

## LES PETITS RÉACTEURS MODULAIRES

### 1. LIMINAIRE

Dans le contexte actuel de nécessaire décarbonation de nos activités, l'énergie nucléaire aux côtés des énergies renouvelables, connaît un regain d'intérêt. Elle est stable, pilotable, non émettrice de CO<sub>2</sub>, compétitive par rapport au marché des énergies. Le nucléaire est synonyme pour la France d'une meilleure indépendance énergétique et demeure une des composantes clé de la décarbonation et de l'atteinte de la neutralité carbone en 2050.

Afin d'atteindre cet objectif, le nucléaire français doit innover pour s'adapter aux nouveaux besoins de la décarbonation : il nous faut plus de nucléaire de puissance électrique complété par une nouvelle offre portée par des petits réacteurs nucléaires [Réf. 1].

Avec ce retour en grâce du nucléaire Paris a accueilli, fin 2023 le World Nuclear Exhibition, le salon mondial du nucléaire civil. Une opportunité de pouvoir mesurer les progrès technologiques et le foisonnement des nouvelles « start-up » innovantes.

### 2. LA GRANDE FAMILLE DES « PETITS » RÉACTEURS MODULAIRES

Dans la philosophie du développement durable, c'est le choix effectué par la France de récupérer les 96 % de matière valorisable d'un combustible usé (uranium appauvri et plutonium), pour ne garder comme déchets finaux que les produits de fission et les actinides mineurs qui représentent 4 % de la masse du combustible avant irradiation.

Depuis les années 1950, le principal développement des réacteurs électronucléaires commerciaux a évolué vers des puissances de plus en plus élevées pour satisfaire les besoins des pays industrialisés. Ainsi le parc nucléaire français comporte actuellement 56 réacteurs à eau pressurisée de 2<sup>ème</sup> génération (les REP) avec trois paliers de puissance : 900, 1300 et 1450 MWe. De tels niveaux de puissance ne conviennent pas à tous les pays, en particulier les sites isolés ne nécessitent pas une telle puissance (iles ou villes côtières en milieu désertique par exemple).

Conscient des besoins en énergie et de l'évolution du climat social le gouvernement français a initié en octobre 2021 un ambitieux programme de relance du nucléaire (France 2030) pour accélérer la recherche donc l'innovation. Parmi les objectifs affichés : décarboner notre industrie en réduisant les émissions de gaz à effet de serre de 35 %, faire émerger des réacteurs nucléaires de petite taille, innovants et permettant une meilleure gestion des déchets. Dans le discours de Belfort du 10 février 2022 le chef de l'Etat a dévoilé la nouvelle stratégie énergétique du pays. Parmi les annonces : le prolongement au-delà de 50 ans de la durée de vie des actuels réacteurs, la construction de six réacteurs de puissance (les EPR2) d'ici 2050 et le lancement d'études pour la construction de huit autres, la confirmation d'un budget de 500 millions d'Euros pour le projet EDF Nuward (Nucléaire forWARD) de petits réacteurs modulaires dont un premier prototype est attendu pour 2030, et de 500 millions supplémentaires pour la conception de petits réacteurs innovants portés par de nouveaux entrants : « les start-up » du nucléaire civil.

L'univers de ces petits réacteurs est partagé en trois familles : les **SMR** (Small Modular Reactor), les **AMR** (Advanced Modular Reactor) et les **MMR** (Micro Modular Reactor). Ces réacteurs sont en rupture totale avec la « philosophie » des réacteurs de puissance. L'idée sous-jacente, apparue aux Etats-Unis, est de jouer sur l'effet de série pour abaisser les coûts d'investissement et de construction, plutôt que de viser une économie d'échelle par la taille du réacteur. Ces réacteurs plus simples, dont la puissance s'échelonne entre quelques MWe et 300 MWe, sont fabriqués en usine par modules, faciles à transporter, puis à assembler sur le site de la centrale et éventuellement associés pour atteindre de plus fortes puissances. La sûreté nucléaire devrait être plus simple à mettre en œuvre, souvent de manière passive, s'appuyant sur la convection naturelle.

