



Observatoire
de la sécurité des flux
et des matières énergétiques

Rapport

LES PETITS RÉACTEURS MODULAIRES (SMR) : LES STRATÉGIES DES PUISSANCES NUCLÉAIRES

Juillet 2024





Observatoire
de la sécurité des flux
et des matières énergétiques

L'Observatoire de la sécurité des flux et des matières énergétiques est coordonné par l'IRIS, en consortium avec Enerdata et Cassini, dans le cadre d'un contrat avec la Direction générale des relations internationales et de la stratégie (DGRIS) du ministère des Armées. Il consiste à analyser les stratégies énergétiques de trois acteurs déterminants : la Chine, les États-Unis et la Russie.

Le consortium vise également à proposer une vision géopolitique des enjeux énergétiques, en lien avec les enjeux de défense et de sécurité ; croiser les approches : géopolitique, économique et sectorielle ; s'appuyer sur la complémentarité des outils : analyse qualitative, données économiques et énergétiques, cartographie interactive ; réunir différents réseaux : académique, expertise, public, privé.

www.iris-france.org

© Observatoire de la sécurité des flux et des matières énergétiques - Tous droits réservés

Le ministère des Armées fait régulièrement appel à des études externalisées auprès d'instituts de recherche privés, selon une approche géographique ou sectorielle venant compléter son expertise externe. Ces relations contractuelles s'inscrivent dans le développement de la démarche prospective de défense, qui, comme le souligne le dernier Livre blanc sur la défense et la sécurité nationale, *« soit pouvoir s'appuyer sur une réflexion stratégique indépendante, pluridisciplinaire, originale, intégrant la recherche universitaire comme des instituts spécialisés »*.

Une grande partie de ces études sont rendues publiques et mises à disposition sur le site du ministère des Armées. Dans le cas d'une étude publiée de manière parcellaire, la Direction générale des relations internationales et de la stratégie peut être contactée pour plus d'informations.

AVERTISSEMENT : Les propos énoncés dans les études et observatoires ne sauraient engager la responsabilité de la Direction générale des relations internationales et de la stratégie ou de l'organisme pilote de l'étude, pas plus qu'ils ne reflètent une prise de position officielle du ministère des Armées.

À PROPOS DE L'AUTEUR DU RAPPORT



Frédéric Jeannin / Chercheur, IRIS

Chercheur au sein du Programme Climat, Énergie et Sécurité à l'IRIS. Il s'est spécialisé sur les enjeux géopolitiques autour des nouvelles technologies de la transition bas-carbone et les chaînes de valeurs des matières premières.

Avec la collaboration de **Maëlys Tanguy** et **Gaspard Krug**, respectivement assistante et assistant de recherche à l'IRIS.

RESPONSABLE SCIENTIFIQUE ET COORDINATEUR



Emmanuel Hache / Directeur de recherche, IRIS

Directeur de recherche à l'IRIS et responsable scientifique de l'Observatoire de la sécurité des flux et des matières énergétiques. Il s'est spécialisé sur les questions relatives à la prospective énergétique et à l'économie des ressources naturelles.



Sami Ramdani / Chercheur, IRIS

Chercheur au sein du Programme Climat, Énergie et Sécurité à l'IRIS et coordinateur de l'Observatoire de la sécurité des flux et des matières énergétiques. Il s'est spécialisé sur la géopolitique de l'énergie et des matières premières.

CARTOGRAPHES



David Amsellem / Directeur, Cassini

Docteur en géopolitique et directeur du cabinet CASSINI. Il est spécialisé sur les questions d'aménagement, de transport public et de gestion des ressources énergétiques, en particulier au Proche et au Moyen-Orient.



Esther Bourgeois / Analyste et cartographe, Cassini

Consultante et cartographe au sein du cabinet Cassini. Elle a travaillé dans le domaine de la Défense (IRSEM, CISM) ainsi que dans l'humanitaire (ONG), avant de prendre en charge le pôle cartographie au sein de Cassini.

REMERCIEMENTS

Remerciements à Lassina Zerbo, ancien Premier ministre du Burkina Faso, pour avoir accordé un entretien à l'auteur dans le cadre de ce rapport.



TABLE DES MATIÈRES

Introduction	5
FONDAMENTAUX	6
1. Définition	7
2. Usages des SMR.....	8
3. Quelles technologies pour 2030 ?	10
4. Une faisabilité encore incertaine ?.....	12
5. Un détournement des usages civils ?	16
6. Conclusion	17
ÉTATS-UNIS	20
1. Une finalité aussi bien stratégique que commerciale	21
2. Une coopération public-privé pour concurrencer les réacteurs de forte puissance	24
3. Quelles perspectives après l'échec du Carbon Free Project de Nuscale ?	26
4. Les avancées sur le plan militaire	29
5. Conclusion	31
FÉDÉRATION DE RUSSIE	33
1. La reconversion du savoir-faire russe	34
2. Une technologie au service du développement du Grand Nord	37
3. Des projets d'exportation axés sur les pays en développement	39
4. La dualité russe sur les SMR	40
5. Conclusion	42
RÉPUBLIQUE POPULAIRE DE CHINE	43
1. Une réponse polyvalente aux enjeux intérieurs et extérieurs	44
2. Quelles perspectives d'exportation ?	46
3. Un enjeu en mer de chine méridionale ?	47
4. Existe-t-il une convergence stratégique entre la Chine et les BRICS+ sur les SMR ?	48
5. Conclusion	50
UNION EUROPÉENNE	53
1. Quelles réflexions politiques pour les SMR en Europe ?	54
2. Va-t-on vers une massification industrielle et normative pour un SMR européen ?	57
3. Existe-t-il une pensée duale autour des SMR en Europe ?	59
4. Conclusion	59
Conclusion générale.....	61
ANNEXES	62

Introduction

La maîtrise de l'énergie nucléaire est sans conteste **un vecteur d'influence sur la scène internationale**. En exportant ses technologies nucléaires, un État fournisseur ne propose pas qu'un produit, mais toute une série de normes, de standards et de services associés qui vont **sceller une coopération, voir une dépendance énergétique et diplomatique sur plusieurs décennies**¹. Ce faisant, **plus un pays est présent sur le marché de l'atome et plus son influence est grande** sur la gouvernance nucléaire mondialisée².

Depuis le début des années 2000, **les petits réacteurs modulaires, ou « Small Modular Reactor » (SMR)**, se sont progressivement imposés dans les réflexions stratégiques et l'espace médiatique³. Forts de leur **conception simple, mobile et modulaire**, ces réacteurs de faible puissance ouvriraient la porte à **une énergie nucléaire plus abordable et multiusage**, depuis les territoires les plus isolés, jusqu'aux villes les plus peuplées et au cœur des industries les plus énergivores⁴.

Malgré des incertitudes persistantes sur leur rentabilité économique, certains États se mobilisent pour s'imposer sur ce marché naissant où maîtrise technologique et influence géopolitique se confondent. Car les **SMR pourraient ouvrir la porte à un nouveau champ d'influence auprès d'États qui jusqu'ici n'étaient pas en mesure de se nucléariser**^{5 ; 6}.

Ils deviendraient un moyen d'**élargir la sphère d'influence industrielle, commerciale et diplomatique des pays exportateurs, parmi lesquelles : les États-Unis, la Russie et la Chine**. En parallèle, **l'Union européenne (UE)** cherche à rattraper ce retard sur ce segment appelé à devenir stratégique pour sa transition écologique et sa recherche d'autonomie⁷.

¹ Les premiers jours de la guerre en Ukraine ont notamment révélé la dépendance de l'Union européenne aux importations de combustible nucléaire russe répondant aux standards imposés des centrales VVER. Sont concernés la Bulgarie, la Tchéquie, la Finlande, la Hongrie et la Slovaquie.

² Teva Meyer, *Géopolitique du Nucléaire : pouvoir et puissance d'une industrie duale* (Cavalier Bleu, Paris : 2023).

³ Daniel T. Ingersoll et Mario D. Carelli, *Handbook Of Small Modular Nuclear Reactors* (Woodhead Publishing, Cambridge : 2021).

⁴ IAEA, *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments* (AIEA, Vienne : 2020).

⁵ Sébastien Abis, « Chine, Puissance Normative », *IRIS*, 10 juin 2020, <https://www.iris-france.org/147704-chine-puissance-normative/>.

⁶ Teva Meyer, *Géopolitique du Nucléaire : pouvoir et puissance d'une industrie duale* (Cavalier Bleu, Paris : 2023).

⁷ *ibid.*



FONDAMENTAUX

1. Définition

Selon l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), un SMR est un réacteur à fission nucléaire, fabriqué en usine, d'une puissance inférieure ou égale à 300 MWe^{8; 9}, de conception modulaire et mobile¹⁰.

Cette définition est régulièrement amendée dans la littérature scientifique en raison de son périmètre jugé trop large, englobant une pluralité de technologies dont la maturité et les implications stratégiques ne sont pas forcément comparables¹¹. Pour autant, elle permet de ressortir **quatre critères** qui distinguent les SMR des autres dispositifs nucléaires :

- **Une puissance n'excédant pas 300 MWe** : Une portée limitée qui doit permettre de réduire les contraintes techniques et l'emprise au sol, en vue d'adopter un design simplifié, mobile et à moindre coût, sans avoir à adapter le réseau électrique¹².
- **Un design modulaire et standardisé** : Un SMR doit être appréhendé comme un assemblage de sous-modules standardisés, pouvant être répliqué en série pour réaliser des économies d'échelle¹³.
- **Un dispositif intégré** : Afin de simplifier et accélérer son déploiement, un module SMR doit intégrer l'ensemble des composants nécessaires à la production contrôlée d'énergie pour l'activation d'une turbine ou l'entretien d'un réseau de chaleur (voir annexe 03)¹⁴.
- **Une sécurité intrinsèque** : leur puissance limitée et leur design standardisé doivent réduire de manière inhérente les risques d'accident ou limiter la portée des retombés. C'est une caractéristique essentielle pour faciliter l'engagement des acteurs et simplifier les réglementations^{15; 16; 17}.

⁸ Le mégawatt électrique (MWe) correspond à la puissance électrique produite et distribué sur le réseau électrique.

⁹ Connaissance des énergies, « Nucléaire : quelle est la différence entre puissance brute et puissance nette ? », <https://www.connaissancedesenergies.org/questions-et-reponses-energies/nucleaire-quelle-est-la-difference-entre-puissance-brute-et-puissance-nette> (page consultée le 16 juin 2024)

¹⁰ IAEA, *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments* (AIEA, Vienne: 2020).

¹¹ Michel Derdevet et Nicolas Mazzucchi, « Les petits réacteurs modulaires, une nouvelle ère nucléaire ? Approche géopolitique et stratégique », *La Revue de l'Energie* 657 (juillet-août 2021) : 45-57.

¹² NEA, *The NEA Small Modular Reactor Dashboard* (OECD - Nuclear Energy Agency, Paris : 2023).

¹³ World Nuclear Association, « Small Nuclear Power Reactors », 16 février 2024, <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>.

¹⁴ Daniel T. Ingersoll et Mario D. Carelli, *Handbook Of Small Modular Nuclear Reactors* (Woodhead Publishing, Cambridge : 2021).

¹⁵ Emmanuelle Galichet, « Réacteurs nucléaires "SMR" : de quoi s'agit-il ? Sont-ils moins risqués ? », *The Conversation*, 2 décembre 2021, <https://theconversation.com/reacteurs-nucleaires-smr-de-quoi-sagit-il-sont-ils-moins-risques-172089>.

¹⁶ Charles Merlin, « Les petits réacteurs modulaires dans le monde : perspectives géopolitiques, technologiques, industrielles et énergétiques », IFRI, mai 2019. https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/merlin_petits_reacteurs_2019.pdf

¹⁷ Daniel T. Ingersoll et Mario D. Carelli, *Handbook Of Small Modular Nuclear Reactors* (Woodhead Publishing, Cambridge : 2021).

- **La multimodularité** : La multimodularité est la capacité de mutualiser plusieurs SMR pour pallier leur faible puissance unitaire et concurrencer les réacteurs thermiques conventionnels (En France, la puissance moyenne d'un réacteur nucléaire varie entre 900 et 1450 We)¹⁸. Cette option est fréquemment exposée comme une contrainte nécessaire qui devrait être intégrée dans la définition d'un SMR¹⁹. Pour autant, son utilité reste optionnelle et largement dépendante de l'usage escompté²⁰.

D'autres appellations, comme les **micros-réacteurs modulaires (MMR)**, ou les **eXtra Small Modular Reactor (xSMR)**, sont employées pour désigner des générateurs modulaires de moins de 10 MWe. Si ces sous-catégories peuvent faire sens au regard des usages et des contraintes techniques propres à ces réacteurs de très faible puissance, **ils restent assimilables à des SMR** suivant la définition de l'AIEA^{21; 22; 23}.

