

Décembre 2025

Modulaire nucléaire

Un paradigme technologique et industriel

Rapport intermédiaire Zenon Research

Modulaire nucléaire

Un paradigme technologique et industriel

A propos de ce rapport intermédiaire

La seconde moitié du 20e siècle a connu un essor important de l'industrie nucléaire. Si son développement a depuis ralenti, elle connaît un regain d'intérêt depuis quelques années, car le nucléaire apparaît comme une des solutions à la forte demande d'énergie décarbonée, nécessaire à l'électrification des usages, à la décarbonation de la chaleur, mais apparaît aussi comme une source d'énergie stable et souveraine.

Si la stratégie historique de la filière nucléaire était de gagner en puissance pour réduire les coûts, une seconde stratégie, complémentaire, émerge : celle des petits réacteurs modulaires. Dans le sillage d'une précédente publication, ce rapport intermédiaire propose une synthèse centrée sur les technologies de ces concepts de réacteurs, dits petits et modulaires.

Conditions de diffusion

Cette publication est mise à disposition sous licence libre. La reproduction et la diffusion totale ou partielle des textes de cette publication sont possibles pour toute utilisation non commerciale, en l'état et sans modification.

Il s'agit d'une version intermédiaire, vous pourrez vous référer à la version définitive pour citation.

Où trouver ce rapport

Ressource en ligne / Disponible gratuitement sur zenon.ngo

Auteur

Jean-Baptiste Dupin
Directeur scientifique
Zenon Research

Selecteurs

Maxence Cordiez

Responsable du cycle du combustible
HEXANA

Greg de Temmerman

Deputy CEO, and CSO
Quadrature Climate Foundation

Nathalie Ledanois

Manager
Kearney Energy Transition Institute

Issam Taleb

Partner
EY-Parthenon

Lucas Tardieu

Co-fondateur
Stellaria



Contenu

| | |
|---|----|
| Introduction – <i>Small Is Beautiful</i> | 4 |
| Réacteurs nucléaires | 7 |
| Généralités | 8 |
| Cartographie des réacteurs nucléaires | 9 |
| Réacteurs à eau pressurisée | 11 |
| Réacteur à eau supercritique | 12 |
| Réacteur à (très) haute température | 13 |
| Réacteur à sels fondus | 14 |
| Réacteur à neutrons rapides refroidi au gaz | 15 |
| Réacteur à neutrons rapides refroidi au métal liquide | 16 |
| Perspectives | 17 |
| Modularité, industrialisation | 18 |
| Cas d'usage de production d'énergie | 19 |
| Sûreté et sécurité des petits réacteurs modulaires | 20 |
| Cycle du combustible | 21 |
| Business Model | 22 |
| Pistes & recommandations | 23 |
| Références | 24 |

Sources des illustrations

- P1 Installation du module cœur du SMR Linglong One (Chine) en 2023. Crédit : CNNC
- P7 Réacteur SMR CAREM (Argentine) en construction (fin des années 2010). Crédit : CNEA
- P17 KLT-40S Centrale flottante Akademik Lomonosov (Russie). Crédit : Rosatom

Introduction – *Small Is Beautiful*

Le nucléaire civil a longtemps été associé à de grands réacteurs centralisés, souvent de type PWR (Pressurized Water Reactor) ou BWR (Boiling Water Reactor), capables de produire plusieurs centaines, voire plus d'un millier de MWe. Ces unités de forte puissance ont été conçues pour tirer parti des économies d'échelle, réduisant ainsi le coût de production de l'électricité par kWh. Toutefois, la mise en œuvre de grands réacteurs s'est révélée progressivement confrontée à des difficultés structurelles et industrielles. Les retards de livraison sont devenus presque systématiques, comme en témoignent des projets emblématiques tels que l'EPR de Flamanville ou les deux AP1000 de Vogtle. Ces délais ne sont pas neutres : ils contribuent, avec le renforcement des exigences de sûreté, à l'augmentation massive des coûts. La plus faible construction de réacteurs ces 30 dernières années cause de plus une perte de compétences industrielles et d'ingénierie dans de nombreux pays. Le savoir-faire accumulé au fil des décennies se dilue lorsque les chantiers se raréfient, menaçant la chaîne d'approvisionnement et la capacité des acteurs à concevoir et exploiter de nouvelles installations.

Par ailleurs, la logique d'augmenter toujours la puissance des réacteurs pour réduire le coût de l'énergie se heurte à des contraintes multiples : les grandes unités sont longues à construire (affectant l'économie d'apprentissage), leur dimension augmente la complexité des systèmes de sûreté et les besoins en financement deviennent colossaux. Cette configuration centralisée est de moins en moins compatible avec les besoins grandissant en flexibilité de production électrique (développement des énergies renouvelables), alors que les besoins énergétiques évoluent rapidement, notamment avec l'électrification progressive des transports, le développement des réseaux de chaleur décarbonés et la montée en puissance des infrastructures numériques telles que les data centers. Dans ce contexte, il semble que le modèle des grands réacteurs, basé sur des unités massives et uniques, ne répond pas, seul et

de manière optimale aux défis contemporains d'énergie sûre, flexible, bon marché et décarbonée.

Réduction d'échelle et modularité : un atout stratégique

C'est dans ce cadre que la réduction d'échelle et la modularité des réacteurs nucléaires apparaissent comme une solution innovante. Les **petits réacteurs modulaires – PRM¹** (SMR – Small Modular Reactors, et leurs équivalents avancés, les AMR – Advanced Modular Reactors) – proposent une approche plus compacte, simplifiée, standardisée et industrialisable. La fabrication en usine de composants (modules) permettrait de contrôler rigoureusement la qualité des composants et d'assurer un respect constant des normes de sûreté. La modularité en puissance et la standardisation favoriseraient une réduction significative des coûts unitaires, grâce à l'effet d'apprentissage industriel et à la répétition de modules identiques, tout en accélérant les délais de construction sur site.

La réduction de l'échelle apporte également des avantages techniques : la gestion thermique deviendrait plus simple et plus efficace, car un cœur plus petit dissipe mieux la chaleur résiduelle et facilite l'implémentation de systèmes de sécurité passifs. Ces systèmes, souvent basés sur la gravité, la convection naturelle ou la dilatation thermique, réduiraient la dépendance aux pompes et aux interventions humaines, renforçant la sûreté intrinsèque des installations. De plus, la faible puissance, la compacité et le confinement modulaire diminuerait l'impact environnemental, en limitant l'emprise au sol tout en décarbonant des besoins énergétiques localisés, et facilitent l'intégration dans des sites industriels ou urbains. Ces caractéristiques font, sur le papier, des SMR et AMR des solutions flexibles et adaptable à une grande variété de besoins énergétiques, allant de la production d'électricité à la fourniture de chaleur industrielle ou de chaleur pour des réseaux urbains.

¹ Le terme français PRM (pour petit réacteur modulaire) sera employé dans ce rapport pour désigner les SMR, AMR et MMR (Microréacteurs) dans leur globalité. Son équivalent anglais SMR désigne à la fois les petits réacteurs modulaires et les petits réacteurs à eau de génération III/III+, nous ne l'utiliserons que pour ce second sens. Tous les autres termes et acronymes utilisés (à l'exception de PRM) seront les termes anglais.

Un regain d'intérêt pour le nucléaire

Le regain d'intérêt pour le nucléaire dans plusieurs pays découle de facteurs stratégiques, économiques, sociétaux et environnementaux. La souveraineté énergétique est de nouveau un enjeu central, notamment après les perturbations des marchés internationaux de l'énergie et la volatilité des prix du gaz et du pétrole. En parallèle, la reindustrialisation et la sécurisation des filières critiques incitent les gouvernements à soutenir des technologies nucléaires locales et standardisées. Enfin, les nécessaires décarbonation des systèmes énergétiques et électrification des usages, et la demande croissante de chaleur décarbonée et souveraine font des PRM une solution pertinente.

En France, par exemple, les annonces récentes² du Président Emmanuel Macron soulignent la volonté de relancer le nucléaire en faisant une place aux PRM dans le mix énergétique, afin de répondre aux besoins futurs de production flexible et locale. Cette dynamique se retrouve au niveau international : la World Nuclear Exhibition 2025 (L'Usine nouvelle, 2025) a témoigné de l'effervescence croissante autour des PRM, reflétant l'intérêt d'industriels, d'investisseurs et d'États pour ces solutions. Les datacenters, les zones industrielles isolées, ainsi que les réseaux de chaleur municipaux sont des segments identifiés comme particulièrement adaptés à ces réacteurs modulaires.

Nucléaire conventionnel et PRM

Pour mieux comprendre l'intérêt des PRM, il est utile de rappeler les grandes lignes du nucléaire conventionnel. Les réacteurs de type PWR ou BWR fonctionnent grâce à la fission de noyaux lourds, généralement l'uranium-235 ou les isotopes impairs du plutonium. La chaleur produite par la fission est transférée à un fluide caloporteur (souvent de l'eau) qui génère de la vapeur pour entraîner des turbines et produire de l'électricité. Ces systèmes reposent sur des barrières de sûreté multiples, incluant des enceintes de confinement, des circuits de refroidissement redondants et des dispositifs de sécurité passifs et actifs. Leur fonctionnement est bien maîtrisé, mais l'infrastructure nécessaire et la complexité de construction rendent les grands réacteurs coûteux face aux nouvelles demandes énergétiques.