Les réacteurs SMR et AMR se distinguent par leur technologie et par la structure de leur combustible. La plupart des SMR s'appuient sur les techniques éprouvées, celle des réacteurs de 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> génération (à eau pressurisée REP ou bouillante REB), ces derniers intégrant les retours d'expérience de l'accident nucléaire de

Fukushima au Japon. Les AMR s'apparentent quant à eux à des technologies de la 4<sup>ième</sup> génération : réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium, au plomb ou au gaz, réacteurs à sels fondus, à haute température, à eau supercritique. Les réacteurs MMR (puissance inférieure à 20 MWe) sont des versions miniatures des SMR et des AMR. Facilement transportables, ils visent d'autres usages : remplacement de groupes électrogènes, propulsion marine, propulsion spatiale.

De nombreux projets de développement de SMR et AMR existent de par le monde [Réf.2] [Réf.3]. Fin 2022, l'AIEA (Agence Internationale de l'Energie Atomique) dénombrait pas moins de 80 projets à différents stades de développement depuis l'avant-projet jusqu'à la mise en service. Les pays les plus actifs sont la Russie, les Etats-Unis, le Japon, la Corée du Sud, la Chine, mais également le Canada, le Royaume Uni, l'Afrique du Sud, l'Argentine et la France [Réf. 2].

Ces petits réacteurs doivent satisfaire cinq objectifs :

- sûreté et fiabilité avec une recherche de progrès par rapport aux réacteurs actuels.
- durabilité, les réacteurs doivent être économes des ressources naturelles et minimiser les déchets.
- diminution des interventions sur le réacteur, en particulier les réapprovisionnements du combustible.
- compétitivité économique sur l'ensemble des différents coûts (investissement, exploitation, démantèlement).
- résistance vis-à-vis de la prolifération nucléaire : combustible impropre à un usage militaire.

Nous ne présenterons dans cette fiche documentaire que quelques projets : de SMR (chap. 3), d'AMR (chap. 4) et de MMR (chap. 5).

### 3. LES SMALL MODULAR REACTOR (SMR) [Réf. 4]

De nombreux SMR sont opérationnels, certains depuis plusieurs décennies, et l'on dénombre plus de 50 projets à des niveaux d'avancement très variables.

#### 3.1 LES SMR EMBARQUÉS

Parmi les spécificités de la propulsion navale trois caractéristiques peuvent à elles seules justifier le recours au nucléaire : une puissance installée très importante dans un volume restreint, un rayon d'action très élevé et la capacité à assurer la discrétion de la navigation. Ces trois caractéristiques correspondent à une utilisation pratique : pour les sous-marins (vitesse, invisibilité et rayon d'action), pour les brise-glaces (puissance et rayon d'action).

Suivant les traces des Etats-Unis, dès les années 1950, la France décide de se doter d'un sous-marin à propulsion nucléaire, en 1960 le Groupe de Propulsion Nucléaire (GPN) du CEA se voit confier la mission de réaliser le prototype d'un « moteur atomique ». Avec l'uranium enrichi fourni par les Etats-Unis le CEA construit à Cadarache le PAT (Prototype à Terre) un réacteur à eau pressurisée installé dans un tronçon de coque de sous-marin qui diverge pour la première fois le 14 août 1964. Le réacteur est alors capable de délivrer de la vapeur à une turbine qui, accouplée à un alternateur, produira de l'électricité [Réf. 5].

Avec l'uranium enrichi produit par l'usine d'enrichissement de Pierrelatte la France peut concevoir son propre sous-marin nucléaire et acquérir ainsi une plus grande indépendance stratégique. Le Redoutable, premier SNLE (Sous-marin Nucléaire Lanceur d'Engin), prend la mer le 29 mars 1967 et le premier SNA (Sous-marin Nucléaire d'Attaque) type Rubis, équipés de réacteurs de 48 MWe nécessitant un réapprovisionnement en combustible tous les sept ans, est livré en 1983. Suivront d'autres SNLE (la troisième génération est actuellement à l'étude) et la seconde génération des SNA (classe Suffren) est en service dans la Marine Nationale depuis 2022.