Pour autant, il est important de relever que la révolution promise des SMR, ne tient pas dans la taille, ni dans la mobilité, qui est techniquement acquise depuis les années 1950, mais dans leurs conceptions modulaires et standardisées²⁴. Cette **mobilité est par ailleurs à nuancer**, car si certains SMR peuvent techniquement être déployés en seulement quelques jours, les contraintes logistiques, réglementaires et sécuritaires peuvent étendre ce délai de plusieurs mois à une année entière (AIEA 2022).

2. Usages des SMR

- **Répondre aux besoins des pays émergents** :

L'investissement en capital étant plus faible et la puissance modulable, les SMR permettraient à des États incapables de soutenir l'implantation d'une centrale de forte puissance, de se **nucléariser à la hauteur de leur capacité de financement et de la taille de leur réseau électrique**. En 2020, le coût total unitaire d'un SMR de 114 MW s'estimait autour des 300 millions de

¹⁸ Connaissance des énergies, « Parc nucléaire français », <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/parc-nucleaire-francais> (page consultée le 14 juin 2024)

¹⁹ Charles Merlin, « Les petits réacteurs modulaires dans le monde : perspectives géopolitiques, technologiques, industrielles et énergétiques », IFRI, mai 2019.

²⁰ Daniel T. Ingersoll et Mario D. Carelli, Handbook Of Small Modular Nuclear Reactors (Woodhead Publishing, Cambridge : 2021).

²¹ IAEA, *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments* (AIEA, Vienne : 2020).

²² Daniel T. Ingersoll et Mario D. Carelli, Handbook Of Small Modular Nuclear Reactors (Woodhead Publishing, Cambridge : 2021).

²³ Académie des Sciences, *Les réacteurs nucléaires modulaires de faible puissance (SMR): état des lieux et perspectives* (Institut de France, Paris : 2022).

²⁴ Paul Reuss, *L'épopée de l'Énergie Nucléaire : une histoire scientifique et industrielle* (Edp Sciences, Les Ulis : 2007).

dollars, contre 5,5 milliards de dollars en moyenne pour un réacteur à eau pressurisé de 1 144 MW²⁵, ce qui reviendrait à un effet d'échelle de 40% à capacité installée similaire. Une solution théoriquement plus abordable pour renforcer leur sécurité énergétique et accroître l'attractivité des industries locales, tout en important un savoir-faire technologique jusqu'ici inaccessible^{26; 27}

- **La cogénération**

La capacité des SMR à **produire de la chaleur localement**, permettrait d'alimenter des réseaux urbains et des industries, sans déperdition ni surcoûts liés au réseau de transport de chaleur²⁸. Il serait techniquement possible d'obtenir des **températures suffisamment élevées**, pour désaliniser de l'eau de mer et produire de l'hydrogène, des carburants de synthèse ou de l'ammoniac, même si la rentabilité économique reste dépendante des rendements possibles (voir annexe 01)²⁹.

- **L'autonomisation des territoires isolés**

Grâce à leur design mobile, des SMR pourraient fournir de l'énergie **dans des territoires isolés, non raccordés aux réseaux électriques**, tout en réduisant des importations coûteuses en combustibles fossiles. Ainsi, un réacteur rendrait économiquement viable **l'extraction de ressources naturelles** jusqu'ici inaccessibles, faciliterait le maintien d'**infrastructures critiques** reculées, et sortirait **de l'isolement des populations** éloignées des pouvoirs centraux^{30; 31; 32}.

- **La décarbonation des économies**

La **pluralité d'usages** des SMR rendrait possible la **décarbonation d'industries électro-intensives**, à partir d'une production locale d'électricité, de chaleur ou d'hydrogène bas

²⁵ NUCNET, « Generation IV/ economic Modelling Compares Costs of SMR To Conventional PWR », <https://www.nucnet.org/news/economic-modelling-compares-costs-of-smr-to-conventional-pwr-10-4-2020> (page consulté le 14 juin 2024)

²⁶ Daniel T. Ingersoll et Mario D. Carelli, Handbook Of Small Modular Nuclear Reactors (Woodhead Publishing, Cambridge : 2021).

²⁷ Ioannis N. Kessides et Vladimir Kuznetsov, « Small Modular Reactors For Enhancing Energy Security In Developing Countries », *Sustainability* 4, n° 8 (août 2012) : 1806-32, <https://doi.org/10.3390/su4081806>.

²⁸ L'utilisation de la chaleur nucléaire à des fins commerciales a été envisagée dès les années 1950, mais les coûts de transport de la chaleur, la faiblesse des taux de charges en zone urbaine et les températures insuffisantes pour l'industrie des réacteurs à eau légère ont limité la pratique (Csik et Kupitz 1997).

²⁹ NEA et OECD, « Small Modular Reactors », 2021, https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2021-10/small_modular_reactors_cop26_flyer.pdf

³⁰ Daniel T. Ingersoll et Mario D. Carelli, Handbook Of Small Modular Nuclear Reactors (Woodhead Publishing, Cambridge : 2021).

³¹ Joanne Liou, « What Are Small Modular Reactors (SMRs) ? », IAEA, 13 septembre 2023 <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs>.

³² World Nuclear News, « Canadian Partnership For Microreactor Deployment : New Nuclear », 20 mars 2024, <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Canadian-partnership-for-microreactor-deployment>.

carbone. Ils permettraient de **compenser l’intermittence** des énergies renouvelables, et de sortir des territoires de leurs **dépendances à des sources d’énergie fossile**^{33 ; 34 ; 35 ; 36}.

3. Quelles technologies pour 2030 ?

Selon la Nuclear Energy Agency (NEA) six critères permettent d’évaluer l’avancement des différents projets de SMR.

Tableau 1 : Critères d’évaluation de l’avancement des projets SMR par le NEA

Critères	Evaluation					
	Embryonnaire	Très faible	Faible	Intermédiaire	Avancé	Très avancé
Homologation	Absence d'information	Pré-homologation	Dépôt de demande	Validation du concept	Permis de construire délivré	Licence d'exploitation accordé
Implantation	Absence d'information	Accord non contraignant	Préselection de la technologie en vue d'une implantation	Sélection de la technologie avant implantation	Autorisation du déploiement	Début des travaux d'implantation
Financement	Absence d'information	Au moins un annoncement	Minimum cinq annoncements ou 100 millions USD	Minimum dix annoncement ou 500 millions USD	"First of a kind" financé	"First of a kind" financé et financement engagé pour "New of a Kind"
Chaîne d'approvisionnement	Absence d'information	Annonce non contraignante	Contrats contraignants pour la fourniture de services et de matériaux	Existence de partenariats de consortium ou de joint venture entre des entreprises	Construction d'un First of a kind, en cours ou terminé	Construction en cours d'un New of a kind
Engagement des parties prenantes	Absence d'information	Minium un engagement	Minimum trois engagements	Minimum cinq engagements	Minimum sept engagements	Minimum dix engagements
Combustible	Absence d'information	Accords non contraignants et études avec les laboratoires nationaux	Accords avec la chaîne d'approvisionnement en combustible	Fabrication de combustible en cours, ou design reposant sur des concept préétablis	Contrat existant pour fourniture du combustible pour un First of a kind	Chargement du combustible débuté

Source : (NEA 2023)³⁷

Partant des projets recensés par la NEA et l’AIEA, à la lumière des niveaux d’aptitude technologique (TRL³⁸) recensés par la littérature scientifique (voir tableau 2) et de l’évaluation du NEA^{39; 40; 41}, il est possible de retenir deux typologies de réacteurs suffisamment matures

³³ Committee of Advisors on Science and Technology, *Federal Energy Research and Development for the Challenges of the Twenty-First Century* (Energy Research and Development Panel, Washington : 1997).

³⁴ Rebecca Smith-Kevern, *Small Modular Licensing Technical Support Program Update for Nuclear Energy Advisory Committee Nuclear Energy Advisory Committee* (US DoE, Washington : 2012).

³⁵ George David Banks, *SMR Deployment Faces Challenges despite National Interest* (CSIS, Washington : 2013).

³⁶ Andrew Griffith, « Could The Nation’s Coal Plant Sites Help Drive A Clean Energy Transition ? », *Office of Nuclear Energy*, 13 septembre 2022, <https://www.energy.gov/ne/articles/could-nations-coal-plant-sites-help-drive-clean-energy-transition>.

³⁷ NEA, *The NEA Small Modular Reactor Dashboard* (OECD Nuclear Energy Agency, Washington : 2023).

³⁸ Technology Readiness Level

³⁹ IAEA, *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments* (AIEA, Vienne : 2020).

⁴⁰ Mujammil Asdhiyoga Rahmanta et al., « Nuclear Power Plant To Support Indonesia’s Net Zero Emissions : A Case Study Of Small Modular Reactor Technology Selection Using Technology Readiness Level And Levelized Cost Of Electricity Comparing Method », *Energies* 16, n° 9 (avril 2023) : 37-52, <https://doi.org/10.3390/en16093752>.

⁴¹ NEA, *The NEA Small Modular Reactor Dashboard* (OECD Nuclear Energy Agency, Washington : 2023).

pour raisonnablement être déployés d'ici la fin de la décennie : **Les SMR à eau légère, pressurisée et bouillante (PWR⁴² ou BWR⁴³) et les réacteurs à haute température refroidis au gaz (HTGR⁴⁴).**

Cette primauté des SMR à eau légère s'explique par leur technologie éprouvée et une réglementation préétablie, étant donné que 86 % des réacteurs de forte puissance en activité sont à eau légère⁴⁵. Pour les HTGR, leur potentiel industriel⁴⁶ a motivé de nombreux programmes de recherche depuis les années 1950, aussi bien en Occident, qu'en Asie ou en Afrique du Sud. Ce faisant, la technologie est déjà connue et la connaissance dispersée à travers les pays nucléarisés⁴⁷.

Parmi les pays leaders sur ces projets, on retrouve : **les États-Unis, la Russie et la Chine**, mais aussi l'Argentine, la Corée du Sud et le Japon, qui disposent de projets avancés, voire déjà opérationnels.

D'autres SMR, reposant sur des technologies plus innovantes de 4^e génération, existent à des degrés de développement divers (voir annexe 17). Pour autant, leurs maturités technologiques, leurs homologations ou leurs chaînes d'approvisionnements sont encore trop sommaires pour des applications stratégiques ou commerciales d'ici 2035 ^{48; 49; 50}.

En Europe, **la France, le Danemark, la République tchèque, la Pologne, l'Italie, la Suède, la Suisse et le Royaume-Uni ont des projets déclarés auprès de l'OCDE ou de l'AIEA, mais tous enregistrent des retards notables**, que ce soit en termes d'homologation, d'implantation, ou de financement, avec une maturité technologique bien inférieure aux modèles proposés dans les pays leaders^{51; 52; 53}.

⁴² Pressurized water reactor

⁴³ Boiling water reactor

⁴⁴ High Temperature Gas Cooled Reactor

⁴⁵ IAEA, « In Operation & Suspended Operation Reactors », s. d., <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByType.aspx>

⁴⁶ En raison de l'absence de gaines autour du combustible, les HTGR peuvent opérer à des températures, dépassant les 750°C en sortie, contre moins de 300°C pour les PWR. Une chaleur qui pourrait servir à produire de l'hydrogène ou des carburants de synthèse

⁴⁷ Dominique Grenèche, *Histoire et Techniques des Réacteurs Nucléaires et Leurs Combustibles*, (EDP Science, Les Ulis : 2016).

⁴⁸ IAEA, *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments* (AIEA, Vienne : 2020).

⁴⁹ Mujammil Asdhiyoga Rahmanta et al., « Nuclear Power Plant To Support Indonesia's Net Zero Emissions : A Case Study Of Small Modular Reactor Technology Selection Using Technology Readiness Level And Levelized Cost Of Electricity Comparing Method », *Energies* 16, no 9 (avril 2023) : 37-52, <https://doi.org/10.3390/en16093752>.

⁵⁰ NEA, *The NEA Small Modular Reactor Dashboard* (OECD Nuclear Energy Agency, Washington : 2023).

⁵¹ IAEA, *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments* (AIEA, Vienne : 2020).

⁵² Mujammil Asdhiyoga Rahmanta et al., « Nuclear Power Plant To Support Indonesia's Net Zero Emissions : A Case Study Of Small Modular Reactor Technology Selection Using Technology Readiness Level And Levelized Cost Of Electricity Comparing Method », *Energies* 16, no 9 (avril 2023) : 37-52, <https://doi.org/10.3390/en16093752>.

⁵³ NEA, *The NEA Small Modular Reactor Dashboard* (OECD Nuclear Energy Agency, Washington : 2023).