Les PRM se définissent comme des réacteurs nucléaires de puissance typiquement inférieure à 300 MWe³ par module, conçus pour être modulaires et standardisés. Cette notion de modularité intègre tout autant la production industrielle, la construction que l'exploitation du réacteur (modularité et flexibilité de production d'énergie). Leur conception vise la production répétitive en usine, avec un assemblage sur site. Les **Small Modular Reactors (SMR)** désignent les réacteurs à eau (dits de génération III/III+). Les **Advanced Modular Reactors (AMR)** (dits de génération IV) iraient plus loin, intégrant des innovations telles que le refroidissement par sels fondus, métaux liquides ou gaz haute température, des combustibles avancés comme le TRISO⁴, et des systèmes de sécurité intrinsèques. Ces technologies permettent d'atteindre des températures de fonctionnement plus élevées, ouvrant la voie à la cogénération d'électricité et de chaleur industrielle, voire à la production d'hydrogène décarboné.

² Discours de Belfort du 10/2/2022 (Vie-publique.fr, 2022) ; Réunion du 8/11/2022 avec les dirigeants des 50 sites industriels les plus polluants (Elysee.fr, 2022) ; Réunion du 17/3/2025 du 4^{ème} Conseil de politique nucléaire (Elysee.fr, 2025).

³ Un réacteur produit une puissance thermique (mesurée en MWth) qui peut être convertie en puissance électrique (mesurée en MWe) environ 2-3 fois plus faible (le rendement de conversion étant de l'ordre de 35 %).

⁴ TRi-structural ISOtropic : un type de combustible sous la forme de particules (de l'ordre du mm) composées d'un noyau de matière fissile (oxyde d'uranium) encapsulé dans trois couches de carbone et de carbure de silicium. Ce combustible est adapté aux réacteurs à très haute température.

Intérêt des SMR dans un mix bas carbone

Dans un mix énergétique bas carbone, les SMR et AMR offrent plusieurs avantages :

Flexibilité de déploiement : possibilité de modules adaptables à la demande locale, intégrables dans des réseaux moyens ou isolés (micro-grid).

Décarbonation rapide : production d'électricité, chaleur industrielle et hydrogène avec un faible impact carbone.

Réduction des délais et des coûts : fabrication standardisée, construction plus rapide, courbe d'apprentissage favorable.

Sûreté accrue : petits coeurs, systèmes passifs, confinement modulaire et robustesse intrinsèque.

Soutien à la souveraineté énergétique : production locale et industrialisation nationale des composants.

Ainsi, les SMR et AMR pourraient représenter une réponse moderne à certaines limites du nucléaire traditionnel, combinant efficacité industrielle, sécurité, décarbonation et flexibilité pour accompagner la transition énergétique du XXI^e siècle. Ils permettraient de concilier les besoins croissants en électricité et chaleur, les impératifs de réduction des émissions de CO₂ et les exigences de résilience et de souveraineté énergétique.

Par ailleurs, les PRM peuvent s'inscrire dans une transition non seulement énergétique mais idéologique : en participant à la décentralisation de la production énergétique, de l'industrie et des habitats et ils peuvent contribuer à l'instar des énergies renouvelables, à véhiculer l'imaginaire de territoires intégrés permettant une « société à mesure de l'homme »⁵.

L'écosystème nucléaire a été en ébullition ces dernières années et près d'une centaine de concepts de PRM ont été proposés (dont 11 rien qu'en France). Cette multiplicité n'est pas compatible avec des grands volumes de production par concept et donc avec une forte réduction des coûts. Les capitaux et investissements ne sont pas suffisant pour lancer de manière compétitive tous ces projets, et une sélection (naturelle ou non) aura lieu pour sélectionner certains projets.

Ce rapport, le second de Zenon sur le sujet (Dehont, 2022), vient compléter de nombreux autres rapports publiés ces deux dernières années (Kearney Energy Transition Institute, 2023) (EY-Parthenon, 2024) (E-Cube, 2025)⁶. Il propose d'une part une approche technologique des SMR et AMR à la fois macro (prise de recul cartographique) pour naviguer entre les types de réacteurs à potentiel et micro (zoom sur les principales technologies), et d'autre part des focus sur quelques axes thématiques⁷ spécifiques aux PRM.

⁵ Citation de Ernst Friedrich Schumacher, 1976 – Small Is Beautiful: A Study Of Economics As If People Mattered

⁶ Ces rapports ont été le point de départ et ont accompagné le cheminement qui a mené à ce rapport, de nombreux autres documents, plus techniques, ont alimenté les deux sections qui suivent et sont seulement cités en fin de rapport dans les références afin de ne pas alourdir le format par fiche synthétique voulu dans ce rapport.

⁷ Les axes suivants n'ont ainsi pas fait l'objet de ce rapport : Techniques d'industrialisation des SMR, nouvelles compétences et nouveaux métiers, les filières industrielles environnant les entreprises des PRM.

Réacteurs nucléaires

Généralités

Cartographie des réacteurs nucléaires

Réacteurs à eau pressurisée

Réacteur à eau supercritique

Réacteur à (très) haute température

Réacteur à sels fondus

Réacteur à neutrons rapides refroidi au gaz

Réacteur à neutrons rapides refroidi au métal liquide



Généralités

Fonctionnement d'un réacteur

Un réacteur nucléaire fonctionne en exploitant la fission d'atomes lourds (comme l'uranium ou le plutonium) : lorsqu'un noyau fissionne, il libère chaleur et neutrons. Ces neutrons entretiennent la réaction en chaîne, contrôlée grâce à des absorbants neutroniques. La chaleur générée est transférée à un fluide caloporteur (eau, gaz, métal fondu...), qui s'échauffe puis alimente soit un cycle vapeur pour produire de l'électricité, soit un réseau de chaleur ou un procédé industriel. Dans les réacteurs à eau, la vapeur entraîne une turbine couplée à un alternateur ; dans d'autres technologies, la chaleur peut atteindre des températures plus élevées pour des applications industrielles ou la production d'hydrogène. L'ensemble du système est confiné dans plusieurs barrières de sûreté pour retenir la radioactivité.

Quelques définitions :

Un réacteur **thermique** utilise principalement des neutrons lents, dont l'énergie a été réduite par un modérateur (eau, graphite). Ces neutrons ont plus de probabilité de provoquer la fission d'isotopes comme l'uranium-235.

Un réacteur **rapide** fonctionne sans modérateur : les neutrons gardent une énergie élevée, permettant de valoriser l'uranium-238 et les actinides, ce qui favorise la fermeture du cycle du combustible (voir « cycle fermé »).

Un réacteur **épithermique** utilise des neutrons d'énergie intermédiaire, entre thermique et rapide ; optimisant la consommation de certains combustibles.

Un **cycle ouvert** (*once-through*) consiste à utiliser le combustible nucléaire une seule fois : après son irradiation, il est destiné à être stocké comme déchet sans recyclage.

Un **cycle fermé** (*closed*) consiste à recycler le combustible irradié, en séparant les éléments fissiles (uranium, plutonium) et parfois les actinides mineurs, des déchets ultimes destinés à être vitrifiés, pour fabriquer de nouveaux assemblages. Cela permet de prolonger les ressources en uranium, de réduire le volume et la radiotoxicité des déchets et de soutenir les réacteurs rapides.

Un réacteur **monolithique** est une grande installation unique, construite sur site avec toutes ses unités intégrées, tandis qu'un réacteur **modulaire** est composé de modules standardisés et fabriqués en usine, assemblés sur site, ce qui facilite le déploiement progressif et la réduction des coûts.

Un **grand réacteur** vise une puissance électrique élevée (souvent >1000 MWe) pour alimenter un réseau centralisé, alors qu'un **petit réacteur** (SMR ou micro-réacteur) produit moins de 300 MWe, permettant une installation sur sites isolés, industriels ou pour des usages hybrides (chaleur + électricité), avec flexibilité et modularité.

Une configuration **loop**, ou réacteur à boucles, sépare clairement le cœur du réacteur et les échangeurs de chaleur dans une série de boucles externes, ce qui facilite la maintenance mais augmente les tuyauteries.

Une configuration **modular** répartit le système en sous-ensembles indépendants (cœur, échangeurs, pompes), conçus pour être fabriqués et remplacés plus facilement, parfois en plusieurs modules thermiques.

Une configuration **integral** regroupe tous les composants principaux (circuit primaire) dans la même cuve (cœur, pompes, générateurs de chaleur), ce qui réduit les risques de pertes de fluide et améliore la compacité.

De manière générale, mais non absolue, les SMR et AMR peuvent être de petits réacteurs modulaires pouvant fonctionner en cycle ouvert ou fermé, dans le spectre rapide ou thermique selon le modèle. D'autres caractéristiques, spécifiques à chaque filière peuvent différencier les réacteurs (particulièrement pour les filières Gaz et Sels fondus).

Cartographie des réacteurs nucléaires

Panorama des réacteurs nucléaires

De nombreux modèles de réacteurs nucléaires existent ou ont existé, tant pour des applications électrogènes, militaires, de recherche ou pour la production de chaleur. Leur vocation a orienté d'une part leur design, leur type de combustible mais aussi des caractéristiques plus profondes.

Les réacteurs sont classés en « filières » définies par trois caractéristiques : la nature du combustible, le type de modérateur et le type de caloporteur. Ces deux dernières caractéristiques distinguent tout particulièrement les modèles de réacteurs (figure).

Le modérateur (eau lourde ou légère, graphite...) permet de ralentir les neutrons (spectre thermique) afin d'augmenter la probabilité qu'ils interagissent avec le combustible et causent la génération d'autres neutrons perpétuant la réaction en chaîne. L'absence de modérateur est caractéristique des réacteurs à neutrons rapides (FSR).

Le caloporteur est le fluide permettant d'extraire l'énergie (thermique) du combustible libérée par les réactions de fission. Il peut être de l'eau, du gaz (Hélium ou CO₂), du sel fondu (fluorure) ou encore du métal liquide (Sodium, Plomb). Les réacteurs à caloporteurs métal liquide (LMR) sont spécifiques des FSR (figure).

Ces filières ne sont pas directement liées à la génération d'un réacteur. Certaines sont abandonnées (HWGCR) ou en cours d'abandon (LWGR) tandis que de nouvelles filières sont expérimentées ou se développent, notamment dans les MSR, les LMR et les VHTR.