La propulsion nucléaire n'a par contre pas réussi de percée pour la navigation marchande. Les cargos « Savannah (américain) Otto-Hahn (allemand) et Mutsu (japonais) ont tous été désarmés : contraintes économique et sociétale (acceptation par le public).

Aux Etats-Unis, à partir de l'expérience acquise pour la propulsion navale, le premier réacteur électronucléaire civil à eau pressurisée a pu être développé. C'est ce type de réacteur de conception américaine qu'utilise aujourd'hui EDF dans ses centrales.

L'URSS (puis la Russie) tombera dans le « gigantisme » et construira, après 1981, les plus gros sous-marins nucléaires du monde (classe Typhoon) équipés de 2 réacteurs de 190 MWe, et au total environ 250 sous-marins nucléaires. Ce pays se distinguera en construisant (géographie et climat obligeant) les seuls navires civils à propulsion nucléaire : les brise-glaces basés à Mourmansk.

#### 3.2 LES SMR SUR BARGE

L'Akademik Lomonosov est une barge qui porte, depuis 2019, la première centrale nucléaire flottante russe en exploitation, conçue et exploitée par la société nationale pour l'énergie atomique Rosatom. La centrale est équipée

de deux réacteurs KLT-40S d'une puissance de 35 MWe chacun. Ces réacteurs à eau pressurisée sont du même type que les KLT-40 utilisés pour propulser les brise-glaces.

Raccordée, en juillet 2020, au réseau électrique : elle peut alimenter une ville de 100.000 habitants. Cette première réalisation de petits réacteurs modulaires est suivie de près par les clients potentiels : les pays avec des territoires insulaires et les agglomérations littorales isolées.