Tableau 2 : Projets de SMR parmi les plus avancés aux États-Unis, en Russie et en Chine en fonction de leur maturité technologique (TRL)

Design	Type	Designer	Pays	Niveau de maturité technologique (TRL)/9
HTR-PM	HTGR	INET, Tsinghua University	Chine	8
KLT-40S	PWR	JSC Afrikantov	Fédération de Russie	8
VBER-300	PWR	JSC Afrikantov	Fédération de Russie	6
VOYGR	PWR	NuScale Power Corporation	USA	5
BWRX-300	BWR	GE-Hitachi	USA et Japon	4
SHELF-M	PWR	NIKIET	Fédération de Russie	4
ACP100	PWR	CNNC/NPIC	Chine	3
ACP100S	PWR	CNNC/NPIC	Chine	3
VK-300	BWR	NIKIET	Fédération de Russie	3

Source : (AIEA 2022)⁵⁴; (NEA 2023)⁵⁵; (Rahmanta, et al. 2023)⁵⁶

4. Une faisabilité encore incertaine ?

- **Une rentabilité économique encore incertaine**

Si l'objectif des SMR est de réduire le coût unitaire des réacteurs, ils **restent encore trop élevés** et les frais d'opération sont encore difficiles à évaluer, en particulier dans des zones isolées où le coût du travail et les contraintes logistiques sont bien plus importantes⁵⁷. Par ailleurs, les projections des constructeurs **ne prendraient pas suffisamment en considération la gestion des déchets, le coût du combustible ou les phases de démantèlement**, auxquels aucun projet nucléaire ne peut déroger^{58; 59}. Selon les acteurs de la filière, ces incertitudes peuvent être **contrebalancées par les effets d'apprentissage, une standardisation des**

⁵⁴ IAEA, *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments* (AIEA, Vienne : 2020).

⁵⁵ NEA, *The NEA Small Modular Reactor Dashboard* (OECD Nuclear Energy Agency, Washington : 2023).

⁵⁶ Mujammil Asdhiyoga Rahmanta et al., « Nuclear Power Plant To Support Indonesia's Net Zero Emissions : A Case Study Of Small Modular Reactor Technology Selection Using Technology Readiness Level And Levelized Cost Of Electricity Comparing Method », *Energies* 16, no 9 (avril 2023) : 37-52, <https://doi.org/10.3390/en16093752>.

⁵⁷ Nicolle Butcher, Chris Ciaravino et Stephen Healey, *Economic and finance working group SMR roadmap* (EFGW, Ottawa : 2019).

⁵⁸ Björn Steigerwald et al., « Uncertainties In Estimating Production Costs Of Future Nuclear Technologies : A Model-based Analysis Of Small Modular Reactors », *Energy* 281 (octobre 2023), <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128204>.

⁵⁹ World Nuclear News, « SMRs Economically Feasible In Puerto Rico, Study Finds : Nuclear Policies », 8 février 2024, <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/SMRs-economically-feasible-in-Puerto-Rico,-study-f>.

composants et la simplification des processus. Toutefois, rien ne garantit encore qu'ils parviendront à apporter la souplesse d'exécution nécessaire pour devenir rentable^{60; 61; 62}.

- **Un cadre juridique inadapté et fragmenté**

Bien que la plupart des SMR reposent sur des technologies éprouvées, **leurs designs singuliers et hétérogènes s'intègrent difficilement dans les réglementations** calquées sur les réacteurs conventionnels⁶³. Certaines applications promises ne seraient tout simplement pas anticipées, tandis que certaines règles s'avèreraient superflues et délétères à leur rentabilité⁶⁴. Une situation d'autant plus complexe à appréhender au regard des **multitudes de configurations possibles pour les SMR** (fixe, mobile, terrestre, maritime, aérien, spatial, civil ou militaire)⁶⁵.

Ce manque de cohérence s'explique en partie par **l'incapacité de certains régulateurs à s'adapter** en raison d'une approche prescriptive de la réglementation, n'anticipant pas en amont les avancées technologiques^{66; 67}. À cette problématique s'ajoute **un manque d'harmonisation internationale**, qui sera autant d'entraves aux futures exportations^{68 ;69}.

- **Une chaîne industrielle limitée en capacité**

Cette banalisation annoncée de l'usage du nucléaire questionne également la capacité de l'industrie à mettre en œuvre ces transformations face au recul drastique du nombre d'entreprises en mesure de répondre aux besoins de la filière. Entre 2013 et 2019, **le nombre d'entreprises certifiées ISO 19443⁷⁰, « qualité nucléaire », aurait diminué de 32 %^{71; 72}**. Un déclin qui serait en partie responsable de la **présence récurrente de contrefaçons dans les**

⁶⁰ Connaissance Des Énergies, « SMR : Petits Réacteurs Nucléaires Modulaires », 21 mai 2024, <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-nucleaire-smr-petits-reacteurs-modulaires>.

⁶¹ M.D. Carelli et al., « Economic Features Of Integral, Modular, Small-to-medium Size Reactors », *Progress In Nuclear Energy* 52, n° 4 (mai 2010) : 403-14, <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2009.09.003>.

⁶² Nicolle Butcher, Chris Ciaravino et Stephen Healey, *Economic and finance working group SMR roadmap* (EFWG, Ottawa : 2019).

⁶³ Alexandra von Kalleveen, *Applicability of the international nuclear legal framework to small modular reactors (SMRs)* (Joint Research Center, Luxembourg : 2022).

⁶⁴ Ibid.

⁶⁵ Ibid.

⁶⁶ Ibid.

⁶⁷ Sam Rohunsingh et al., « Licensing Small Modular Reactors : A State-of-the-art Review Of The Challenges And Barriers », *Progress In Nuclear Energy* 164 (octobre 2023) : 1048-59, <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.104859>.

⁶⁸ Ibid.

⁶⁹ Ibid.

⁷⁰ La certification ISO 19443 fait référence aux exigences imposées aux acteurs de l'industrie nucléaire pour répondre aux contraintes de sûretés nucléaires.

⁷¹ Oliver Martin et Matheus Abbt, *Current Challenges of the European Nuclear Supply Chain* (JRC Science for Policy Report, Bruxelles : 2020).

⁷² World Nuclear News, « Panellists Address SMR Supply Chain Challenges : New Nuclear », 25 septembre 2020, <https://world-nuclear-news.org/Articles/Panellists-address-SMR-supply-chain-challenges>.

installations en Europe et aux États-Unis^{73; 74; 75}. Dans ce contexte, **le lancement d'une production en série semble prématuré**⁷⁶.

- **L'acceptation sociale et politique**

L'acceptabilité sociale et politique est **probablement le principal frein au déploiement des SMR**. Car le nucléaire reste une industrie chargée d'un imaginaire polarisant⁷⁷ et un **marqueur politique**, justifiant à lui seul l'union ou la division de courant politique^{78; 79}. Cette question peut s'avérer d'autant plus critique pour les SMR, dont le principe repose sur **une implantation à proximité des villes et des sites industriels**. Une contrainte qui peut aisément faire émerger des mouvements de protestation locaux, calqués sur le modèle **NIMBY**⁸⁰, susceptible d'en faire un argument électoral⁸¹. Dès lors, le développement d'un cadre réglementaire ou l'attribution de financements deviennent autant de champs de bataille freinant le développement de la filière⁸².

- **Les risques en pleine crise écologique**

Si les SMR sont promus dans la lutte contre le dérèglement climatique, ils n'en sont pas moins **vulnérables aux événements météorologiques** extrêmes. Comme pour toute infrastructure, ces phénomènes peuvent **altérer l'intégrité des structures ou entraver des opérations critiques** (voir annexe 08). Les épisodes de canicule en particulier affectent le fonctionnement des systèmes de refroidissement des centrales, par l'effet combiné du manque d'eau à des

⁷³ AIEA, *Managing Counterfeit and Fraudulent Items in the Nuclear Industry* (AIEA, Vienne : 2019).

⁷⁴ Nuclear Regulatory Commission, « NRC OIG Releases Two Reports On Findings Regarding Counterfeit, Fraudulent, And Suspect Items In U.S. Nuclear Power Plants », 10 février 2022, <https://nrc.oig.oversight.gov/news/nrc-oig-releases-two-reports-findings-regarding-counterfeit-fraudulent-and-suspect-items-us-0>.

⁷⁵ Autorité de Sûreté Nucléaire, « Contrefaçons, Falsifications et Suspensions de Fraude : Le Collège de L'ASN Auditionne EDF », 27 février 2024, <https://www.asn.fr/l-asn-informe/actualites/contrefacons-falsifications-et-suspensions-de-fraude-le-college-de-l-asn-auditionne-edf>.

⁷⁶ World Nuclear News, « Panellists Address SMR Supply Chain Challenges : New Nuclear », 25 septembre 2020, <https://world-nuclear-news.org/Articles/Panellists-address-SMR-supply-chain-challenges>.

⁷⁷ Ange, Pottin, *Le nucléaire imaginé (La découverte, 2024)*

⁷⁸ Marie Pouzadoux, « Comment le nucléaire s'impose dans la campagne présidentielle de 2022 », *Le Monde*, 18 novembre 2021, https://www.lemonde.fr/economie/article/2021/11/18/le-nucleaire-s-impose-dans-la-campagne-presidentielle_6102535_3234.html.

⁷⁹ Spencer R. Weart, « La controverse nucléaire et ses origines », *AIEA Bulletin* n°3, 1991.

⁸⁰ NIMBY, ou « Not In My Backyard », est un phénomène désignant le refus individuel d'une l'installation d'intérêt général, car susceptible d'altérer l'environnement direct de l'individu. Ce phénomène peut aller vers une cristallisation des contestations contre le projet visé au sein d'un mouvement politique constitué capable de porter ces contestations à un niveau national, voir transnational.

⁸¹ Connaissance des Énergies, « Qu'est-ce Que Le Syndrome NIMBY ? », Connaissance des Énergies, 25 octobre 2017, <https://www.connaissancedesenergies.org/questions-et-reponses-energies/quest-ce-que-le-syndrome-nimby>.

⁸² Académie des Sciences, *Les réacteurs nucléaires modulaires de faible puissance (SMR): état des lieux et perspectives* (Institut de France, Paris : 2022).

températures trop élevées et chargée d'impuretés⁸³ ; ⁸⁴. De même, la hausse des taux d'humidités sur certaines périodes et dans certaines régions risque d'accroître les **problèmes de corrosion** et les besoins en matériaux nécessaires au maintien et à l'adaptation des infrastructures⁸⁵.

En seulement 30 ans, **ces événements, jusqu'ici ponctuels, se sont généralisés** et pèsent sur le fonctionnement des installations nucléaires. Alors qu'en 1990 un réacteur devait être arrêté 0,2 fois par an en moyenne pour des raisons climatiques, **c'est désormais 1,4 fois par an qu'un réacteur doit être mis à l'arrêt**⁸⁶. En France, les conditions climatiques de l'année 2020 ont été responsables d'une baisse de production équivalant à 1 800 heures⁸⁷ d'indisponibilité totale du parc nucléaire, contre 1 360 heures en 2018 et 80 heures en 2015⁸⁸ ; ⁸⁹.

Selon le bureau de la responsabilité gouvernementale des États-Unis et l'agence de sûreté nucléaire française, cette vulnérabilité n'est pas pleinement intégrée par l'ensemble des acteurs de la filière. Ils soulignent notamment un **manque d'anticipation et une primauté des retours d'expérience** face à des événements pourtant inédits⁹⁰ ; ⁹¹. Par ailleurs, de nouveaux mécanismes **de coordination et d'arbitrage** vont être nécessaires pour **concilier sécurité, énergie et durabilité**, notamment face à de prévisibles **conflits d'usage sur les ressources en eau et en matériaux** ⁹² ; ⁹³.

⁸³ Le réchauffement des cours d'eau ou des eaux côtières s'accompagne d'une prolifération de méduses, d'algues et de micro-organismes, potentiellement pathogènes par ailleurs, qui peuvent saturer les réseaux de pompage ou de refroidissement.

⁸⁴ Vitaly Fedchenko, « Small Modular Reactors May Have Climate Benefits, But They Can Also Be Climate-vulnerable », *SIPRI*, 26 janvier 2024, <https://www.sipri.org/commentary/blog/2024/holding-page-vitalys-blog-smrs-and-climate-vulnerability>.

⁸⁵ Techniques de l'ingénieur, « La corrosop, : un défi pour une société durable », <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/methodes-de-prevention-et-lutte-contre-la-corrosion-42374210/la-corrosion-un-defi-pour-une-societe-durable-cor2000/> (page consultée le 16 juin 2024)

⁸⁶ Ali Ahmad, « Increase In Frequency Of Nuclear Power Outages Due To Changing Climate », *Nature Energy* 6, n° 7 (juillet 2021) : 755-62, <https://doi.org/10.1038/s41560-021-00849-y>.

⁸⁷ Au total, l'année 2020 a connu une perte équivalente à 3 102 GWh de production, du jamais vu depuis le record de 2003 évalué à 6 318 GWh.

⁸⁸ Cour des comptes, « L'adaptation au changement climatique du parc de réacteurs nucléaires » (Mars 2023)

⁸⁹ Statista, « Estimation de l'indisponibilité des centrales nucléaires pour raisons météorologiques et climatiques en France entre 2015 et 2020 », <https://fr.statista.com/statistiques/1386702/impact-climat-meteo-sur-production-nucleaire-france/> (page consultée le 16 mars 2024)

⁹⁰ U.S. GAO. « Nuclear Power Plants : NRC Should Take Actions To Fully Consider The Potential Effects Of Climate Change », 2 avril 2024. <https://www.gao.gov/products/gao-24-106326>.

