	Association Nucléaire Mondiale	WNA World Nuclear Association
	WNISR	Rapport Annuel sur l'Industrie Nucléaire Mondiale	World Nuclear Industry Status Report

(*) MESR (2019) *Vocabulaire de l'ingénierie nucléaire*, Bulletin Officiel, Ministère de l'Enseignement et de la Recherche N°22 du 19 mai 2019 <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/bo/19/Hebdo22/CTNR1908386K.htm>



Crédits et remerciements

Les plus chaleureux remerciements à Jean-Luc Thierry et à Michel Labrousse pour leurs conseils avisés et leur relecture pointilleuse. Merci à Michel Badré, Manon Besnard, Guillaume Bonduelle, Michel Brun, Alexandre Cousin, Marc Denis, Luke Haywood, Julie Hazemann, Bernard Laponche, Nadège Le Gentil, Philippe Mante, Simon Métivier, Myclé Schneider, pour leur aide, leurs remarques, suggestions et encouragements. Merci à tous les contributeurs souhaitant rester anonymes.

Merci au regretté Franck Miles (1923-2013), qui m'a fait découvrir tôt les débats sur la prolifération nucléaire avec la revue Journal of Nuclear Scientists. Merci aussi à mon père Dominique Bonduelle (1931-1995), ingénieur et industriel du soudage et du travail des métaux, qui m'a enseigné le doute sur le calendrier et les performances des nouvelles machines.

Hommage enfin à Michèle Rivasi (1953-2023) pour avoir tenu tête à l'institution nucléaire.

Mars 2024, Antoine Bonduelle

Provisoire / Draft

L'auteur

Antoine Bonduelle est gérant du bureau E&E Consultant (études, expertises et recherches climat-énergie). Il est ingénieur ICAM (Lille, 1981), a une licence de journalisme (Université Laval, Qué.) et un DEA de Sciences Politiques (Lille2). Il a été auparavant **journaliste dans la presse technique et scientifique** (Sciences et Technologies, l'Usine Nouvelle, Systèmes Solaires, Windpower Monthly, Alternatives Economiques, Hydro Plus...). Il est Expert-Reviewer du Groupe Intergouvernemental d'Etude des Changements Climatiques (GIEC) pour le groupe 3, « atténuation » et sur les politiques énergétiques depuis 2007. Ses travaux portent sur la **modélisation des systèmes électriques**, sur les **technologies de l'énergie**, et sur l'**équité climatique**. Il intervient actuellement comme enseignant dans plusieurs formations supérieures (Mines-Telecom, ICAM, Universités de Nice et de Dunkerque...) sur l'énergie et le climat.

Il a représenté les ONG françaises d'environnement et de solidarité dès la COP1 (Berlin, 1995) et la COP3 (Kyoto, 1997) et co-fondé le Réseau Action Climat (France). Lors de deux mandats au Conseil Economique Social et Environnemental (**CESE**) 2012-2020, il a rapporté et fait voter l'avis « **L'adaptation de la France au Changement Climatique** » avec Jean Jouzel (2014), puis en 2018 l'avis « **TPE-PME, Comment réussir le passage à la neutralité carbone ?** » avec Stéphanie Goujon.

Sur le système électrique français, il a notamment publié :

- Bonduelle A, Métivier S (2012) « *Harnessing potential energy saving in the French industry* », 3-090-12 ECEEE Summer Study 2012 Stockholm.
- Bonduelle A. et Joliton D. (2007) « *Quelles émissions attribuer aux économies d'électricité* », La Revue de l'Energie N°580, novembre-décembre,
- Bonduelle A. et Fenet S.(1998) *La libéralisation du marché européen de l'électricité*, Les Echos Etudes ISBN 978-2-907938-35-8
- Bonduelle A. 2006 « *La surcapacité nucléaire, quelle aurait pu être une stratégie d'équipement optimale ?* », La Revue de l'Energie N°569 Accessible sur [https://www.ee-consultant.fr/IMG/pdf/Surcapacite_nucleaire_AB_2006.pdf]