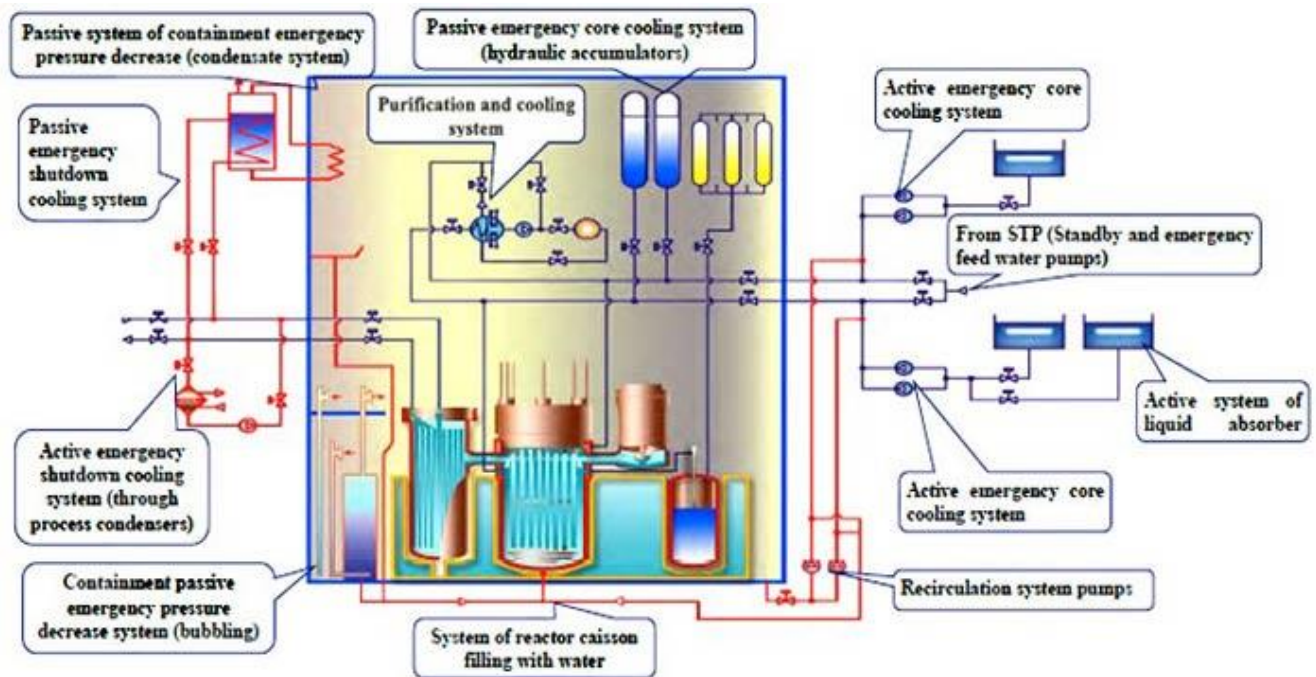


Figure 1 : Schéma de réacteur KLT-40S (source AIEA)



Figure 2 : L'Academic Lomonosov

### 3.3 LE PROJET FRANÇAIS NUWARD [Réf. 1] [Réf. 2] [Réf. 4]

En Europe, plusieurs Etats membres ont manifesté un intérêt pour se doter de SMR. Deux approches différentes sont possibles : celle d'un projet SMR européen, incarné par NuWard, avec une « supply chain » unique, et celle d'un projet avec des « supply chains locales » qui permettraient à un pays de produire sur son territoire les modules d'un SMR qui pourraient, par exemple, être de conception américaine.

Le projet NuWard a été lancé en 2019 par un consortium (EDF- CEA - Naval Group - TechnicAtome) rejoint en 2021 par Framatome et l'entreprise européenne Tractebel Engie. Le projet a dépassé le stade des études préliminaires, en vue de la réalisation effective d'un prototype à l'horizon 2030.

NuWard est une centrale nucléaire de 340 MWe constituée de deux réacteurs de technologie REP de 3<sup>ème</sup> génération immergés dans une piscine commune. Comme tous les SMR le réacteur est conçu pour être compact,



modulaire et fabriqué en série. Il a un haut niveau de sûreté et offre une bonne résistance aux agressions externes (construction semi enterrée).



NuWard est une centrale essentiellement électrogène, sa conception lui permet aussi de fonctionner en cogénération pour produire de la chaleur à une température maximale de 250 °C, utilisation : réseaux de chauffage urbain, production d'hydrogène, dessalement d'eau de mer, capture du CO<sub>2</sub>.

### 3.4 LE PROJET AMÉRICAIN NUSCALE

Le début du renouveau nucléaire américain a été amorcé dans le courant des années 2000 avec la création des start-up : TerraPower (2005), X-Energy (2009) ou encore NuScale (2007). Le projet de cette dernière start-up dérive de la technologie REP, avec pour principale caractéristique l'extraction de l'énergie du cœur par convection naturelle. En 2020, la NRC (Nuclear Regulatory Commission) a approuvé le design qui ouvre le développement aux projets industriels. Le module de base de puissance 60 MWe, est prévu d'être associé à autant de modules que nécessaire jusqu'à 720 MWe. Chaque module est piloté individuellement, mais depuis une seule et même salle de commande pour l'ensemble des modules associés sur le site.

La pression de fonctionnement du module est de 138 bars, la température d'entrée dans le cœur est de 265 °C et en sortie de 321 °C. Ces conditions sont très proches de celles du REP français. La gestion du combustible est réalisée par remplacement d'un tiers de cœur tous les 24 mois. Après refroidissement en piscine (2-4 ans) les combustibles usés seront placés dans des racks d'entreposage à sec.