⁹¹ Les Echos, « Nucléaire : L'ASN Demande à EDF d'Anticiper les prochaines sécheresses », 17 avril 2023, <https://www.lesechos.fr/industrie-services/energie-environnement/nucleaire-lasn-demande-a-edf-d-anticiper-les-prochaines-secheresses-1935616>.

⁹² Vitaly Fedchenko, « Small Modular Reactors May Have Climate Benefits, But They Can Also Be Climate-vulnerable », *SIPRI*, 26 janvier 2024, <https://www.sipri.org/commentary/blog/2024/holding-page-vitalys-blog-smrs-and-climate-vulnerability>.

⁹³ Christine Lavarde, « Pour une Approche Systémique de L'adaptation des Centrales Nucléaires Au Changement Climatique », Sénat Rapport d'information n° 442, 21 mars 2023, https://www.senat.fr/rap/r22-442/r22-442_mono.html.

5. Un détournement des usages civils ?

- **Un risque de prolifération ?**

L'émergence d'une technologie nucléaire aussi accessible et flexible que les SMR, suscite la **crainte d'une dispersion de technologies et de matériaux sensibles pouvant rentrer dans la conception d'une bombe atomique** ^{94; 95 ; 96}. L'une des principales inquiétudes réside dans la mobilité des SMR et l'impact qu'elle peut avoir sur la transparence des installations et la traçabilité des matières fissiles, notamment dans des localisations isolées^{97; 98}. Une autre préoccupation tient dans **l'usage banalisé de combustible plus enrichi, entre 5 et 20 % (HALEU)**⁹⁹, contre 3 à 5 % (LEU) pour des réacteurs conventionnels, qui diviserait par trois les ressources nécessaires pour obtenir de l'uranium militaire à plus de 90% (HEU)¹⁰⁰.

Sans être négligeables, ces risques doivent cependant être nuancés. Dans les faits **un réacteur seul ne suffit pas à produire une bombe**, et peut même s'avérer dispensable selon la voie choisie (voir annexe 09)¹⁰¹. C'est d'autant plus vrai pour les SMR, dont **les caractéristiques techniques validées par l'AIEA, les rendraient inopérants** pour la conception d'une arme¹⁰². Le volume de matière fissible employé étant par ailleurs **largement insuffisant pour parvenir à une production significative** de plutonium militaire¹⁰³. D'autre part, la conversion de HALEU en HEU **reste tributaire de l'existence de moyens d'enrichissement domestiques**^{104 ; 105}. Les

⁹⁴ Ce fut le cas de l'Inde qui a conçu sa première bombe atomique à partir d'un réacteur CIRUS canadien, vendu sans réel contrôle, en dépit de la non-adhésion de l'Inde au traité de non-prolifération (Meyer, Géopolitique du Nucléaire 2023)

⁹⁵ Académie des Sciences, *Les réacteurs nucléaires modulaires de faible puissance (SMR): état des lieux et perspectives* (Institut de France, Paris : 2022).

⁹⁶ Travis Carless, « Estimating the Nuclear Fuel Cycle Trade-offs and Proliferation Risks Associated with the Export of HTR-PM SMRs », *Stanton Nuclear Security Fellows Seminar*, 2018.

⁹⁷ IAEA, *Options to Enhance Proliferation Resistance of Innovative Small and Medium Sized Reactors* (IAEA, Vienne : 2014).

⁹⁸ Nicole Virgili, *The Impact of Small Modular Reactors on Nuclear Non-Proliferation and IAEA Safeguards* (Vienna Center for Disarmament and non-Proliferation, Vienne : 2020).

⁹⁹ C'est notamment le cas sur les réacteurs HTGR à haute température.

¹⁰⁰ Shikha Prasad, Ahmed Abdulla, M. Granger Morgan, et Inés Lima Azevedo. « Nonproliferation Improvements And Challenges Presented By Small Modular Reactors ». *Progress In Nuclear Energy* 80 (2015) : 102-9. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.11.023>.

¹⁰¹ CFR Education From The Council On Foreign Relations. « How Do Countries Create Nuclear Weapons ? », 27 juillet 2023. <https://education.cfr.org/learn/reading/how-do-countries-create-nuclear-weapons>.

¹⁰² Par design, les SMR en développement imposeraient notamment aux opérateurs un cycle de combustion long, verrouillé et contrôlé à distance par l'AIE, pour empêcher la récupération de Plutonium-239 dans le combustible irradié.

¹⁰³ Dans un réacteur conventionnel à eau légère, la part du plutonium-239 est inférieure à 1% du combustible usé, les volumes réduits de combustible employé dans un SMR rendraient mécaniquement improbable une production à large échelle.

¹⁰⁴ Travis Carless, « Estimating the Nuclear Fuel Cycle Trade-offs and Proliferation Risks Associated with the Export of HTR-PM SMRs », *Stanton Nuclear Security Fellows Seminar*, 2018.

¹⁰⁵ DOE-NE, *Environmental Impact Statement for Department of Energy Activities in Support of Commercial Production of High-Assay Low-Enriched Uranium (HALEU)* (DoE, Washington : 2024).

SMR seraient donc une source de détournement peu attractive, dont les principales failles sont d'ores et déjà prises en considération par l'AIEA et les régulateurs nationaux^{106; 107 ; 108}.

- **Les usages militaires possibles**

Sur les théâtres d'opérations, l'accès à l'énergie **dépend essentiellement de réseaux civils parfois précaires ou de voies d'approvisionnement vulnérables**. Or, les SMR donneraient aux forces armées **un accès fiable et pilotable en toutes circonstances**, à de l'électricité, du carburant et de l'eau potable, avec un recours minimal à des sources extérieures¹⁰⁹. Un bénéfice opérationnel, mais aussi financier pour les armées, qui connaissent une hausse croissante de leurs besoins en énergie^{110; 111}.

Cependant, cet accès simplifié à l'énergie **ouvre la porte à une militarisation de territoires difficiles d'accès sur des lignes de frictions entre potentiels belligérants**. Ce qui pose bien entendu la question de la gestion du combustible, du maintien en conformité des installations et de l'atténuation des retombés en cas d'accident. Car aussi sûrs que puissent être les designs futurs, les infrastructures énergétiques **restent des cibles prioritaires** sur des terrains d'opération qui pourraient, de facto, **sortir du contrôle des instances de régulation normalement habilitées**¹¹². Une succession de défis, qui peuvent faire douter les armées du bénéfice opérationnel des SMR, et les détourner de cette option par ailleurs coûteuse en moyens logistiques, humains et financiers.

6. Conclusion

- Un SMR est un réacteur nucléaire de moins de 300 MWe dont la conception simplifiée, intégrée et modulaire rend possible l'utilisation de l'énergie nucléaire pour des

¹⁰⁶ Chirayu Batra, Lara Peguero, Yaolei Zou, Sarah Bouchet, Hadid Subki et Stefano Monti, « Considerations for proliferation resistance and physical protection of small modular reactors », Proceedings of the INMM & ESARDA Joint Virtual Annual Meeting, 2021. <https://resources.inmm.org/sites/default/files/2021-09/a1704.pdf>

¹⁰⁷ IAEA, *Options to Enhance Proliferation Resistance of Innovative Small and Medium Sized Reactors* (IAEA, Vienne : 2014).

¹⁰⁸ Nicole Virgili, *The Impact of Small Modular Reactors on Nuclear Non-Proliferation and IAEA Safeguards* (Vienna Center for Disarmament and non-Proiferation, Vienne : 2020).

¹⁰⁹ Lukas Trakimavičius, « Is small really beautiful? The future role of small modular nuclear reactors (SMRs) in the military », NATO Energy Security Centre Of Excellence, 2020, <https://web.archive.org/web/20220731034722/https://www.enseccoe.org/data/public/uploads/2020/11/02.-solo-article-lukas-smr-eh-15-web-version-final.pdf>.

¹¹⁰ Ibid.

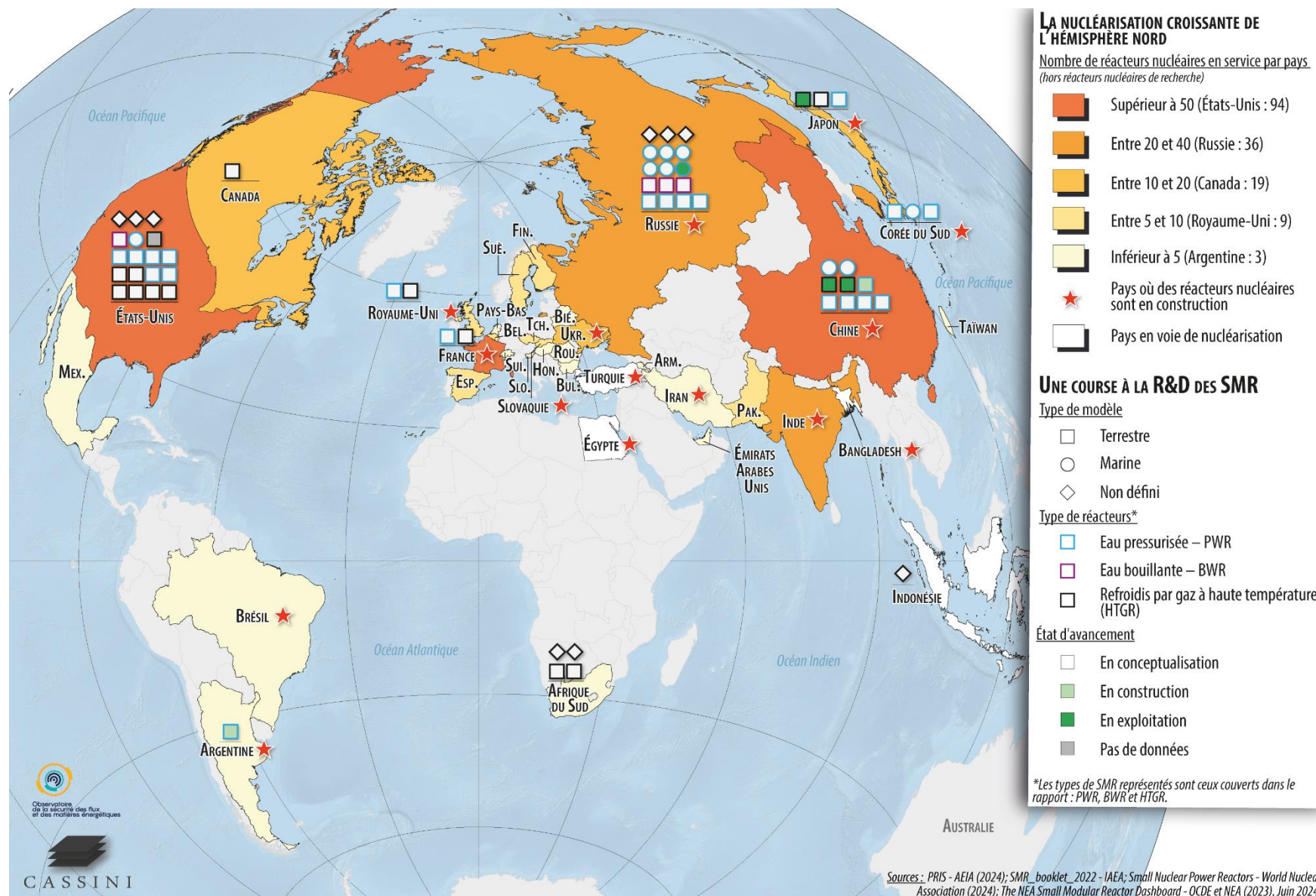
¹¹¹ Richard Andres et Hanna Breetz, « Small Nuclear Reactors for Military Installations : Capabilities, Costs, and Technological Implications », INSS, 2011.

¹¹² Ibid.

applications plus diverses dans des pays et des territoires jusqu'ici en dehors du marché nucléaire.

- Les États-Unis, la Fédération de Russie et la République Populaire de Chine sont les pays les plus avancés dans le développement des SMR. Plusieurs pays de l'Union européenne développent des SMR, mais tous enregistrent un retard notable comparé aux concurrents états-uniens, russes et chinois.
- Selon l'AIEA, les SMR sont par conception « résistants à la prolifération », le volume de matière fissible et le taux de combustion imposé étant impropres à la production de plutonium de qualité militaire.
- Le potentiel militaire des SMR ouvre la porte à une militarisation de territoire jusqu'ici éloigné des zones d'intervention et à de nouveaux leviers d'influence pour les pays exportateurs, auprès d'État jusqu'ici incapable de se nucléariser.
- Malgré les opportunités, l'avenir des SMR reste incertain, en raison d'une rentabilité qui encore à démontrer et des défis réglementaire et industriels, auquel s'ajoute l'acceptation sociale et politique.

Carte 1 – Les petits réacteurs modulaires (SMR) : l'émergence d'un outil stratégique du nucléaire civil





ÉTATS-UNIS

Historiquement leader et force motrice de l'industrie nucléaire internationale, les États-Unis font désormais face à la concurrence russe et dans une moindre mesure chinoise pour exporter leurs technologies nucléaires. Depuis les accidents de Three Mile Island, Tchernobyl et Fukushima, les entreprises états-uniennes ont progressivement vu leurs marges de manœuvre se détériorer avec l'érosion du soutien public, la libéralisation du marché intérieur et l'accumulation des règles de non-prolifération. Prenant conscience de cette **perte de capacité et d'influence**, les États-Unis s'engagent depuis 2017 dans une stratégie de revitalisation dont les **SMR sont un angle saillant** ¹¹³.