Certains concepts, très différents, restent explorés tout en conservant un faible niveau de maturité. Parmi eux seuls les HPR pourraient présenter un réel impact d'ici 2050, mais plus au service du spatial que de la décarbonation. Les OCR ne sont pas assez prometteurs, tandis que les ADS et HNR pourraient émerger dans la seconde moitié du siècle. Ces concepts de niche ne sont pas des réponses sérieuses aux enjeux climatiques et de souveraineté énergétique.

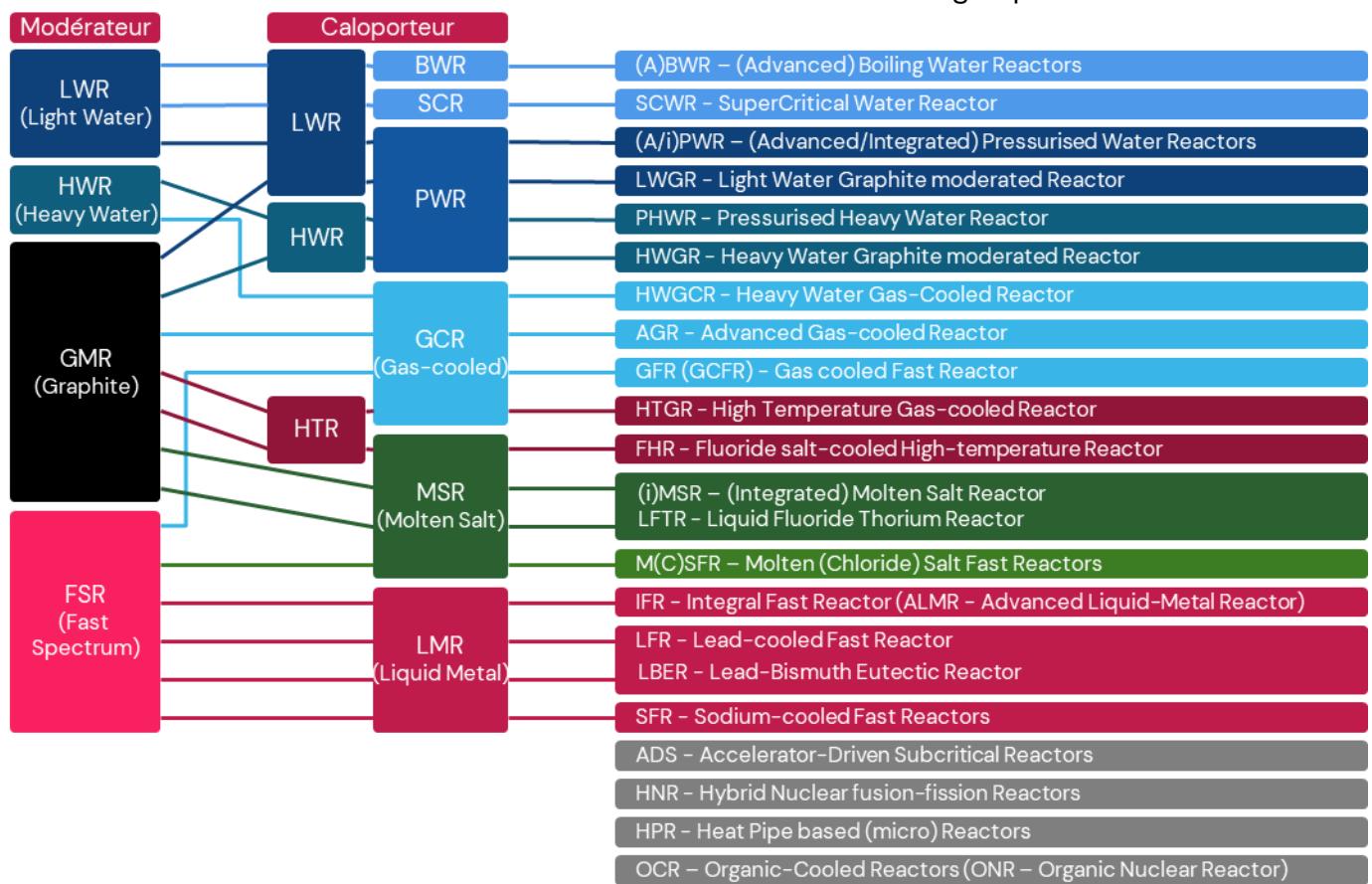


Figure 1 – Arborescence technologique des principales filières de réacteur. La colonne caloporteur peut agrégner le caloporteur en tant que tel et un élément de l'architecture (réacteur pressurisé, à eau bouillante, à haute température, etc.). Les 4 concepts en gris n'ont pas nécessairement de modérateur ou caloporteur exclusif.

Une dominance des PWR

Si les filières sont diversifiées (figure), seuls quelques modèles de réacteurs sont exploités ou construits en nombre aujourd'hui. Au niveau mondial, l'électricité d'origine nucléaire est majoritairement issue de réacteurs à eau pressurisée (PWR modérateur et caloporteur eau légère). Sur un total de 416 réacteurs en fonctionnement et en construction, les PWR en représentent 306 et 56. Les autres modèles les plus présents sont les PHWR (46 et 1), les BWR (43 et 2) et les LWGR (10), mais ne sont pratiquement plus construits [IAEA, 2025b]. Seuls 11 réacteurs en activité ne sont ainsi pas des réacteurs à eau, et les seuls en construction sont des FSR.

La France a tout d'abord exploré une filière de réacteurs à eau lourde (HWR), lancée avec la première pile atomique Zoé en 1948, puis dans les années 50-60 une filière de réacteurs gaz (GCR) modéré au graphite (GMR), les UNGG (Uranium Naturel Gaz Graphite). Les limites économiques, industrielles et de sûreté de ces réacteurs ont poussé la France à les abandonner, aussi au profit exclusif des PWR. Tout d'abord construits sous licence Westinghouse, leur concept est adapté par Framatome et EDF et 56 PWR furent mis en fonctionnement jusqu'en 2002.

Ces réacteurs (Génération II) sont désormais suivis du modèle EPR et du futur modèle EPR-2, réacteurs de grande puissance (1650 MWe) de génération III+, bénéficiant des retours d'expérience d'exploitation de la génération II et de l'accident de Fukushima. L'EPR-2 vise une réduction des coûts par standardisation et simplification du concept d'EPR, une approche commune aux petits réacteurs modulaires.

SMR et AMR

Les SMR, de puissance généralement inférieure à 300 MW, reposent sur des filières éprouvées — réacteurs à eau légère, haute température ou à eau lourde — mais miniaturées et standardisées pour réduire coûts et délais. Ils sont de génération III+. Les AMR, quant à eux, explorent des concepts plus innovants, et tout particulièrement 6 concepts retenus lors du Forum international Génération IV : réacteurs à sels fondus (MSR), rapides refroidis au sodium (SFR), au gaz (GFR) ou au plomb (FR), les réacteurs à très haute température (VHTR) et les réacteurs à eau supercritique (SCWR). Au travers de Rapsodie, Phénix, Superphénix et Astrid, la France se différencie de longue date sur les SFR.

Les différentes filières ciblées par les SMR et AMR font l'objet des pages suivantes.