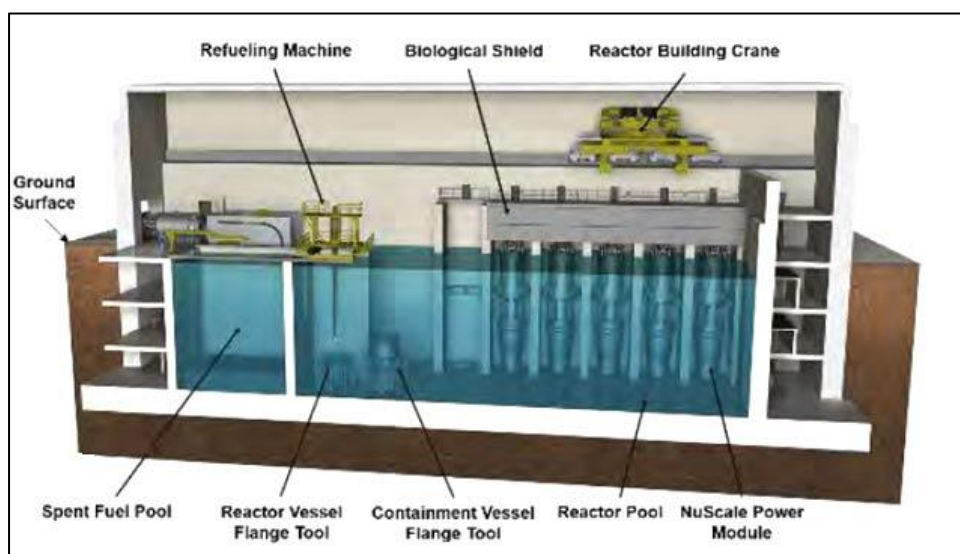


Figure 4 : Vue en coupe du réacteur Nuscale

Mais le 8 novembre 2023 la société NuScale et son premier client, une agence de réseaux électriques municipaux, annonce l'annulation du Carbon Free Power Project (CFPP), premier projet de construction d'une centrale dans l'Idaho.

### 3.5 LE PROGRAMME CHINOIS [Réf. 6]

La Chine maîtrise l'ensemble de la chaîne industrielle de fabrication des différentes parties d'une centrale commerciale. Forte de ces avancées, les autorités ont décidé de s'orienter vers un modèle de réacteur domestique. Le premier réacteur REP d'une puissance de 325 MWe, conçu et réalisé par la China National Nuclear Corporation (CNNC), a été mis en service en 1991 pour assurer une production d'électricité dans les lieux isolés. La Chine développe à ce jour six modèles de SMR et voit dans cette technologie des petits réacteurs une manière d'augmenter ses exportations.

## 4. LES ADVANCED MODULAR REACTOR (AMR)

Parmi les systèmes nucléaires de 4<sup>ème</sup> génération susceptibles d'être déployés dans la seconde moitié du siècle le Forum International « Génération IV », qui regroupe 12 des grandes puissances du nucléaire civil (Argentine, Brésil, Canada, France, Japon, Corée de Sud, Afrique du Sud, Royaume-Uni, États-Unis, Suisse, Chine et Russie), a retenu six filières [Réf.7] pour résoudre les problèmes liés à la pénurie d'énergie fossile et au réchauffement climatique : les réacteurs à neutrons rapides refroidi au gaz (GFR), les réacteurs à neutrons rapides refroidi au sodium (SFR), les réacteurs à neutrons rapide refroidi au plomb (LFR), les réacteurs à sels fondus (MSR), les réacteurs à eau à pression supercritique (SCWR) et les réacteurs à gaz à haute température (VHTR).

### 4.1 LES PROJETS FRANÇAIS [Réf. 1]

Le CEA, qui a joué un rôle décisif dans la naissance de la filière nucléaire française, est l'organisme de recherche technologique, naturellement désigné pour appuyer et accompagner les nouveaux acteurs du nucléaire civil. En mars 2022, le gouvernement a lancé l'appel à projets « Réacteurs nucléaires innovants » de France 2030 qui a suscité 15 candidatures. Au 01/01/2024, 8 projets ont été labellisés et vont recevoir une aide financière [Réf. 10]. Il s'agit de : Naarea neutrons rapides à sels fondus (MSR), Newcleo neutrons rapides refroidi au plomb (LFR), Jimmy Energy haute température (VHTR), Renaissance fusion (fusion avec stellarator), Calogena production de chaleur pour chauffage urbain, Blue Capsule haute température refroidi par sodium, Hexana et Otrera neutrons rapides refroidi par sodium (SFR). A titre d'illustration, les projets de deux starts-up essaimées du CEA sont présentés ci-dessous.