1. Une finalité aussi bien stratégique que commerciale

L'intérêt des États-Unis pour les réacteurs nucléaires innovants remonte à un rapport du **Comité pour la science et la technologie (CST)**¹¹⁴ de 1997. À cette époque, le groupe d'experts dresse les contours d'un XXI^e siècle marqué par une demande accrue en énergie, malgré une inévitable **transition énergétique** et des **chaines d'approvisionnement toujours plus vulnérables**. Un constat qui ne laisse pas d'autre choix, selon le CST, que d'investir dans des technologies plus **locales, flexibles et modulaires**¹¹⁵. Une recommandation qui donnera naissance en 2000 à l'**Initiative de recherche sur l'énergie nucléaire** et à un premier prototype de « **Petit réacteur nucléaire à eau légère et à applications multiples** » ¹¹⁶, plus connu depuis 2007 sous le nom de **Nuscale**¹¹⁷.

Si la communication du Département de l'Énergie (DoE) est principalement axée sur les bénéfices **économiques et écologiques** des SMR, la motivation est en réalité bien plus **stratégique**. Car, pour les institutions états-uniennes, les difficultés de la filière n'ont pas seulement entamé la compétitivité des États-Unis, elles ont surtout érodé **l'influence des États-Unis sur la politique nucléaire internationale**, au profit d'entreprises d'État russes et chinoises¹¹⁸.

¹¹³ Philippe Copinschi, Pierre Laboué et Teva Meyer, *Les stratégies nucléaires civiles de la Chine, des États-Unis et de la Russie* (Observatoire de la sécurité des flux et des matières énergétiques, Paris : 2020).

¹¹⁴ National Science and Technology Council : un conseil d'experts indépendant rattaché à la Maison-Blanche, chargé de formuler des recommandations auprès du Président des États-Unis (The White House 2024)

¹¹⁵ Committee of Advisors on Science and Technology, *Federal Energy Research and Development for the Challenges of the Twenty-First Century* (Energy Research and Development Panel, Washington : 1997).

¹¹⁶ Multi-Application Small Light Water Reactor (MASLWR), un projet sur trois ans regroupant le laboratoire national d'Idaho, l'université d'État de l'Oregon et le consultant Nexant, sous financement du DoE.

¹¹⁷ Paul Menser, « The Story Behind America's First Potential Small Modular Reactor », *Office of Nuclear Energy*, 13 décembre 2018, <https://www.energy.gov/ne/articles/story-behind-americas-first-potential-small-modular-reactor>.

¹¹⁸ George David Banks, *SMR Deployment Faces Challenges despite National Interest* (CSIS, Washington : 2013).

La réhabilitation des capacités états-uniennes est donc avant tout un enjeu géopolitique, justifiant la mise en place **d'une politique « agressive »**, dont les SMR font partie intégrante¹¹⁹,¹²⁰,¹²¹,¹²². **Une priorité partagée** aussi bien par le parti républicain que démocrate¹²³.

L'accord 123 – Une garantie sécuritaire et un outil d'influence des États-Unis

L'accord 123 est une clause de **la loi de 1958 sur l'énergie atomique**, qui impose à tout pays se dotant de technologie nucléaire états-unienne de respecter **les principes de non-prolifération promus par les États-Unis**. Il engage les États signataires à suivre les garanties de l'AIEA, à renoncer aux usages militaires et à tout transfert de technologie ou de matière nucléaire sans l'accord préalable des États-Unis. Les activités d'enrichissement ou de retraitement sont aussi conditionnées, voir totalement prohibées en vertu d'une clause additionnelle, dit « **Gold Standard** »¹²⁴. En cas de violation, les États-Unis sont en droit de retirer unilatéralement l'ensemble des matériaux et technologies transférés¹²⁵ ; ¹²⁶.

En 2024, **21 pays, ainsi qu'Euratom et l'AIEA, étaient signataires d'un accord 123**. Même si ces conditions peuvent être interprétées comme un frein commercial, elles restent **une garantie de sécurité et d'influence** des États-Unis sur l'industrie nucléaire internationale. À ce titre, l'expansion des industries russe et chinoise au détriment de leurs propres entreprises et des engagements 123 est tout naturellement perçue comme **un risque sécuritaire**¹²⁷.

¹¹⁹ Andrew Griffith, « Could The Nation's Coal Plant Sites Help Drive A Clean Energy Transition ? », *Office of Nuclear Energy*, 13 septembre 2022, <https://www.energy.gov/ne/articles/could-nations-coal-plant-sites-help-drive-clean-energy-transition>.

¹²⁰ Zongyuan Zoe Liu, « Renewing America's Leadership In The Global Civil Nuclear Energy Market », *Council On Foreign Relations*, 22 juin 2022, <https://www.cfr.org/blog/renewing-americas-leadership-global-civil-nuclear-energy-market>.

¹²¹ DoE, « Restoring Alerica's competitive nuclear energy advantage », 2020. https://www.energy.gov/sites/default/files/2020/04/f74/Restoring%20America%27s%20Competitive%20Nuclear%20Advantage_1.pdf

¹²² Philippe Copinschi, Pierre Laboué et Teva Meyer, *Les stratégies nucléaires civiles de la Chine, des États-Unis et de la Russie* (Observatoire de la sécurité des flux et des matières énergétiques, Paris : 2020).

¹²³ Nucleation Capital. « States Are Lifting Bans On Nuclear », 11 décembre 2023. <https://nucleationcapital.com/states-are-lifting-bans-on-nuclear/#:~:text=According%20to%20the%20National%20Conference,Illinois%2C%20West%20Virginia%2C%20Connecticut%2C>.

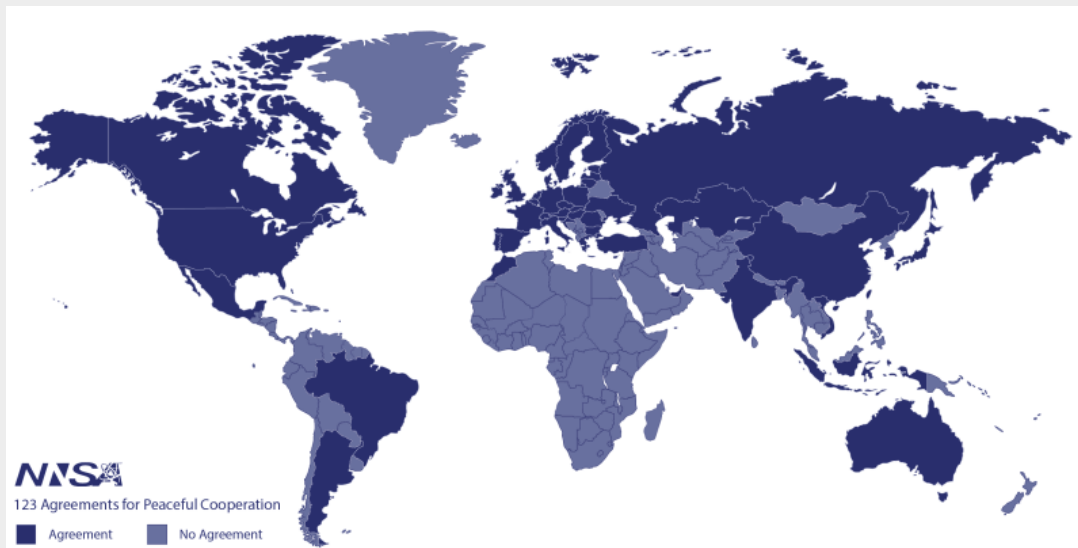
¹²⁴ OCDE/AEN, « Article 123 de la Loi sur l'énergie atomique de 1954 », *Bulletin de droit nucléaire*, vol. 2008/2, 2009, https://doi.org/10.1787/nuclear_law-2008-5k9gvsflf1.

¹²⁵ La concordance de l'État adhérent avec l'accord 123 est étudiée en amont par le département d'État et l'accord soumis au vote du congrès. Seul le président des États-Unis, avec l'accord du Congrès, peut amender ces dispositions, si leurs applications représentent un danger aux objectifs de non-prolifération ou à la défense des États-Unis.

¹²⁶ Daryl Kimball, « The U.S. Atomic Energy Act Section 123 At A Glance | Arms Control Association », mai 2023, <https://www.armscontrol.org/factsheets/AEASection123>.

¹²⁷ NNSA, « 123 Agreements For Peaceful Cooperation », 20 février 2024, <https://www.energy.gov/nnsa/123-agreements-peaceful-cooperation#:~:text=Section%20123%20of%20the%20U.S.,equipment%20from%20the%20United%20States>.

Carte 2 – Pays signataires d'un accord 123 avec les États-Unis



Source : (NNSA 2024)

Pour l'administration Trump, les SMR s'intègrent dans la logique de **domination énergétique** portée par les républicains depuis 2017 : le développement d'une **surenchère énergétique**, en vue d'exercer une **concurrence agressive sur les marchés** et **asphyxier les capacités de pays détournant leurs exportations à des fins politiques**^{128; 129; 130}. Pour Joe Biden, si l'appellation « **coopération pour la lutte contre les dérèglements climatiques** » est privilégiée à celle de domination, la finalité reste de **concurrencer** les technologies russes et chinoises et **d'intégrer les pays acquérant dans un cadre normatif** plaçant les États-Unis en **arbitre incontournable**^{131; 132; 133}.

¹²⁸ Nabil Wakim, « Les États-Unis Veulent Dominer la Planète Pétrole », *Le Monde*, 15 juillet 2022, https://www.lemonde.fr/economie/article/2018/03/16/les-etats-unis-veulent-dominer-la-planete-petrole_5271978_3234.html.

¹²⁹ Farid Guliyev, « Trump's "America First" Energy Policy, Contingency And The Reconfiguration Of The Global Energy Order », *Energy Policy* 140 (mai 2020) : 111435, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111435>.

¹³⁰ The Oxford Institute for Energy Studies, « What's next for US's Energy policy? », *Forum*, novembre 2017, <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2018/01/OEF-111.pdf>.

¹³¹ The White House. « Executive Order On Promoting Small Modular Reactors For National Defense And Space Exploration », 12 janvier 2021. <https://trumpwhitehouse.archives.gov/presidential-actions/executive-order-promoting-small-modular-reactors-national-defense-space-exploration/>.

¹³² United States Department Of State. « Civil Nuclear And Clean Energy Initiatives », 9 novembre 2023. <https://www.state.gov/civil-nuclear-and-clean-energy-initiatives/>.

¹³³ Friedbert Pflüger, « A paradigm shift under President Joe Biden: From "energy dominance" towards climate cooperation », *Atlantic Council*, 10 février 2021, <https://www.atlanticcouncil.org/blogs/energysource/a-paradigm-shift-under-president-joe-biden-from-energy-dominance-towards-climate-cooperation/>.

2. Une coopération public-privé pour concurrencer les réacteurs de forte puissance

Le lancement d'une nouvelle technologie, à fortiori aussi coûteuse et réglementée que les SMR, peut s'avérer insurmontable pour des entreprises privées. Pour lever cette barrière, les États-Unis se sont engagés dans un **Partenariat Public-Privé (PPP)** à mettre à disposition des entreprises privées les ressources de l'État, tout en élaborant un cadre fiscal et réglementaire répondant à leurs besoins^{134 ; 135 ; 136}.

Le premier pan de cette stratégie est **la Passerelle pour l'accélération de l'innovation nucléaire (GAIN)**¹³⁷, rassemblant **le DoE-NE**¹³⁸ et **le régulateur de l'énergie nucléaire des États-Unis (NRC)**¹³⁹. Fondée en 2015, elle est destinée à mettre à disposition les ressources, les compétences et les informations de plus de 370 installations et 80 institutions publiques¹⁴⁰ à toute entreprise opérant sur le territoire national¹⁴¹, selon une logique de « vouchers » d'une valeur de 50 000 à 500 000 dollars, financé à 80 % par le DoE¹⁴² (voir annexe 04)^{143 ; 144}.

Sous l'administration Trump, trois décisions sont venues renforcer la coopération entre les sphères privées et publiques. La première, **la loi sur les capacités d'innovation dans le domaine de l'énergie nucléaire (NEICA - 2017)**¹⁴⁵ est venue faciliter le transfert de technologie, partager les coûts d'homologation et renforcer les effectifs du GAIN avec un **Centre National d'Innovation pour les Réacteurs (NRIC)**¹⁴⁶. La deuxième, **la loi sur**

¹³⁴ SMR Start, « Policy Statement on U.S. Public-Private Partnerships for Small Modular Reactors », février 2017, <http://smrstart.org/wp-content/uploads/2017/02/SMR-Start-Public-Policy-on-Federal-Public-Private-Partnership.pdf>.