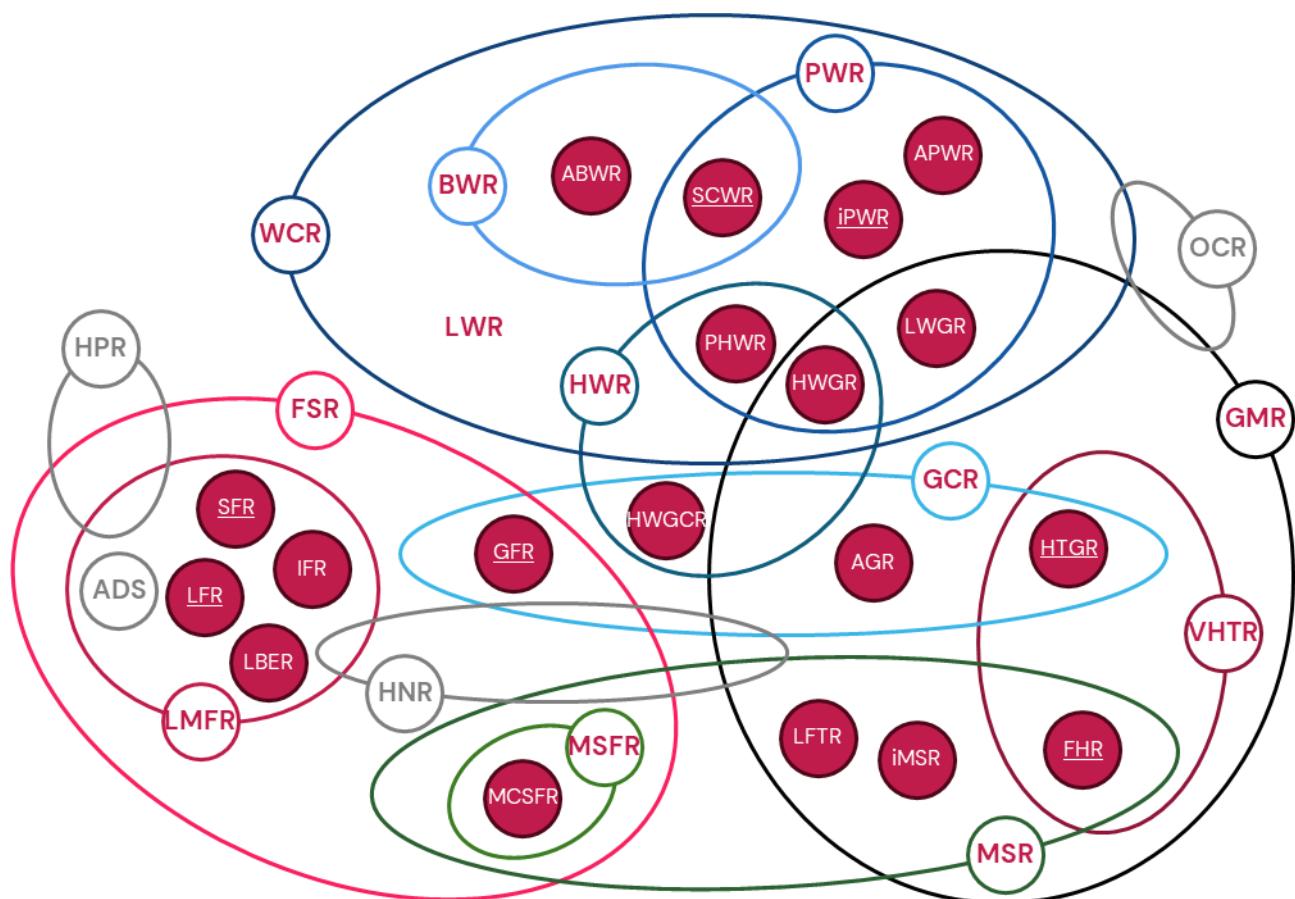


Figure 2 – Cartographie des principales filières et modèles de réacteurs, classés par modérateur et par caloporteur. Certaines filières (comme les PWR ou les GCR) sont implicitement contenues (sous leur forme standard ou avancée) dans un cluster plus grand, car le nom d'une architecture peut être confondu avec le nom d'une filière.

Réacteurs à eau pressurisée

PWR – Pressurised Water Reactor

Principe

Le réacteur à eau pressurisée (PWR) utilise de l'eau liquide et légère sous haute pression comme caloporteur et modérateur : le cœur chauffe l'eau du circuit primaire sans la faire bouillir, la chaleur est transférée via des générateurs de vapeur à un circuit secondaire où la vapeur actionne une turbine reliée à un alternateur (en cas d'application électrogène). Le cœur contient des barres de contrôle et du combustible à base d'uranium enrichi ; la pression élevée empêche l'ébullition et assure une forte inertie thermique, contribuant à la stabilité et à la sûreté.

Pour les SMR, la même physique s'applique, mais la conception est compacte et souvent intégrée (iPWR, générateurs de vapeur et pressuriseur dans la même cuve), avec un fort recours aux systèmes passifs et à la modularité pour réduire coûts, temps de construction et besoins d'exploitation.

Spécificités

Ces SMR capitalisent sur la filière éprouvée des PWR tout en introduisant des innovations : intégration des composants, sûreté passive, fabrication modulaire en usine et temps de construction réduits. Ces choix visent à améliorer la compétitivité et la standardisation, et à simplifier la procédure de sûreté/certification. Ces gains de coûts restent encore à être démontrés.

Les marchés ciblés vont au-delà de la production centralisée d'électricité : conversion de centrales à charbon, alimentation de réseaux isolés, couplage à des usages industriels (chaleur processus, désalinisation), et soutien aux datacenters.

Globalement, les acteurs leaders des grands réacteurs nucléaires PWR cherchent à développer une version intégrée et miniaturisée de leurs propres réacteurs, quelques nouveaux acteurs cherchent à pénétrer le marché avec des propositions différenciantes tandis que des organismes et consortium peuvent se mobiliser pour créer des co-entreprises assemblant des technologies « sur étagère ». Des designs tant électrogènes, calogènes qu'en cogénération voient le jour.

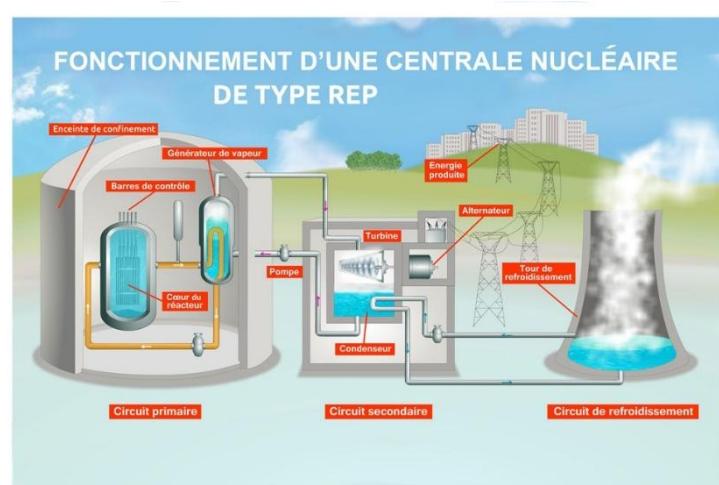


Figure 3– Principe d'un PWR (d'après CEA)

Principaux design - acteurs

France :

- Nuward (EDF, Framatome...)
- CAL 30 – Calogena
- Archeos

Reste de l'Europe :

- Rolls-Royce SMR
- LDR50 – Steady Energy
- Teplator – Université de Bohème
- Star – Star Energy
- MK 60 – Deep Atomic

Reste du Monde (sélection) :

- AP300 – Westinghouse
- VOYGR – NuScale
- SMR 160 / 300 – Holtec
- Quantum – Last Energy
- ACP100 – CNNC
- RITM-200 / RITM-400 – OKBM / Rosatom
- IMR – Mitsubishi
- SMART 100 – KAERI

Autres SMR à eau de génération III/III+

Quelques rares autres designs sont étudiés parmi les ABWR (BWRX-300 de GE Hitachi) qui est un concurrent direct des PWR, et les PHWR (au Canada et en Inde) [IAEA, 2025a].

Réacteur à eau supercritique

SCWR – SuperCritical Water reactor

Principe

Les Supercritical Water-Cooled Reactors (SCWR) sont des réacteurs avancés de la famille Génération IV qui utilisent de l'eau au-dessus du point critique thermodynamique ($\approx 374^\circ\text{C}$, 22,1 MPa) comme caloporteur (sans être ni un PWR ni un BWR, ils combinent certaines de leurs caractéristiques), ce qui élimine la séparation classique liquide-vapeur et permet un cycle direct turbomachines vers le générateur électrique. Cette exploitation en régime supercritique offre un rendement thermique nettement supérieur à celui des LWR classiques (gain théorique de l'ordre de 30–40 % sur l'efficience du cycle) et simplifie l'architecture des systèmes de vapeur.

Techniquement, les SCWR peuvent être conçus en versions thermiques mais aussi rapides (par exemple avec un design de type HPR) : le spectre neutronique dépend du jeu sur la modération (assemblages, canaux d'eau, composants modérateurs) et du choix du combustible — typiquement uranium faiblement enrichi pour les variantes thermiques. Les températures de sortie visées ($\approx 500\text{--}550^\circ\text{C}$ ou plus) autorisent des applications au-delà de la seule électricité (chaleur industrielle haute température, production d'hydrogène par voies thermochimiques).

Défis

Les principaux défis sont matériels et corrosifs : la chimie de l'eau supercritique, l'oxydation et l'endommagement par irradiation des alliages (gaines, corps de pompe, échangeurs) exigent de la R&D sur les alliages avancés, les traitements de surface et la gestion de la chimie du circuit primaire. La stabilité thermo-hydraulique (fortes variations de densité, gradient de chaleur, instabilités de flux) et la qualification du combustible restent des verrous techniques majeurs.

Opportunités

Sur le plan commercial, les SCWR promettent une compétitivité intéressante si les verrous matériels et de sûreté sont levés : meilleure efficacité, moindre empreinte d'installation (cycle direct), et possibilité de produire chaleur industrielle à haute température qui élargit les marchés potentiels

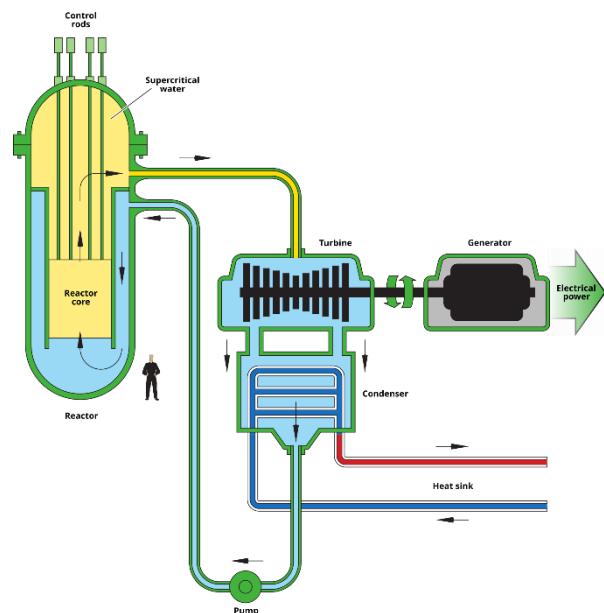


Figure 4 – Principe d'un SCWR (d'après NEAC)

(procédés industriels, pétrochimie, hydrogène, désalinisation). Les projets actuels sont encore majoritairement pré-compétitifs / recherche et démonstration : le passage à des AMR de type SCWR implique modularité du cœur et des composants, industrialisation d'éléments préfabriqués et standardisation des interfaces pour réduire coûts et délais — axes déjà étudiés dans des projets européens et internationaux.

Principaux design – acteurs

Aucun acteur français ne semble travailler sur cette filière.

Europe :

- ECC-SMART Project – Un projet de recherche Europe-Canada-Chine co-financé par l'UE.

Chine :

- CSR1000 / CSR150 – NPIC / CNNC

Canada :

- SCWR Concepts – AECL

Tous ces projets sont à un très faible niveau de maturité technique (TRL 2-4) [IAEA, 2025a]. Il est improbable que le développement de cette filière impacte le déploiement commercial des SMR et AMR d'ici 2050.