#### 4.1 a) Hexana : Réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium (SFR)

Les AMR à neutrons rapides exploitent une technologie déjà mature. Ils permettent de fournir de la chaleur jusqu'à environ 600 °C, et de l'électricité. Plusieurs réacteurs à neutrons rapides ont déjà été construits dans le monde, trois par la France dont deux pour la production d'électricité : le site de Marcoule a accueilli Phénix le réacteur prototype industriel de cette filière électronucléaire, qui a cessé son fonctionnement en 2009, et la centrale EDF de Creys Malville a accueilli le réacteur tête de série Superphénix de 1240 MWe, arrêté en 1997 après quelques incidents (fuites de sodium), sans conséquence pour la sûreté et principalement des oppositions politiques française et européenne.

Le projet Hexana propose un système constitué de deux réacteurs de 150 MWe, alimentant une unité de stockage thermique via des réservoirs de sels fondus. Ces réservoirs permettent de fournir à la demande, soit de la chaleur, soit de l'électricité. Les réacteurs utilisent de l'uranium appauvri et les combustibles usés des REP. La première mise en service, précédée par la construction d'un prototype, est envisagée à l'horizon 2035.

#### 4.1 b) Stellaria : Réacteur RNR à sels fondus chlorures (MSR)

Les AMR à sels fondus sont des concepts de réacteurs à neutrons thermiques ou rapides, imaginés dans les années 1960. Des verrous sont encore à lever sur les matériaux (corrosion par les sels) et sur le cycle du combustible associé. Ils permettent d'obtenir de la chaleur, jusqu'à environ 600 °C, et de l'électricité.

Le réacteur d'une puissance prévue de 110 MWe (250 MWth) fonctionne sur le principe de « breed and burn » c'est à dire qu'il génère autant de matière fissile que celle qui est consommée [Réf. 8].

### 4.2 LE PROJET DE L'INSTITUT JAPONAIS DE L'AGENCE ATOMIQUE DE L'ENERGIE (JAEA)

C'est un réacteur à haute température, une technologie robuste et simple qui permet d'atteindre des températures très hautes (850 °C). Le réacteur de démonstration japonais met en œuvre des technologies peu développées : haute température, combustibles à particules dispersées, refroidi à l'hélium, utilisant le graphite comme modérateur.

Trois avantages pour ce réacteur : la haute température de fonctionnement qui permet d'augmenter très sensiblement le rendement théorique du cycle thermodynamique (le cycle de Carnot), la stabilité de l'hélium sous irradiation qui prévient la formation d'hydrogène en cas de perte de refroidissement et le graphite qui peut supporter des températures très élevées (> 2500 °C).

La puissance du réacteur est de 30 MWth, il peut fonctionner 660 jours à pleine puissance entre deux rechargements. Le combustible, avec une importante innovation pour ce type de réacteur, est constitué de pastilles sphériques d'oxyde d'uranium, chacune contenue dans une coque en graphite (combustible TRISO [Réf. 2]).



Figure 5 : Réacteur HTTR au JAEA

#### 4.3 LES PROJETS CHINOIS

L'université Tsinghua à Pékin (Chine) travaille depuis de longues années sur le projet d'un réacteur VHTR, d'une puissance de 2,5 MWe, utilisant le combustible dispersé dit à « lit de boulets ». Le succès de la version prototype de ce réacteur a permis d'envisager une version industrielle d'une puissance de 200 MWe.

Fin 2023 un article de la revue « Révolution énergétique » [Réf. 9] fait écho à l'agence officielle Chine Nouvelle annonçant la mise en service, dans la centrale de Shidao Bay, d'un second réacteur modulaire avancé (AMR).