¹³⁵ Lorman, « A Brief History Of Public Private Partnerships », 19 juillet 2018, <https://www.lorman.com/resources/a-brief-history-of-public-private-partnerships-16968>.

¹³⁶ Michael Goff, « Nuclear Energy: Public-Private Partnerships », Office of Nuclear Energy, 2 juin 2022, <https://science.osti.gov/-/media/fes/pdf/fes-presentations/2022/Goff-Aligning-Public-and-Private-Sectors.pdf>.

¹³⁷ Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear

¹³⁸ Bureau de l'énergie nucléaire du Département de l'Énergie

¹³⁹ GAIN, « What Is GAIN ? - Gateway For Accelerated Innovation In Nuclear », 6 juin 2024, <https://gain.inl.gov/about/what-is-gain/>.

¹⁴⁰ GAIN intègre l'Idaho National Laboratory (INL), Orak Ridge National Laboratory (ORNL) et Argonne National Laboratory (ANL)

¹⁴¹ L'entreprise doit être basée aux États-Unis, à 51% sous citoyenneté états-unienne ou résident permanent et doit répondre des lois d'au moins un des Etat des États-Unis

¹⁴² Entre 2016 et la fin d'année fiscale 2023, 52 organisations ont pu bénéficier de ce mécanisme, pour un total de 31,8 millions de dollars.

¹⁴³ Lindsay Steves, « The benefits of GAIN », *Third Way*, 13 mai 2019, <https://www.thirdway.org/memo/the-benefits-of-gain>.

¹⁴⁴ The White House, « FACT SHEET: Obama Administration Announces Actions to Ensure that Nuclear Energy Remains a Vibrant Component of the United States' Clean Energy Strategy », 6 novembre 2015, <https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2015/11/06/fact-sheet-obama-administration-announces-actions-ensure-nuclear-energy>.

¹⁴⁵ Nuclear Energy Innovation Capabilities Act

¹⁴⁶ John, C. Wagner, « National Reactor Innovation Center Overview », *Idaho National Laboratory*, février 2019, <https://line.idaho.gov/wp-content/uploads/2019/02/2019-0123-nric-overview.pdf>.

l'innovation et la modernisation de l'énergie nucléaire (NEIMA - 2019)^{147, 148, 149} a redéfini le mode de financement de la NRC et son fonctionnement, en **passant d'une approche prescriptive et conservative** à une adaptation systématisée de la réglementation aux avancées technologiques^{150, 151, 152, 153}. Enfin, la **Société américaine de Financement pour le Développement international (DFC)** a levé les dernières interdictions d'investissement dans des projets d'énergie nucléaire à l'étranger, afin d'ouvrir des opportunités d'exportation, notamment vers les pays en développement^{154; 155}.

Sous l'administration Biden, le **Bipartisan Infrastructure Law (BIL) (2021)** et l'**Inflation Reduction Act (IRA) (2022)** ont confirmé la place éminemment stratégique des SMR pour l'influence des États-Unis en renforçant les financements publics de la filière. Parmi les prescriptions du BIL, **2,5 milliards de dollars sont destinés aux Advanced Reactor Demonstration Projects** pour la conception, l'homologation et le déploiement de deux réacteurs innovants, dont le Xe-100 de X-Energy (HTGR). L'IRA accorde elle, des allocations sur la construction de réacteurs ou la production de combustible et des **crédits d'impôt** sur la production d'électricité à partir de dispositifs nucléaires avancés.

En 2022, la fondation d'**un département pour l'utilisation responsable des SMR (FIRST)**¹⁵⁶ a lancé le début d'une campagne de promotion et de coopération internationale¹⁵⁷, pour

¹⁴⁷ Nuclear Energy Innovation and Modernization Act

¹⁴⁸ U. S. Congress, « Nuclear Energy innovation and Modernization Act », Authenticated U.S. Government Information, 14 janvier 2019.

¹⁴⁹ U. S. Senate, « Hearing on S.512, the Nuclear Energy Innovation and Modernization Act », *Hearings - U.S. Senate Committee on Environment and Public Works*, 2017.

¹⁵⁰ U. S. Congress, « Nuclear Energy innovation and Modernization Act », Authenticated U.S. Government Information, 14 janvier 2019.

¹⁵¹ Erik Slobe, « Nuclear Energy Innovation And Modernization Act Signed Into Law », *JURIST - News* (blog), 18 janvier 2019, <https://www.jurist.org/news/2019/01/nuclear-energy-innovation-and-modernization-act-signed-into-law/>.

¹⁵² Alex Gilbert, Judi Greenwald et Victor Ibarra, Jr., « Unlocking Advanced Nuclear innovation : The Role of Fee Reform and Public Investment », *Nuclear Innovation Alliance*, mai 2021, <https://nuclearinnovationalliance.org/fee-reform-nuclear-innovation>.

¹⁵³ DoE, « President Trump Signs Bill To Boost Advanced Nuclear In America », 28 septembre 2018, <https://www.energy.gov/articles/president-trump-signs-bill-boost-advanced-nuclear-america>.

¹⁵⁴ DFC, « DFC Modernizes Nuclear Energy Policy », 23 juillet 2020, <https://www.dfc.gov/media/press-releases/dfc-modernizes-nuclear-energy-policy#:~:text=The%20announced%20change%20removes%20DFC's,particularly%20impactful%20in%20these%20markets>.

¹⁵⁵ World Nuclear News, « USA Lifts Nuclear Finance Ban : Nuclear Policies », 24 juillet 2020, <https://world-nuclear-news.org/Articles/USA-lifts-nuclear-finance-ban>.

¹⁵⁶ U.S. Department of State's Foundational Infrastructure for the Responsible Use of Small Modular Reactor Technology

¹⁵⁷ Le SMART est notamment actif dans le partenariat international pour les infrastructures et l'investissement du G7

l'exportation du savoir-faire états-unien, notamment auprès de pays tributaires des industriels russes et chinois pour maintenir leur parc nucléaire ^{158 ; 159 ; 160 ; 161}.

Toutes ces initiatives reposent sur une ambition : **édifier une chaîne de valeur des SMR** autour d'entreprises innovantes, rassemblées au sein de structures partagées, à l'appui d'un cadre fiscal et réglementaire prévu pour **maximiser les chances de rentabilité** et engager une **campagne d'exportation « agressive »**¹⁶².

Tableau 3 : Liste des projets SMR à eau légère et HTGR les plus avancés aux États-Unis selon la National Energy Agency (NEA)

Modèle	Type	Designer	Configuration
BWRX-300	BWR	GE-Hitachi Nuclear Energy & Hitachi-GE (Japon)	Terrestre
VOYGR	PWR	NuScale Power Corporation	Terrestre
MMR	HTGR	Ultra Safe Nuclear Corporation	Terrestre
Project Pele	HTGR	BWX Technologies, Inc	Mobile
Xe-100	HTGR	X-Energy LLC	Terrestre
SMR-300	PWR	Holtec International	Terrestre
OPEN20	PWR	Last Energy Inc.	Terrestre
Kaleidos	HTGR	Radiant	Mobile
BANR-SMR	HTGR	BWX Technologies, Inc	Terrestre
SC-HTGR	HTGR	Framatome, Inc. (USA)	Terrestre

3. Quelles perspectives après l'échec du Carbon Free Project de Nuscale ?

Parmi les nombreux projets états-uniens, **NuScale Power est probablement l'entreprise la plus emblématique**. En 2016, elle a été sélectionnée pour construire la première centrale SMR du pays, le Carbon Free Project, avec le soutien financier du DoE^{163 ; 164}. En 2023, elle est

¹⁵⁸ En février 2024, la Tchéquie, la Pologne, la Slovaquie, la Slovénie, l'Ukraine, la Roumanie, la Serbie, l'Estonie et la Lituanie avaient officiellement adhéré aux programmes proposés par le FIRST en prévision de l'implantation de SMR états-uniens sur leurs territoires, suivis en avril 2024 par le Kazakhstan.

¹⁵⁹ United States Department Of State. « Special Presidential Envoy For Climate Kerry And Ukraine Minister Of Energy Galushchenko Announce Cooperation On A Clean Fuels From Small Modular Reactors Pilot, COP27 Climate Conference », 12 novembre 2022. <https://www.state.gov/special-presidential-envoy-for-climate-kerry-and-ukraine-minister-of-energy-galushchenko-announce-cooperation-on-a-clean-fuels-from-small-modular-reactors-pilot-cop27-climate-conference/>.

¹⁶⁰ FIRST Program, « Partners - Foundational Infrastructure For Responsible Use Of SMR Technology (FIRST) Program », 21 février 2024, <https://www.smr-first-program.net/partners/>.

¹⁶¹ U.S. Mission Kazakhstan, « The United States And Kazakhstan Expand FIRST Partnership Through A Workshop On Stakeholder Engagement On SMR Technology In Astana - U.S. Embassy & Consulate In Kazakhstan », *U.S. Embassy & Consulate In Kazakhstan*, 12 avril 2024, <https://kz.usembassy.gov/the-united-states-and-kazakhstan-expand-first-partnership-through-a-workshop-on-stakeholder-engagement-on-smr-technology-in-astana/>.

¹⁶² George David Banks, *SMR Deployment Faces Challenges despite National Interest* (CSIS, Washington : 2013).

¹⁶³ En 2020 le DoE a apporté un soutien de **1,35 milliards de dollars sur 10 ans à NuScale**, pour la construction du CFP.

¹⁶⁴ World Nuclear News, « US Government Backs NuScale Projects At Home And Abroad : New Nuclear », 19 mai 2024, <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/US-government-backs-NuScale-projects-at-home-and-a>.

devenue la **première organisation à recevoir une certification de la NRC** pour un SMR¹⁶⁵. À l'international, elle est promue par l'appareil diplomatique pour exporter son savoir-faire en Europe, en Afrique et en Asie^{166,167,168,169}. Pour autant, elle pourrait aussi bien devenir **l'incarnation des limites du partenariat en place**, car le 8 novembre 2023, le **Carbon Free Project (CFP)**, qui devait marquer le début de l'usage commercial des SMR, a été **annulé par manque de rentabilité**.

Initialement, le projet avait prévu d'alimenter les cinquante municipalités rassemblées autour de **l'Utah Associated Municipal Power Systems (UAMPS)**, à partir de 12 modules VOYGR de 50 MWe, à 55 dollars par MWh. En 2023, les objectifs étaient passés à 6 modules de 77 MWe à **89 dollars par MWh** en janvier 2024¹⁷⁰. Un coût trop élevé, qui n'a pas permis de convaincre suffisamment de prospects au sein de l'UAMPS. Un échec imputable à un choc **inflationniste**, passant les coûts de construction de 5,3 à 9,3 milliards de dollars en seulement deux ans. Auquel se sont ajoutées **des modalités d'engagement attractives, mais insuffisamment contraignantes pour une tête de série**, par nature incertaine ¹⁷¹.

Si cet événement a pu être qualifié de conjoncturel et de négligeable sur les perspectives de la filière à long terme, il n'en demeure pas moins révélateur **des faiblesses** économiques persistantes des SMR et **vecteur d'appréhension** pour les investisseurs^{172; 173; 174}. Malgré la participation de l'entreprise la plus prometteuse du marché et **un soutien politique bipartisan**

¹⁶⁵ NuScale Power, « U.S. Nuclear Regulatory Commission Accepts NuScale Power's Standard Design Approval Application », 8 janvier 2023., <https://www.nuscalepower.com/en/news/press-releases/2023/us-nuclear-regulatory-commission-accepts-nuscale-powers-standard-design-approval-application>.

¹⁶⁶ Par l'intermédiaire du START à la COP26, NuScale a été désigné pour implanter une centrale SMR en Roumanie à l'aide d'un financement du gouvernement états-unien de 275 millions de dollars.

¹⁶⁷ United States Department Of State. « United States Takes Next Step In Supporting Innovative Clean Nuclear Technology In Europe », 26 juin 2022. <https://www.state.gov/united-states-takes-next-step-in-supporting-innovative-clean-nuclear-technology-in-europe/>.

¹⁶⁸ NuScale Power, « Biden Administration Announces Global Public-Private Commitment Up To \$ 275 Million To Advance NuScale VOYGR Deployment In Romania At G7 Leaders Summit », 22 mai 2023, <https://www.nuscalepower.com/en/news/press-releases/2023/biden-administration-announces-financial-commitment-to-advance-nuscale-voygr-deployment-in-romania>.

¹⁶⁹ DFC, *Report on DFC's Financing Nuclear Energy-Related Projects Overseas* (DFC, Washington : 2023).

¹⁷⁰ En prenant en considération les subventions prévues par l'Inflation Reduction Act, le montant revenait en réalité à 119 dollars par MWh

¹⁷¹ Les adhérents étaient libres de réduire leur volume souscrit, dans une limite minimale de 103 MW

¹⁷² L'arrêt du CFP fut par ailleurs concomitant à l'annulation de l'entrée en bourse de X-Energy, en raison des conditions économiques jugées défavorables (Schlissel 2023) (WNN 2023) (Day 2024)

¹⁷³ David Schlissel, « Eye-popping New Cost Estimates Released For NuScale Small Modular Reactor », *IEEFA*, 11 janvier 2024, <https://ieefa.org/resources/eye-popping-new-cost-estimates-released-nuscale-small-modular-reactor>.