Réacteur à (très) haute température

HTGR (VHTR) – (Very) High Temperature Gas-cooled Reactor

Principe

Les Very-High-Temperature Reactors (VHTR) sont des réacteurs avancés refroidis par hélium et modérés au graphite, conçus pour produire à la fois électricité et chaleur industrielle à haute température. Leur principe fondamental repose sur un cœur à faible densité de puissance (limitée à 250 MWth) contenant du combustible TRISO (particules micro-encapsulées) enfermé dans des blocs prismatiques ou des boulets (pebble-bed reactor). Le gaz hélium, chimiquement inert et neutre vis-à-vis du combustible, circule au travers du cœur et transporte la chaleur vers un convertisseur. Les températures de sortie visées varieraient typiquement entre 550 °C et 950 °C selon le concept, rendant possible la production d'hydrogène, le reformage et des procédés industriels à haute température.

La robustesse intrinsèque des TRISO (forte rétention des produits de fission à très haute température) et la grande inertie thermique du graphite confèrent aux VHTR des caractéristiques de sûreté passive : tolérance aux pertes de refroidissement et faible risque de fusion. Techniquement, les deux variantes (blocs ou boulets) coexistent, chacune présentant des compromis en manutention du combustible, charge en combustible et dynamique thermique.

Défis

Les principaux verrous concernent les matériaux (comportement sous irradiation et températures extrêmes), la qualification industrielle de la fabrication TRISO à grande échelle, et le cadre réglementaire/certification pour des cycles non-conventionnels.

Opportunités

Sur le plan du marché et des applications, les VHTR / HTGR ciblent des usages où la chaleur haute température est stratégique : procédés chimiques, sidérurgie (pré-traitements), production d'hydrogène bas-carbone, désalination et cogénération industrielle. Leur potentiel économique repose sur la valorisation de la chaleur à haute température là où la simple électricité ne suffit pas.

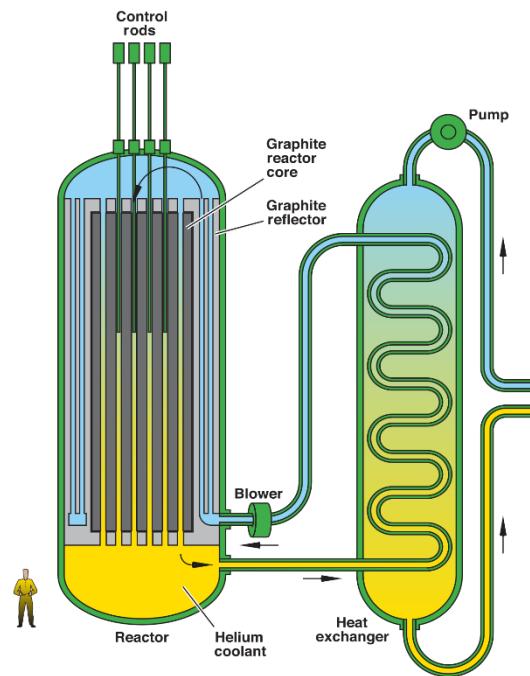


Figure 5– Principe d'un HTGR (d'après NEAC)

Principaux design – acteurs

France :

- JIMMY
- Blue Capsule

Reste de l'Europe :

- HTGR POLA – NCBJ
- U-Battery – Urenco

Reste du monde (sélection) :

- E Vinci – Westinghouse
- EM2 – General Atomics
- XE100 – X Energy
- HTR PM – CNNC
- MHR 100 – OKBM
- HTGR 30 – JAEA
- HTMR 100 – Startek

Ces différents designs visent en priorité la production de très petites unités modulaires, adaptées à ce type de réacteur. Les premières unités pourraient être commercialisées à partir de 2030 à condition d'identifier un modèle rentable pour ces petites puissances.

Réacteur à sels fondus

MSR – Molten Salt Reactor

Principe

Les réacteurs à sels fondus (MSR, Molten Salt Reactors) constituent l'une des filières les plus innovantes et les plus diversifiées de la Génération IV. Leur particularité centrale réside dans l'usage de sels fondus fluorés ou chlorés jouant simultanément le rôle de caloporteur et, dans certaines variantes, de combustible liquide (mélange de sels contenant la matière fissile dissoute). Fonctionnant typiquement entre 550 et 750 °C, et à pression quasi atmosphérique, ils se distinguent fortement des filières à eau pressurisée, ce qui améliore la sûreté intrinsèque et la robustesse mécanique des installations. Ils peuvent être thermiques ou rapides :

- Les fluorures fonctionnent généralement avec des spectres thermiques et un cycle Uranium-Thorium qui oblige à recycler en ligne.
- Les chlorures sont adaptés au spectre rapide. Ils travaillent en Uranium-Plutonium de manière classique (sans retraitement en ligne) car compatible avec la Hague. C'est cette configuration qui s'impose en Europe.

Défis

Les défis techniques portent surtout sur la corrosion des matériaux en sels fondus, la gestion chimique du sel, la qualité des structures internes (alliages Ni-Cr, Hastelloy-N modifiés), ainsi que la qualification des systèmes de retraitement en ligne. Les versions AMR (Advanced Modular Reactors) s'orientent vers des designs compacts, fabriqués, avec des systèmes entièrement passifs (drain tanks, solidification du sel en cas d'accident). Leur modularité et la possibilité de fonctionner à haute température positionnent les MSR comme une option privilégiée pour les marchés industriels à forte demande thermique, ainsi que pour les zones isolées nécessitant des solutions robustes et indépendantes du réseau.

Opportunités

Les MSR permettent l'utilisation de combustibles variés : U-235, U-233 issu du thorium, ou mélanges multi-actinides dans des versions rapides. Leur température élevée ouvre la voie à des applications multiples : production d'électricité à

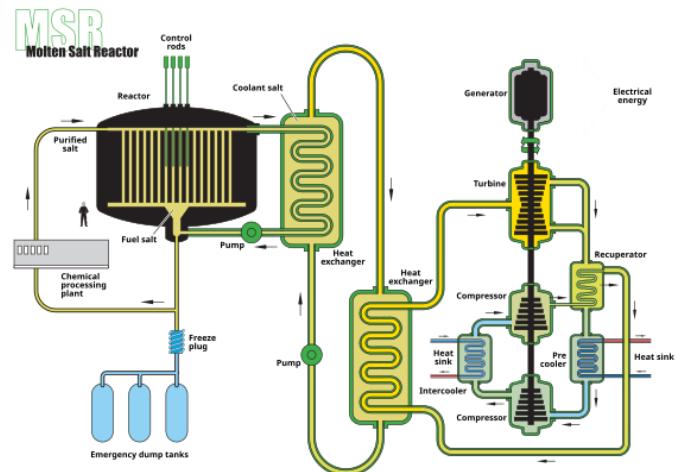


Figure 6 – Principe d'un MSR (d'après NEAC)

haut rendement, chaleur industrielle, hydrogène bas-carbone, désalinisation, ou encore production d'ammoniac.

Les cycles thorium-U-233 sont vantés pour leurs perspectives de réduction durable des déchets et d'autosuffisance en combustible. Ils seraient néanmoins plus lourds à mettre en place (radiotoxicité plus importante) que par exemple des PWR appuyés par des FSR fermant le cycle.

Principaux design – acteurs

France :

- X-AMR – Naarea
- Thorizon
- Stellarium – Stellaria

Reste de l'Europe :

- CMSR – Seaborg
- CAWB – Copengagen Atomics
- Energy Well – CVR
- SSR-U ; Flex Reactor – Moltex

Reste du monde (sélection) :

- TMSR LF – CNNC
- Intégral MSR – Terrestrial Energy
- Starcore – Starcore Nuclear
- MCFR – GE/Hitachi
- Hermès 2 – Kairos Power
- TMSR – ThorCon

D'une grande diversité, et combinant souvent plusieurs ruptures technologiques, ces filières sont plus complexes. Les projets français sont tous de type MSFR.

Réacteur à neutrons rapides refroidi au gaz

GFR – Gas-cooled Fast Reactor

Principe

Les Gas-cooled Fast Reactors (GFR) sont une famille Génération-IV qui combine un spectre neutronique rapide et un circuit caloporeur gazeux (généralement de l'hélium) pour atteindre des températures de sortie très élevées (références typiques : 700–950 °C voire >850 °C pour les concepts de référence). L'objectif technique principal est double :

- Obtenir une haute efficacité thermodynamique (rendements nettement supérieurs aux LWR)
- Permettre la fermeture du cycle du combustible (produire moins de déchets, recycler le plutonium et le régénérer) grâce aux propriétés des réacteurs rapides.

La conception typique met en œuvre un cœur à forte densité de puissance employant des combustibles céramiques avancés (oxydes enrichis, nitrides, combustibles à matrice céramique ou particulaire) et des gaines / structures en matériaux refractaires ou composites (SiC-SiC envisagé) capables de résister à de hautes températures et à l'irradiation. Le gaz (hélium) est choisi pour sa faible modération et son inertie chimique ; il est transparent neutroniquement et permet un transfert de chaleur sans émission secondaire liquide, facilitant l'intégration d'une turbomachine à cycle fermé.

Défis

Cependant, les verrous restent importants : comportement thermo-hydraulique d'un cœur très peu modéré (problèmes de refroidissement local, instabilités de flux), qualité et tenue des matériaux en environnement hélium super-chauffé et irradié, qualification du combustible (résistance mécanique, fission product retention), et démonstration opérationnelle (aucun GFR n'a encore atteint la criticité commerciale).

Ces défis font que la filière est encore majoritairement en phase R&D / démonstrateur ; le projet ALLEGRO en Europe illustre le chemin de démonstration souhaité pour valider le concept et les matériaux avant un déploiement industriel.