#### 4.4 LES PROJETS AMÉRICAINS

Framatome Inc (Etats-Unis) et General Atomics Electro-Magnetic Systems ont présenté l'avant-projet sommaire d'un réacteur haute température, refroidi à l'hélium et utilisant le graphite comme modérateur. A vocation industrielle (génération d'hydrogène, désalinisation) ce réacteur d'une puissance de 272 MWe utilisera, comme son frère Japonais, le combustible Triso.

### 5. LES MICRO MODULAR REACTOR (MMR)

Les MMR sont des versions miniatures des SMR et des AMR, facilement transportables et de puissance inférieure à 20 MWe. Jusqu'à la newsletter du 9 janvier 2024 de la revue Transitions et Energies les prototypes prévus étaient sans vocation industrielle immédiate.

En janvier 2024 la société Westinghouse a annoncé qu'elle va mettre sur le marché son microréacteur révolutionnaire eVinci capable de produire quelques MWe de chaleur ou d'électricité (figure page suivante [Réf. 11])





## 6. CONCLUSION

Après plusieurs décennies difficiles le nucléaire civil redémarre presque partout dans le monde. L'industrie nucléaire, suivant l'exemple du New Nuclear américain, connaît aujourd'hui une période de forte émulation, marquée par les espoirs de succès des petits réacteurs modulaires et l'émergence de « start-up » innovantes.

Avec les petits réacteurs modulables le secteur nucléaire passe d'une industrie de construction sur site à une industrie manufacturière qui devra fabriquer en usine et en série des petits modules. L'appellation « petits réacteurs » recouvre des technologies, des usages et des niveaux de puissance très différents (puissance maximale d'environ 300 MWe) : du réacteur transportable (applications civiles et militaires) à la centrale nucléaire de taille moyenne (d'une dizaine à quelques centaines de mégawatts), en passant par la production de chaleur, la production d'hydrogène ou la propulsion navale.

Pour réussir la phase commerciale il reste, comme pour les réacteurs de grande puissance, à franchir l'étape de la certification en faisant la démonstration que la sûreté et la résistance à la prolifération répondent aux exigences des autorités de sécurité (ASN, IRSN, AIEA). Cette étape est capitale pour la compréhension et l'acceptation par le grand public.

L'ouverture du marché de ces petits réacteurs aux pays émergents dépourvus de culture de sûreté et de sécurité soulève par ailleurs des problèmes d'éthique (connaissance en matière de maîtrise des risques de prolifération, capacité de gestion des déchets et des matières nucléaires, compétence et formation à la technologie nucléaire,...) que les états impliqués devront prendre en compte, tant du côté des fournisseurs que des clients, avec éventuellement l'assistance de l'AIEA.

## 7. RÉFÉRENCES

[Ref.1] La Revue du CEA n° 1 juin 2023 : les nouveaux horizons du nucléaire.

[Réf.2] [https://www.uarga.org/nucleaire/reacteur\\_SMR.php](https://www.uarga.org/nucleaire/reacteur_SMR.php)

[Réf. 3] Nouveaux réacteurs nucléaires : les acquis du passé pour comprendre le futur  
Conférence SFEN Essonne 21/12/2023 Dominique Grenèche

[Réf. 4] Les petits réacteurs nucléaires (SMR) : [article GAENA n° 53](#) de P. Michaille du 28/12/2018

[Réf. 5] [Fiche argumentaire GAENA n° 43](#) : la propulsion nucléaire

[Réf. 6] [Le nucléaire civil en Chine](#), par Mathilde Teissonnière

[Réf. 7] [Fiche argumentaire GAENA n° 22](#) : Génération IV

[Réf. 8] Article de Dominique Grenèche dans La Revue de l'Energie n° 668 - septembre – octobre 2023

[Réf. 9] <https://www.revolution-energetique.com/nucleaire-voici-le-reacteur-a-lit-de-boulets-une-technologie-hyper-prometteuse/>

[Réf.10] RGN hiver 2023 édité par la Sfen

[Réf.11] [Westinghouse : le micro-réacteur eVinci](#)