¹⁷⁴ Gaic Le Gros, « Décryptage : Le Projet SMR de Nuscale Dans L'Idaho Annulé », *SFEN*, 21 novembre 2023, <https://www.sfen.org/rgn/decryptage-le-projet-smr-de-nuscale-dans-lidaho-annule/>.

depuis 2015, le CFP n'est pas parvenu à maîtriser ses coûts, ni à générer l'engagement nécessaire^{175; 176}.

À la suite de cet échec, la proposition budgétaire du DoE pour l'année 2025, affiche un **recul significatif des fonds alloués**, où il n'y a tout simplement aucun financement prévu pour la recherche et au développement des SMR, explicitement en raison de l'annulation du CFP¹⁷⁷.

Pour autant, Il serait prématuré de sonner la fin des SMR états-uniens. Dans un communiqué de la Maison-Blanche, le 24 mai 2024, **l'exécutif a renouvelé son engagement en faveur d'une filière nationale de SMR**. L'administration Biden a néanmoins annoncé la constitution d'un nouveau groupe de travail au sein même de la Maison-Blanche, pour **établir des pistes de réduction des risques et des coûts**¹⁷⁸, comme pour tirer les conclusions du CFP¹⁷⁹.

Par ailleurs, **l'exportation reste une voie stratégique prioritaire**, à laquelle s'est rajoutée en novembre 2023 la Banque d'import-export des États-Unis (EXIM)¹⁸⁰. L'exemple ukrainien en témoigne, en 2023, Westinghouse a signé un protocole d'accord avec le producteur Ukrainien Energoatom pour déployer son SMR AP300¹⁸¹, afin de **sécuriser l'indépendance énergétique de l'Ukraine vis-à-vis de la Russie**¹⁸². Un moyen d'entériner les **liens stratégiques et énergétiques avec l'Ukraine, mais aussi avec d'autres pays acquérant de l'Europe de l'Est face à la Russie**, par l'intermédiaire du travail diplomatique du FIRST.

¹⁷⁵ Energy Intelligence Group, « The End Of DOE's Flagship SMR — A Cautionary Tale », 2024. <https://www.energyintel.com/0000018b-cf50-dbb5-a5ef-df7378750000>.

¹⁷⁶ Ed Crooks, « A Major Setback For Nuclear Power | Wood Mackenzie », *Wood Mackenzie*, 13 novembre 2023, <https://www.woodmac.com/news/opinion/major-setback-for-nuclear-power/>.

¹⁷⁷ DoE, *FY 2025 Congressional Justification* (Office of the Chief Financial Officer, Washington : 2024).

¹⁷⁸ Le groupe de travail regroupe le Bureau de la politique climatique intérieure de la Maison-Blanche, le Bureau de l'innovation et de la mise en œuvre des énergies propres de la Maison-Blanche, le Bureau de la politique scientifique et technologique de la Maison-Blanche et le Département de l'énergie.

¹⁷⁹ The White House, *Fact Sheet : Biden - Harris Administration Announces New Steps to Bolster Domestic Nuclear Industry and Advance America's Clean Energy Future*, (Washington : 2024).

¹⁸⁰ United States Department Of State. « The United States Announces Key Measures To Jump Start Deployments Of Advanced Nuclear Energy Systems And To Secure Nuclear Fuel Supply Chains, Accelerating The Contribution Of Nuclear Energy To Net Zero Goals », 7 décembre 2023. <https://www.state.gov/the-united-states-announces-key-measures-to-jump-start-deployments-of-advanced-nuclear-energy-systems-and-to-secure-nuclear-fuel-supply-chains-accelerating-the-contribution-of-nuclear-energy-to-net-z/>.

¹⁸¹ Nuclear Engineering International, « Energoatom And Westinghouse To Co-operate On AP300 Deployment », 23 février 2024, <https://www.neimagazine.com/news/energoatom-and-westinghouse-to-co-operate-on-ap300-deployment-11150438/>.

¹⁸² Westinghouse Electric Company, « Westinghouse Congratulates Energoatom On Start Of AP1000® Work At Khmelnytskyi NPP », 15 avril 2024, <https://info.westinghousenuclear.com/news/westinghouse-congratulates-energoatom-on-start-of-ap1000-work-at-khmelnytskyi-npp>.

4. Les avancées sur le plan militaire

Pour les armées états-uniennes, les petits réacteurs nucléaires mobiles sont **un sujet d'intérêt depuis la fin des années 1940**. Plusieurs expérimentations ont vu le jour au Panama, en Arctique et en Antarctique pour autonomiser des installations isolées et réduire les coûts d'approvisionnement. **Mais la multiplication des incidents et les rendements décevants ont clôturé ces expérimentations** au début des années 1970^{183, 184}. Le sujet est néanmoins réapparu à partir de 2001, lors des interventions militaires en Irak et en Afghanistan, après avoir pris conscience de la dépendance des armées aux infrastructures locales, souvent défectueuses et vulnérables^{185, 186}.

C'est en 2010 que l'énergie nucléaire fut évoquée par le DoD comme une solution possible pour limiter les interconnexions critiques des bases avancées et **insulariser les sites militaires** face aux ruptures d'approvisionnement en énergie^{187, 188, 189}. Une hypothèse actualisée en 2016 par le **conseil scientifique de la défense**, qui évoque les SMR comme une option suffisamment prometteuse pour justifier **un engagement matériel et financier du DoD**¹⁹⁰.

Projet PELE (Portable Energy for Lasting Effects)

Lancé en 2019, le projet PELE est une initiative du DoD, pour développer un prototype de SMR à usage militaire sous 5 ans. Il rassemble des experts du DoE, de la NRC, du Corps des ingénieurs de l'armée états-unienne et du secteur privé, sous la coordination du Bureau des Capacités stratégiques (SCO)¹⁹¹

Trois entreprises ont été mandatées par le Pentagone, à hauteur de 11,9 à 14,3 millions de dollars pour développer en compétition un modèle mobile de 1 à 10 MWe, déployable sur des terrains d'opération : BWX Technologies (13,5 millions de dollars), Westinghouse (11,9 millions de dollars) et X-energy (14,3 millions de

¹⁸³ Sébastien Grevsmühl, « Réacteurs nucléaires mobiles en régions polaires: le cas controversé de "PM-3A" en Antarctique », *HAL Open Science*, 2019.

¹⁸⁴ US Army Corps of Engineers, « MH-1A STURGIS | Mobile, High Power Model 1A », 2024, <https://www.nab.usace.army.mil/Missions/Environmental/Sturgis.aspx>.

¹⁸⁵ La vulnérabilité des convois d'approvisionnement en carburant et la fragilité des réseaux électriques en Irak ont été deux problèmes majeurs soulevés dès le début de l'occupation

¹⁸⁶ Richard Andres et Hanna Breetz, « Small Nuclear Reactors for Military Installations : Capabilities, Costs, and Technological Implications », INSS, 2011.

¹⁸⁷ Ibid.

¹⁸⁸ US Senate, *National Defense authorization Act for Fiscal Year 2010*, (111th Congress, Washington : 2009).

¹⁸⁹ Marcus King, LaVar Huntzinger et Thoi Nguyen, *Feasibility of Nuclear Power on U.S. Military Installations* (CNA, Washington : 2011).

¹⁹⁰ Defense Science Board, *Task Force on Energy Systems for Forward/ Remote Operating Bases* (Department of Defense, Washington : 2016).

¹⁹¹ USD(R&D), « Project Pele Mobil Nuclear Reactor », https://www.cto.mil/pele_eis/, (page consultée le 16 juin 2024)

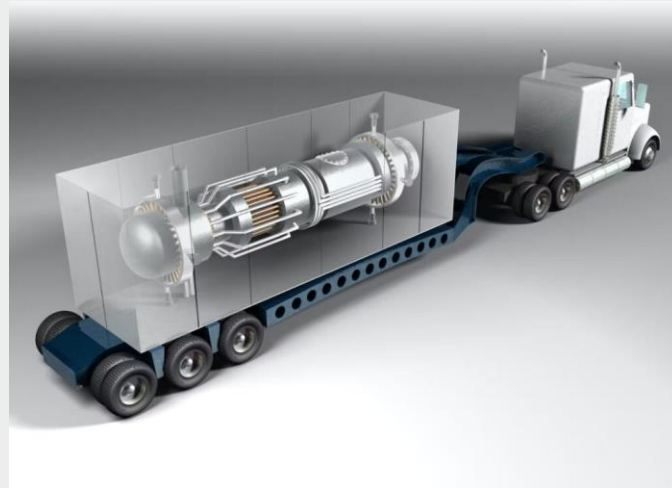
dollars)¹⁹². En juin 2022, BWX Technologies a été désigné pour produire un prototype d'ici 2024 avec une mise en opération en 2025.

Le model proposé est un réacteur haute température refroidi au gaz (HTGR) de 1 à 5 MWe, pouvant être transporté dans un conteneur commercial et déployable en seulement trois jours pour de la production d'énergie et de la cogénération¹⁹³.

En parallèle, la participation de X-Energy a été prolongée pour fournir un design alternatif, à vocation militaire, mais aussi commerciale pour soutenir la filière civile.

Le modèle pressenti, basé sur le Xe-Mobile Power Generation, aurait une puissance de 2 à 7 MWe^{194; 195; 196}.

Figure 1 : Vue d'artiste du SMR PELE



Source : (Power Magazine s.d.)

Entre-temps, la question a gagné en ampleur jusqu'à faire l'objet en 2021 d'un **ordre exécutif sur la promotion des petits réacteurs modulaires pour la défense nationale et l'exploration**

¹⁹² DefenseNews, « Pentagon awards contracts to design mobile nuclear reactor », <https://www.defensenews.com/smr/nuclear-arsenal/2020/03/09/pentagon-to-award-mobile-nuclear-reactor-contracts-this-week/> (page consultée le 16 juin 2024)

¹⁹³ Sfen, « BWXT sélectionné pour construire le premier microréacteur américain », <https://www.sfen.org/rgn/bwxt-selectionne-pour-construire-le-premier-microreacteur-americain/> (page consultée le 16 juin 2024)

¹⁹⁴ NEI, « Us Defense Department expands Project Pele to include X-energy », <https://www.neimagazine.com/news/us-defense-department-expands-project-pele-to-include-x-energy-11160692/> (page consultée le 16 juin 2024)

¹⁹⁵ X-energy, « Reactor : Xe-Mobile », <https://x-energy.com/reactors/xe-mobile> (page consultée le 16 juin 2024)

¹⁹⁶ U.S.Department of Defense, « DOD Exercises Option on Second Micro Nuclear Reactor Design », <https://www.defense.gov/News/Releases/Release/Article/3524458/dod-exercises-option-on-second-micro-nuclear-reactor-design/> (page consultée le 16 juin 2024)

spatiale¹⁹⁷. Un acte réfléchi pour promouvoir les SMR comme une **technologie duale**, civile et militaire, sur le champ **terrestre, mais aussi spatial**.¹⁹⁸

Des objectifs qui se retrouvent dans le Projet DRACO¹⁹⁹, un réacteur à propulsion nucléaire pour l'exploration spatiale, mais pouvant aussi avoir des applications militaires et terrestres²⁰⁰. Le projet est cofinancé par l'agence de recherche de la défense des États-Unis (DARPA) et la NASA pour un total de **499 millions de dollars** et réalisé avec Lockheed Martin et BXW Technology^{201 ; 202}.

Si l'échec du Carbon Free Project a pu atteindre les ambitions commerciales des SMR, l'intérêt du DoD pour les réacteurs innovants, la cogénération et l'insularisations des bases militaires reste inchangé. **Les projets PELE et DRACO continuent d'être financés**, avec un planning de déploiement qui devrait se clarifier dans les prochains mois²⁰³.

5. Conclusion

- Les SMR sont intégrés dans la stratégie de revitalisation de l'industrie nucléaire des États-Unis, pour **renforcer son influence dans la gouvernance nucléaire internationale** en concurrence avec la Russie et la Chine.
- Cette stratégie repose sur des **partenariats public-privé (PPP)** mutualisant les capacités financières et matérielles existantes du secteur public avec les entreprises privées.
- Ce partenariat s'est structuré autour de deux lois de l'administration Trump : la loi sur **les capacités d'innovation dans le domaine de l'énergie nucléaire (NEICA)** et sur **l'innovation et la modernisation de l'énergie nucléaire (NEIMA)**, renforcées sous le mandat de Joe Biden par le **Bipartisan Infrastructure Law (BIL)** et **l'Inflation Reduction Act (IRA)**

¹⁹⁷ Executive Order on Promoting Small Modular Reactors for National Defense and Space Exploration

¹⁹⁸ The White House. « Executive Order On Promoting Small Modular Reactors For National Defense And Space Exploration », 12 janvier 2021. <https://trumpwhitehouse.archives.gov/presidential-actions/executive-order-promoting-small-modular-reactors-national-defense-space-exploration/>.