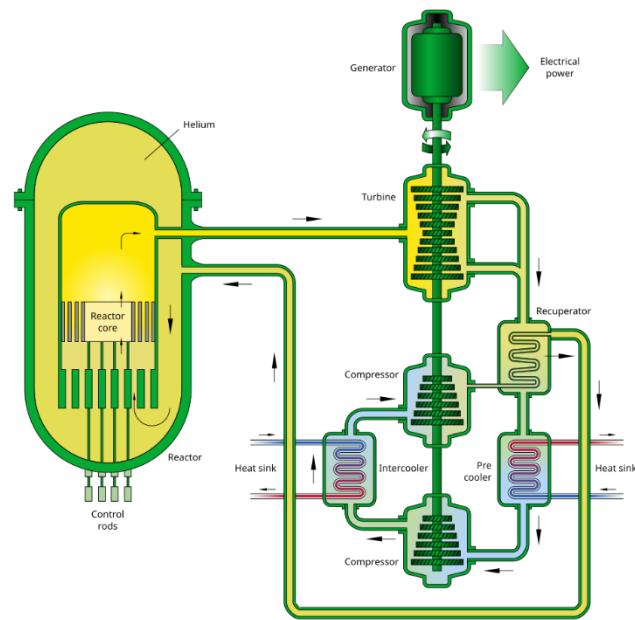


Figure 7– Principe d'un GFR (d'après NEAC)

Opportunités

Les applications ciblées pourraient aller de la production d'électricité très efficace (avec rendement thermique élevé) à la chaleur industrielle haute température (hydrogène thermochimique, procédés chimiques, sidérurgie légère). Les GFR promettent aussi un rôle avancé dans la transmutation et la gestion durable du combustible (fermeture du cycle), faisant d'eux des candidats pour des marchés où la production de chaleur à haute température et la minimisation des déchets sont valorisées.

Acteurs

A l'instar des SCWR et des HTGR, ces designs sont à un stade très amont. Aucun projet mature n'est encore identifié et même si ces filières font l'objet d'actives recherches elles ne sont pas privilégiées par rapport aux réacteurs à neutrons rapides à sels fondus ou à métal liquide.

Réacteur à neutrons rapides refroidi au métal liquide

LMFR – Liquid Metal cooled Fast Reactor

Principe

Les réacteurs rapides refroidis au métal liquide utilisent un spectre neutronique rapide permettant d'exploiter tous les isotopes du plutonium et de fertiliser l'Uranium 238. Ils jouent donc un rôle central dans les stratégies de fermeture du cycle du combustible, de réduction des déchets à vie longue et d'augmentation de la valorisation énergétique de l'uranium. Leur fluide caloporteur est un métal liquide – principalement le sodium, mais aussi parfois le plomb, ou un eutectique – offrant une conductivité thermique élevée, une faible pression de fonctionnement et la possibilité d'atteindre des températures de sortie de l'ordre de 450°C selon la technologie.

Côté combustible, les filières rapides utilisent généralement des oxydes (MOX), des métalliques (U-Zr, U-Pu-Zr) ou des carburés/nitrures pour les réacteurs les plus avancés. Les cycles d'utilisation peuvent être plus courts, mais leur capacité à exploiter tous les isotopes du Plutonium permet une stratégie de multi-recyclage. Leur cœur compact et leur haute densité énergétique en font également d'excellents candidats pour les AMR, avec modularisation d'îlots, simplification des systèmes de sûreté (refroidissement passif, inertie thermique élevée) et déploiement possible sur sites industriels.

SFR : Réacteurs rapides refroidis au sodium

Les SFR sont la filière rapide la plus mature, avec plusieurs décennies de retour d'expérience (Phénix, Superphénix, BN-600, BN-800). Le sodium présente une excellente conductivité thermique, une faible activation neutronique, est faiblement corrosif et permet des températures de 500–550 °C. En revanche, sa réactivité chimique avec l'eau et l'air impose des systèmes de séparation stricts et de gestion de la réaction sodium-eau. Les marchés envisagés incluent la production d'électricité et de chaleur, le recyclage avancé du combustible et la réduction des déchets.

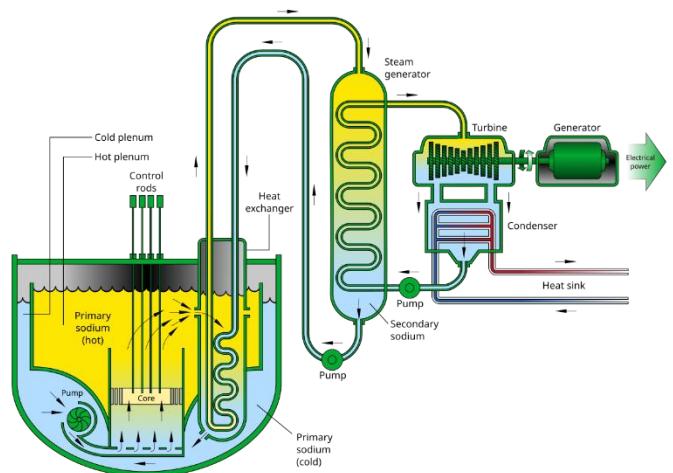


Figure 8 – Principe d'un SFR (d'après NEAC)

LFR : Réacteurs rapides refroidis au plomb

Les LFR utilisent du plomb comme caloporteur, ce qui supprime les risques chimiques du sodium et permet des températures plus faibles. Le plomb assure une excellente inertie thermique et une forte résistance au LOCA, mais entraîne des défis liés à la corrosion, à sa forte densité, à la solubilité de l'oxygène et à l'érosion des matériaux. Les LFR visent les marchés militaires, les applications isolées, la chaleur industrielle haute température et les micro-réacteurs.

Principaux design – acteurs

France (SFR) :

- HEXANA
- OTRERA

France et Europe (LFR) :

- LFR AS-200 – Newcleo
- Sealer – Blykalla
- LEANDRA – SCK CEN

Reste du monde (sélection SFR) :

- ARC 100 – ARC
- Salus 100 – Kaeri
- 4S – Toshiba
- PRISM ; Natrium – GE/Hitachi
- AURORA – OKLO

Reste du monde (sélection LFR) :

- Leadir PS 100 – Northern Nuclear Alliance
- SVBR100 – OKBM

2

Perspectives

Modularité, industrialisation

Cas d'usage

Sécurité, sûreté

Cycle du combustible

Business Model



Modularité, industrialisation

Principe

Contrairement aux grandes centrales nucléaires construites entièrement sur site, les SMR/AMR seraient fabriqués en modules standardisés dans des usines spécialisées, puis transportés et assemblés sur le lieu d'exploitation.

Modularité pour l'industrie

La fabrication en série des réacteurs devrait permettre des économies d'échelle, une standardisation poussée et un apprentissage industriel. Produits en usine, ils pourront bénéficier d'un contrôle qualité renforcé, grâce à des conditions stables qui réduisent erreurs et retards. Leur montage sur site serait plus rapide qu'une centrale de type EPR, mais restera de l'ordre de quelques années. Cette approche limiterait aussi la dépendance aux conditions locales (main-d'œuvre, climat, logistique), améliorant la prévisibilité des coûts et des délais.

Modularité d'exploitation

La modularité d'exploitation permettrait d'ajouter des modules progressivement, pour une production réellement « à la carte » selon l'évolution de la demande. Cette flexibilité favorise l'intégration dans des réseaux électriques moyens ou sur des sites industriels. Les réacteurs modulaires permettront aussi à une grande variété d'usages : électricité, chaleur industrielle et urbaine, hydrogène ou dessalement. Enfin, leur conception compacte et standardisée contribuerait à une approche différente de la sûreté, grâce à des systèmes simplifiés et à une meilleure maîtrise des scénarios accidentels.

Mise en place d'une filière industrielle

Les réacteurs modulaires nécessitent des chaînes d'approvisionnement stables pour les matériaux et composants nucléaires critiques. Leur déploiement reposera sur la création d'usines de fabrication dédiées, soumises à des certifications nucléaires strictes. Pour soutenir un marché international, il devient essentiel d'établir des standards communs afin d'harmoniser les conceptions et de faciliter l'exportation. Aujourd'hui, la majorité des pays en est encore au stade des prototypes ou des premières usines

pilotes, et la montée en échelle industrielle reste un défi majeur.

Réglementation et licences

Les cadres réglementaires actuels sont principalement conçus pour des réacteurs uniques, monolithiques et de grande taille, et non pour une production de petites unités en série. Il est donc nécessaire de développer des procédures de certification modulaires, permettant à un modèle de se soumettre à un ensemble d'exigences commun à plusieurs pays. Cette approche exige également une coopération renforcée entre les autorités nationales (ASN, NRC, ONR, CNSC...), afin de mutualiser les évaluations de sûreté, réduire les redondances et accélérer le déploiement des réacteurs modulaires à l'international.

Financement et acceptabilité

La viabilité économique des réacteurs modulaires dépendra de la courbe d'apprentissage industrielle, les premiers exemplaires étant plus coûteux. L'adoption d'une production standardisée et modulaire permettra de réduire les délais entre les unités et de faciliter les investissements privés : les premières ventes financent la construction des réacteurs suivants. Malgré les progrès en sûreté, l'acceptabilité sociale et politique reste un enjeu majeur. Pour franchir la phase de démonstration, les partenariats public-privé et les investissements gouvernementaux sont essentiels afin de soutenir le déploiement et sécuriser le financement initial des programmes modulaires.

Perspectives

In fine, les capacités d'une entreprise à mobiliser ses fonds, à mettre en place une chaîne industrielle cohérente, et à réduire les coûts seront plus déterminantes pour la progression d'une entreprise SMR/AMR que les subtilités technologiques qui pourraient la différencier ou encore que sa rapidité à proposer une tête de série.

Cas d'usage de production d'énergie

Chaleur industrielle et cogénération

Les SMR/AMR pourraient fournir de la chaleur à haute température (300–900 °C) pour :

- les raffineries et la chimie lourde,
- la production d'acier ou de ciment,
- le chauffage urbain,
- la désalinisation de l'eau de mer.

Certains AMR à gaz, à métal liquide ou à sels fondus (comme les réacteurs à haute température ou à hélium) sont conçus spécifiquement pour cette chaleur de procédé, difficile à décarboner.

Production d'hydrogène bas carbone

Les SMR et surtout les AMR à haute température peuvent alimenter : l'électrolyse de l'eau (classique ou à haute température), voire des cycles thermo-chimiques (comme le cycle soufre-iode).

Cela permettrait de produire de l'hydrogène avec peu d'émission de CO₂, à des coûts potentiellement acceptables. Par exemple, les VHTR sont étudiés pour la production d'hydrogène industriel au Japon et aux États-Unis.

Production d'électricité décarbonée

Les SMR peuvent fournir une électricité bas carbone adaptée aux réseaux de taille moyenne ou aux sites isolés. Leur puissance typique varie de 50 à 300 MWe par module, et peut être étendue en ajoutant plusieurs unités selon les besoins. Ils conviennent particulièrement aux régions non interconnectées ou aux pays disposant de peu d'infrastructures nucléaires. Parmi les exemples, le BWRX-300 de GE Hitachi et le Nuward d'EDF ciblent des réseaux en Europe et au Canada, démontrant la flexibilité et l'adaptabilité de cette filière pour différents marchés.

Production stable d'électricité

Si certains acteurs industriels ont annoncé des objectifs de décarbonations ambitieux, certains s'intéressent au nucléaire, et en particulier aux SMR afin de s'assurer une consommation électrique stable en réponse aux tensions anticipées sur le réseau électrique. C'est par exemple le cas des exploitants de data centers, dont la plupart des acteurs américains ont annoncé des partenariats avec les producteurs de SMR.

Autres applications (électriques) :

- Alimentation de sites isolés ou stratégiques
- Soutien au réseau électrique (flexibilité)
- Propulsion et applications mobiles

Sûreté et sécurité des petits réacteurs modulaires

Sûreté nucléaire

La sécurité nucléaire comprend la sûreté nucléaire, la radioprotection, la prévention et la lutte contre les actes de malveillance ainsi que les actions de sécurité civile en cas d'accident. La sûreté nucléaire correspond à l'ensemble des mesures techniques de nature à prévenir les accidents nucléaires et à en limiter les effets s'ils surviennent. C'est aujourd'hui surtout cette notion de sûreté qui concerne les concepteurs de réacteur.

Spécificités des PRM

Les PRM offrent une sûreté améliorée grâce à leur petite taille, qui limite la chaleur résiduelle à évacuer en cas d'arrêt d'urgence. Ils intègrent des systèmes de sécurité passifs, utilisant la gravité, la convection naturelle et la dilatation thermique plutôt que des pompes ou des interventions humaines, comme le refroidissement par circulation naturelle. Certains modèles disposent d'un confinement modulaire, enterré ou encapsulé, renforçant la protection contre les agressions externes. Enfin, la fabrication en usine permet de réduire le risque d'erreur humaine lors de la construction sur site, garantissant des standards de qualité et de sûreté plus élevés.

Cas des AMR

Les AMR introduisent de nouvelles approches pour la sûreté : un refroidissement plus efficace (par exemple avec des sels fondus à basse pression) réduirait le risque d'explosion ou de perte de confinement, tandis que des combustibles stables comme le TRISO supportent des températures supérieures à 1600 °C. Certains designs présentent un comportement intrinsèquement plus sûr, s'arrêtant automatiquement si la température devient trop élevée grâce à des boucles de feedback négatif. Toutefois, des défis subsistent : manque d'expérience opérationnelle à grande échelle, comportements chimiques complexes (sodium réactif, plomb et sels corrosifs) et nécessité d'adapter les réglementations existantes, initialement conçues pour les réacteurs à eau pressurisée.

Prospective sur la sécurité

La sécurité des petits sites gérés par des opérateurs privés deviendra un enjeu majeur, d'autant que la multiplication de ces sites augmente la complexité du contrôle. Il est nécessaire de développer des techniques de mutualisation de la sécurité, permettant d'assurer les redondances essentielles sans alourdir les coûts d'exploitation, tout en partageant certaines opérations et du personnel de sûreté. À l'avenir, les systèmes d'information et de cybersécurité deviendront des leviers critiques, garantissant la surveillance, le contrôle et la coordination entre plusieurs PRM.

Cycle du combustible

Cycle du combustible (SMR)

Le cycle du combustible des SMR suit les mêmes grandes étapes que celui des réacteurs conventionnels, mais avec des spécificités liées à leur taille réduite et à leur conception modulaire. Il commence par la conversion et l'enrichissement de l'uranium. Vient ensuite la fabrication des assemblages, généralement optimisés pour une longue durée en cœur, réduisant la fréquence des rechargements. Après irradiation, le combustible usé est entreposé le temps de refroidir suffisamment, en piscine ou en conteneur sec. Selon les choix nationaux, il peut être retraité (cycle fermé) pour récupérer l'uranium et le plutonium, ou destiné au stockage géologique profond dans le cas d'une approche de cycle ouvert (sans recyclage). Grâce à leur efficacité neutronique et à la standardisation industrielle, certains SMR promettent une réduction des volumes de déchets et une gestion plus simple de la logistique combustible.

Les matières et combustibles (zoom)

Uranium naturel : Utilisé dans les SMR HWR, ne nécessite pas d'enrichissement. Convient aux pays avec uranium local mais nécessite un modérateur très peu absorbant.

LEU ($\leq 5\%$ U-235) : Adapté aux PWR/BWR, mature industriellement, cycles plus courts que HALEU, bon compromis sûreté/production.

HALEU (5–20 % U-235) : Idéal pour SMR et AMR compacts, cycles longs, haute densité énergétique et flexibilité pour cœurs modulaires.

MOX (U+Pu oxydes) : Compatible avec FSR, recycle le plutonium, réduit les déchets à vie longue, cycle fermé.

Combustible métallique (U-Zr, U-Pu-Zr) : Pour LMFR, haute conductivité thermique, cœur compact, températures élevées.

TRISO : Pour réacteur haute température, stable $>1600\text{ }^{\circ}\text{C}$, sécurité intrinsèque, non retraiable (cycle ouvert) adapté électricité, chaleur industrielle, hydrogène.

Thorium (Th-232) : Pour AMR thermiques, MSR, cycles longs, moins d'actinides mineurs, nécessite fissile initial (HALEU/U-233).

Fermeture du cycle

La fermeture du cycle du combustible consiste à recycler le combustible nucléaire usé plutôt que de le stocker directement comme déchet, optimisant l'utilisation des ressources fissiles et réduisant les déchets à vie longue. Après irradiation, le combustible usé est refroidi puis retiré pour séparer l'uranium, le plutonium et, éventuellement, les actinides mineurs des déchets ultimes. L'uranium peut être ré-enrichi et réutilisé, tandis que le plutonium sert à fabriquer du MOX ou d'autres combustibles pour des réacteurs adaptés.

Les réacteurs à neutrons rapides jouent ici un rôle clé : ils peuvent convertir l'uranium 238 en plutonium 239, et exploiter tous les isotopes du plutonium. Ils offrent ainsi une valorisation maximale des ressources fissiles et prolongent les réserves d'uranium disponibles. En outre, les FSR modulaires permettent de combiner sécurité, compacité et flexibilité industrielle, tout en intégrant la fermeture du cycle dans une stratégie nucléaire durable et décarbonée.

Les réacteurs à neutrons rapides

Si les AMR de type FSR ne pourront pas seuls fermer le cycle, ils sont néanmoins une étape clef vers et en attendant le déploiement de grand réacteur à neutron rapide. Initialement envisagés pour la seconde moitié du siècle, pour des raisons stratégiques plus que technologiques, ces réacteurs méritent un déploiement plus rapide en France.

Réduisant rapidement la radiotoxicité et le volume des déchets à vie longue, ils permettent également de valoriser l'uranium-238, peu exploité dans les réacteurs thermiques, prolongeant les réserves disponibles de plusieurs milliers d'années. Retarder ce déploiement de plusieurs décennies ralentirait les gains environnementaux et énergétiques, tout en limitant la compétitivité stratégique du pays dans le domaine du nucléaire alors que cette filière est en adéquation avec les spécificités françaises.

Business Model

Types de produit

Production industrielle standardisée / "factory model"

Le business model "factory model" pour les SMR repose sur une production industrielle standardisée : les modules sont fabriqués en série dans une usine dédiée, puis livrés prêts à monter chez différents clients. Cette approche permet de réduire fortement les coûts unitaires grâce aux économies d'échelle et à la courbe d'apprentissage, tout en accélérant les délais de construction. Elle garantit aussi un contrôle qualité élevé et facilite la certification d'un modèle unique reproduit en plusieurs exemplaires. Des projets comme le BWRX-300, NuScale ou Nuward illustrent cette logique. Ses limites restent l'investissement initial massif et le besoin de standards internationaux pour soutenir l'export.

Modèles de réacteurs semi-personnalisable pour les besoins du client

Un autre modèle économique pour les SMR repose sur des réacteurs semi-personnalisables, permettant d'ajuster la puissance, la configuration du cœur et les options de cogénération selon les besoins du client. Cette modularité en puissance faciliterait l'intégration dans des contextes variés : sites industriels, réseaux électriques régionaux, zones isolées ou projets nécessitant à la fois électricité et chaleur.

Toutefois, les solutions hybrides (cogénération) doivent être abordées avec prudence. Bien que prometteuses au premier abord, elles peuvent s'avérer plus coûteuses selon les spécificités locales. De plus, les marchés où la cogénération SMR répond parfaitement aux besoins demeurent souvent de niche aujourd'hui. La stratégie la plus efficace consiste à remplacer progressivement les centrales fossiles en cogénération, puis à cibler les écosystèmes industriels où coexistent déjà plusieurs usages énergétiques, et enfin les zones résidentielles susceptibles de déployer un réseau de chaleur à long terme. Sans une planification publique coordonnée, le potentiel de la cogénération SMR en Europe risque de rester limité, car les cadres actuels peuvent désavantager les réacteurs hybrides par rapport aux installations purement électriques.

Modèles d'affaire

Vente de réacteurs "clé en main" (Build & Sell)

Le modèle d'affaire "clé en main" (Build & Sell) consiste pour l'industriel à concevoir, construire et livrer un réacteur complet directement sur le site du client, généralement accompagné d'un contrat initial de maintenance ou d'exploitation. Ce modèle offre un contrôle total sur la conception, la fabrication et la qualité, permettant une forte standardisation et une reproduction efficace sur plusieurs sites. Des projets comme NuScale aux États-Unis ou Rolls-Royce SMR au Royaume-Uni illustrent cette approche, où les exploitants achètent un module complet puis produisent et vendent l'électricité. Toutefois, le modèle présente des limites : il exige des investissements initiaux très élevés pour le fournisseur et repose sur la capacité financière du client à financer l'ensemble du projet, ce qui peut freiner l'adoption dans les marchés émergents ou à faible pouvoir d'investissement.

Location / "Reactor as a Service" (RaaS)

Ce modèle repose sur la location : le fournisseur garde la propriété du réacteur et le client paie uniquement la production d'électricité, de chaleur ou d'hydrogène. Ce modèle réduit fortement la barrière financière pour l'acheteur, supprime le besoin de CAPEX massif et garantit un revenu stable au fournisseur. Il simplifie aussi la maintenance et le suivi réglementaire, centralisés par l'opérateur. Des concepts comme le micro-réacteur eVinci de Westinghouse ou certains AMR destinés aux communautés isolées explorent cette approche. Ses limites incluent la nécessité d'un cadre réglementaire adapté et un partage clair des risques liés à la sûreté, aux performances et aux obligations légales.

Rentabilité et compétitivité

Sur un réseau classique, ou pour des applications industrielles, une trop petite unité peut produire une énergie non compétitive par rapport aux alternatives (les coûts et charges fixes ne peuvent être amortis). Ainsi que l'illustre le cas récent de Jimmy, un seuil minimal de l'ordre de 50–100 MWe (200 MWth) apparaît.

Pistes & recommandations

À l'issue de cette analyse des technologies des PRM, il apparaît que ces filières nucléaires offrent une opportunité stratégique majeure : concilier décarbonation, souveraineté énergétique et flexibilité industrielle. Les défis du nucléaire de grande puissance — retards chroniques, coût exorbitant (comme pour l'EPR), perte de compétences et rigidité opérationnelle — nourrissent l'intérêt croissant pour des solutions modulaires plus agiles qui viendraient les compléter.

Perspectives (2 focus) :

Le déploiement industriel des **SMR calogènes** classiques, d'ici les années 2030, favorisé par l'effet d'échelle, la standardisation et la fabrication en usine. Les technologies matures et sur étagères, les designs simples et moins couteux, lanceront le marché.

La relance des réacteurs rapides (SFR et MSFR), notamment au sodium et sel fondu, pour renforcer l'autonomie nucléaire de la France et pouvoir fermer le cycle du combustible. Un pilotage politique fort est nécessaire pour relancer cette filière structurante et rattraper la perte d'avance française dans ce domaine.

Parallèlement, l'évolution géopolitique de l'approvisionnement en uranium naturel rend ces réflexions plus urgentes : la France, dépendante des importations, doit renforcer sa résilience face à la volatilité des approvisionnements.

Point de vigilance

La stratégie nucléaire française traverse une phase de transition : malgré un retour politique affirmé en faveur du nucléaire, la vision d'ensemble reste fragmentée et insuffisamment pilotée. Contrairement à l'ambition structurée des années 1970, la France adopte aujourd'hui une approche de "sélection naturelle" des projets PRM : de nombreuses initiatives privées émergent, mais sans priorisation claire, ni programme national fédérateur. Cette absence de choix stratégique dilue les financements, ralentit la maturation technologique et crée une incertitude pour les investisseurs. Cette stratégie table sur la disparition progressive des projets les moins aptes (à lever des fonds) et ne semble anticiper la fin de

vie de ces projets et le devenir des expériences, concepts et compétences acquises.

Recommandations stratégiques

Accélérer le soutien aux projets SMR / AMR prometteurs (démonstrateurs, prototypes) en priorisant un engagement programmatique (financement, licences, formation).

Développer une stratégie nationale de relance des réacteurs rapides (SFR au sodium), en redonnant à l'État un rôle de stratège et en fédérant la recherche et l'industrie sur un projet clair et soutenu.

Harmoniser les normes de sûreté et les procédures réglementaires au niveau européen pour permettre des effets de série et des exportations.

Lancer des programmes de formation massifs pour préparer la main-d'œuvre aux métiers des SMR et AMR.

Encourager les partenariats public-privé pour financer la R&D dans les réacteurs rapides, et assurer le développement d'un cycle du combustible souverain.

Recommandations industrielles

Coopérer pour mutualiser les chaînes de valeur (production de modules, qualifications, co-site industriel) et tirer parti des effets d'apprentissage.

Anticiper la montée en puissance des besoins en matière nucléaire : une préparation proactive des territoires (sites, concertation publique) pour sécuriser l'implantation des SMR et AMR.

Investir dès maintenant dans les infrastructures du combustible : les AMR requièrent des chaînes d'approvisionnement (HALEU, Pu) long terme.

Conclusion

Les SMR et AMR représentent une révolution stratégique pour le nucléaire français et européen : non seulement en tant que leviers de décarbonation, mais aussi comme instruments de souveraineté industrielle et énergétique. Toutefois, pour concrétiser ce potentiel, une volonté politique affirmée, un engagement financier à long terme, des standards harmonisés et une montée en compétence collective sont indispensables.

Références

- Annales des Mines, 2024. [Le Nouveau nucléaire, Responsabilité & Environnement](#).
- CEA, 2006. [Les réacteurs nucléaires à caloporteur gaz](#), Monographie 1.
- CEA, 2008. [Les combustibles nucléaires](#), Monographie 2.
- CEA, 2014. [Les réacteurs nucléaires à caloporteur sodium](#), Monographie 7.
- CEA, 2015. [Avancées des recherches sur la séparation-transmutation et le multi-recyclage du plutonium dans les réacteurs à flux de neutrons rapides](#).
- Commission européenne, 2024. [European Industrial Alliance on SMALL MODULAR REACTORS](#) – Strategic Action Plan 2025–2029.
- CRE, 2025. [L'insertion des petits réacteurs modulaires \(SMR/AMR\) dans les systèmes énergétiques](#), Prospective de la CRE.
- Dehont, R., De Temmerman, G., 2022. [Small Modular Reactors \(SMRs\)](#), Rapport Zenon Research, Explainer.
- E-Cube, 2025. [Perspectives de développement des SMR/AMR en France](#), Rapport commandité par la Société Française d'Energie Nucléaire (SFEN).
- EGE, 2025. [Réacteurs à neutrons rapides, une relance stratégique pour une souveraineté énergétique durable](#), Rapport d'alerte.
- Elysee.fr, 2022. [Devenir le leader des industries vertes !](#) Discours du Président de la République à l'occasion de la réunion avec les dirigeants des 50 sites industriels qui émettent le plus de gaz à effet de serre en France.
- Elysee.fr, 2025. [Réunion du 4ème Conseil de politique nucléaire](#).
- EY-Parthenon, 2024. [The true power of small modular reactors on the road to a sustainable energy future – Unveiling key opportunities and challenges](#).
- EY-Parthenon, 2025. [Making investment in the nuclear value chain attractive](#).
- IAEA, 2025a, [International Nuclear Information System \(INIS\)](#).
- IAEA, 2025b, [Power Reactor Information System \(PRIS\)](#), World Statistics (dernière mise à jour le 15/11/25).
- IEA, 2025. [The Path To a New Era for Nuclear Energy](#).
- IRIS, 2025. [L'approvisionnement en uranium naturel : enjeu de la relance nucléaire](#), Observatoire de la sécurité des flux et des matières énergétiques (OSFME).
- Kearney Energy Transition Institute, 2023. [Nuclear small modular reactors \(SMRs\) – Holding disruptive hopes](#).
- L'Usine nouvelle, 2025. [Nucléaire : au WNE, un retour en grâce de l'atome aux airs de ruée vers l'or](#).
- NEA, 2024. [The NEA Small Modular Reactor Dashboard: Second Edition](#).
- Vie-publique.fr, 2022. [Déclaration de M. Emmanuel Macron, président de la République, sur la politique de l'énergie, à Belfort le 10 février 2022](#).
- Yilgor, I., Sellers, Z. D., Hartvigsen, J. L., Sabharwall, P., Sweetland, K. M., 2024. [Heat Pipe Cooled Microreactors](#). Idaho National Laboratory.

A propos de Zenon research

Zenon Research est une association loi 1901 et un think tank indépendant. Ses travaux, fondés sur la science, sont dédiés aux technologies pour un monde bas carbone.

Contactez-nous

 [/zenon-research](#)

 [www.zenon.ngo](#)

 contact@zenon.ngo

Pour plus d'informations sur ce sujet

Jean-Baptiste Dupin

Directeur scientifique
Zenon Research
jbd@zenon.ngo

Zenon Research souhaite remercier les relecteurs externes pour leur contribution inestimable à ce rapport, ainsi que les différentes personnes dont les échanges ont nourri cette étude.

Le contenu de ce rapport représente les opinions de Zenon Research et ne doit pas être considéré comme représentant celles des relecteurs ou des organisations auxquelles ils sont affiliés.