¹⁹⁹ Demonstration Rocket for Agile Cislunar Operations

²⁰⁰ Theresa Hitchens, « DARPA, NASA Tap Lockheed Martin To Design, Build DRACO Nuclear Rocket For Deep Space Missions », *Breaking Defense*, 27 juillet 2023, <https://breakingdefense.com/2023/07/darpa-nasa-tap-lockheed-martin-to-design-build-draco-nuclear-rocket-for-deep-space-missions/>.

²⁰¹ Ibid.

²⁰² Mike Wall, « NASA, DARPA To Launch Nuclear Rocket To Orbit By Early 2026 », *Space*, 26 juillet 2023, <https://www.space.com/nasa-darpa-nuclear-thermal-rocket-draco-2026>.

²⁰³ The White House, Fact Sheet : Biden - Harris Administration Announces New Steps to Bolster Domestic Nuclear Industry and Advance America's Clean Energy Future, (Washington : 2024).



- Les SMR états-uniens sont pensés dans **une perspective duale, civile et militaire**, avec un soutien financier du Département de la Défense sur des projets militaires, comme civils.
- Si les perspectives commerciales restent incertaines depuis l'échec du Carbon Free Project, les SMR continuent de bénéficier du soutien des autorités.



FÉDÉRATION DE RUSSIE

La Russie est **l'actrice la plus prégnante sur le marché nucléaire international**. À travers son entreprise d'État Rosatom, elle est devenue la première puissance exportatrice de technologies et de services nucléaires, grâce à des modalités financières et commerciales bien moins contraignantes qu'avec les États-Unis. Mais cette industrie est aussi intimement liée au pouvoir politique, qui l'emploie comme un vecteur d'influence géopolitique en s'ingérant dans le système énergétique des pays acquérant. Les SMR ne dérogeront pas à cette règle, mais ils pourraient aussi servir des intérêts plus nationaux qui n'en demeurent pas moins stratégiques pour l'Europe et la France^{204; 205}.

1. La reconversion du savoir-faire russe

Contrairement aux États-Unis, la Fédération de **Russie ne reconnaît pas les SMR comme une innovation**, mais comme un prolongement de concept déjà existant, sous une configuration nouvelle pour répondre à de nouveaux usages (voir annexe 11). L'appellation même de SMR n'est apparue qu'en réponse aux récents programmes états-uniens, alors que des projets assimilables existent depuis les années 1980²⁰⁶. Suivant cette logique, la stratégie russe s'appuie sur **des acteurs déjà établis** et une **réaffectation de technologies** déjà disponibles.

Trois entités, fondées dans les années 1940 et 1950, se partagent l'essentiel de l'industrie russe des SMR²⁰⁷, toutes sous le contrôle de l'entreprise d'État russe **Rosatom** : **NIKET**, **AFRIKANTOV** et l'**institut KARCHATOV**²⁰⁸. Afrikantov et Niket, spécialisés dans la propulsion navale, s'illustrent particulièrement dans **la reconversion de réacteurs qu'ils ont développés et maintenus en opération pendant des décennies** pour proposer une production localisée d'électricité, de chaleur ou d'eau potable. Parmi les modèles les plus avancés, le **PWR RITM** (Afrikantov), le **PWR KLT-40S** (Afrikantov), le **BWR KARAT** (Niket) et le **PWR SHELF-MR** (Niket)

²⁰⁴ Névine Schepers, *Russia's Nuclear Energy Exports : Status, Prospects and Implications* (EU Non-Proliferation and Disarmament Consortium : 2019).

²⁰⁵ Philippe Copinschi, Pierre Laboué et Teva Meyer, *Les stratégies nucléaires civiles de la Chine, des États-Unis et de la Russie* (Observatoire de la sécurité des flux et des matières énergétiques, Paris : 2020).

²⁰⁶ Daniel T. Ingersoll et Mario D. Carelli, *Handbook Of Small Modular Nuclear Reactors* (Woodhead Publishing, Cambridge : 2021).

²⁰⁷ AKME Engineering, fondé en 2011 par Rosatom et l'énergéticien privé JSC EuroSibEnergO est un quatrième acteur de la filière travaillant sur des modèles expérimentaux à neutrons rapides, refroidis au métal fondu (AIEA 2022).

²⁰⁸ NIKIET et AFRIKANTOV sont spécialisées depuis 1954 dans la propulsion nucléaire navale, respectivement pour les sous-marins et les brise-glaces à propulsion nucléaire.

se basent tous sur des concepts déjà en activité sur des brise-glaces, des sous-marins et dans des centrales conventionnelles^{209 ;210 ;211 ;212}.

L'Akademic Lomonosov

L'Akademic Lomonosov est une **centrale nucléaire flottante**, propriété de Rosatom, mise en service en 2019 et considérée comme **la première centrale SMR au monde**.

La barge comprend deux réacteurs PWR KLT-40S de conception **Afrikantov OKBM** et d'un compartiment dédié à la gestion du combustible et des déchets nucléaires.

Les deux réacteurs de 35 MWe sont des versions modifiées du **KLT-40 utilisés depuis 1989** sur les brise-glaces à propulsion nucléaire Taimyr²¹³. Leur design a spécifiquement été pensé pour être assemblé, testé et divergé sur un chantier naval et pour **fournir de l'énergie à des zones urbaines, des usines de désalinisation et des sites d'extraction** sur terre ou sur mer²¹⁴.

L'Akademic Lomonosov est amarré depuis 2019 au **port de Pevek**, la ville la plus septentrionale de Russie, servant de **relais sur la route maritime du Nord** (passage du Nord-Est). Elle doit remplacer les centrales thermiques et nucléaires de Chauskaya et Bilibino et faire de Pevek **un point d'ancrage du développement de l'Arctique russe** et des flux maritimes vers l'Extrême Orient. La barge devrait rester sur place jusqu'à son transfert à Mourmansk pour maintenance, prévue pour 2031^{215, 216,217}.

Le projet initialement prévu pour 140 millions de dollars aurait finalement coûté plus de **574 millions de dollars**, auxquels s'ajoutent 107 millions de dollars pour le

²⁰⁹ NTI, « N. A. Dollezhal Scientific Research and Design Institute of Energy Technologies (NIKIET) », 2024, <https://www.nti.org/education-center/facilities/n-a-dollezhal-scientific-research-and-design-institute-of-energy-technologies-nikiet/>.

²¹⁰ Victor Merkulov, Nikolay Didenko, Djamilia Skripnul et Sergey Kulik, *Analysis of small modular reactor technologies and socio-economic aspects of their application in the russian Arctic in the era of digital transformation* (TransSiberia, St. Petersburg : 2023).

²¹¹ IAEA, *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments* (AIEA, Vienne : 2020).

²¹² Rosatom, « Rosatom State Atomic Energy Corporation ROSATOM Global Leader In Nuclear Technologies Nuclear Energy », 5 mai 2023., <https://www.rosatom.ru/en/index.html>.

²¹³ GlobalSecurity, « JLT-40 Atomic Reactor, Surface Fleet », <https://premium.globalsecurity.org/military/world/russia/reactor-klt-40.htm> (page consultée le 16 juin 2024)

²¹⁴ IAEA, *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments* (AIEA, Vienne : 2020).

²¹⁵ Forum Nucléaire Suisse, « Russie : L'akademik Lomonosov est connectée au réseau », <https://www.nuklearforum.ch/fr/nouvelles/russie-lakademik-lomonosov-est-connectee-au-reseau/> (page consultée le 16 juin 2024)

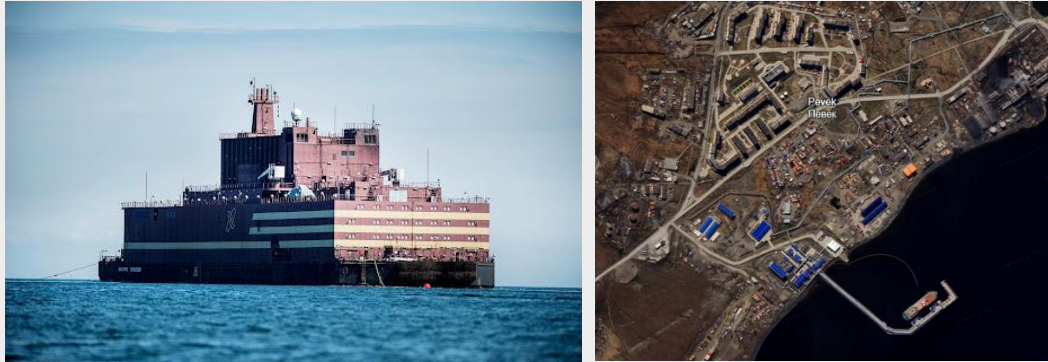
²¹⁶ Sfen, « Premier rechargement pour la centrale flottante russe Akademik Lomonosov », <https://www.sfen.org/rgn/premier-rechargement-pour-la-centrale-flottante-russe-akademik-lomonosov/> (page consultée le 16 juin 2024)

²¹⁷ ONHP, « Home page », <https://onhpgroup.com/> (page consultée le 16 juin 2024)

raccordement de Pevek à la centrale. Rosatom n’a cependant jamais confirmé ces estimations ^{218 ; 219}.

Figure 2 : Photo de l’Akademic Lomonosov

À gauche, l’Akademic Lomonosov après sa sortie du chantier naval BALTIC de Saint-Petersbourg en 2018, à droite une vue satellite de l’installation à Pevek prise en 2023.



Source : (Archives Gamma 2020) ²²⁰; Google Earth

Ce recyclage de concept existant a permis **de réduire les coûts et les temps de développement** mais aussi de **faciliter l’intégration des SMR dans le référentiel du régulateur russe Rostekhnadzor**²²¹. Par exemple, Le KLT-40S de l’Akademic Lomonosov, basé sur le modèle pour brise-glace KLT-40 a pu recevoir son autorisation de construction dès 2003, sept ans avant l’annonce officielle du projet. Cela témoigne **d’un dynamisme et d’une précocité** révélateurs de l’engagement du gouvernement russe, dont **Rostekhnadzor** est sous la supervision directe²²². Malgré tout, cette rapidité et ce manque d’indépendance restent des facteurs **d’interrogation sur la qualité des procédures de contrôle et d’habilitation**²²³.

Quant au financement, il se fait sur le modèle de projets nucléaires antérieurs, avec **un soutien de l’État russe par l’intermédiaire de Rosatom**, combiné à des investissements privés, selon

²¹⁸ Peter Lobner, Lynceans, Russia’s Akademic Lomonosov – The first modern floating nucleat power plant, Lynceans.org, 15 mai 2021

²¹⁹ Bellona, « New documents show cost of Russian floating nuclear power plant skyrockets », [New documents show cost of Russian floating nuclear power plant skyrockets - Bellona.org](#) (page consultée le 16 juin 2024)

²²⁰ Akademik Lomonosov, « ARCHIVES GAMMA », 20 mai 2020, <http://archivesgamma.fr/2020/05/22/akademik-lomonosov/>.

²²¹ IAEA, *Considering the Application of a Graded Approach, Defence-in-Depth and Emergency Planning Zone Size for Small Modular Reactors* (IAEA, Vienne : 2017).

²²² IAEA, « IAEA Mission Concludes Peer Review Of The Russian Federation’s Nuclear Regulatory Framework », 19 novembre 2013, <https://www.iaea.org/newscenter/pressreleases/iaea-mission-concludes-peer-review-russian-federations-nuclear-regulatory-framework>.

²²³ NTI, « Federal Service for Environmental, Technological, and Nuclear Oversight (Rostekhnadzor) », 2024, <https://www.nti.org/education-center/facilities/federal-service-for-environmental-technological-and-nuclear-oversight-rostekhnadzor/>.

des modalités établies au cas par cas incluant des prêts à taux préférentiel, des prises de participation, ou des partenariats public-privé ^{224 ; 225 ; 226}.

Tableau 4 : Liste des projets SMR à eau légère et HTGR les plus avancés dans la Fédération de Russie selon la National Energy Agency (NEA)

Design	Type	Designer	Configuration
KARAT-100	BWR	NIKIET	Terrestre
KARAT-45	BWR	NIKIET	Terrestre
RUTA-70	PWR	NIKIET	Terrestre
SHELF-M	PWR	NIKIET	Maritime
UNITHERM	PWR	NIKIET	Terrestre
VK-300	BWR	NIKIET	Terrestre
ABV-6E	PWR	JSC Afrikantov OKBM	Maritime
KLT-40S	PWR	JSC Afrikantov OKBM	Maritime
GT-MHR	HTGR	JSC Afrikantov OKBM	Non spécifié
VBER-300	PWR	JSC Afrikantov OKBM	Maritime
MHR-100	HTGR	JSC Afrikantov OKBM	Non spécifié
MHR-T	HTGR	JSC Afrikantov OKBM	Non spécifié
RITM-200M	PWR	JSC Afrikantov OKBM	Maritime
RITM-200N	PWR	JSC Afrikantov OKBM	Terrestre
RITM-200S	PWR	JSC Afrikantov OKBM	Maritime
ELENA	PWR	Kurchatov Institute	Terrestre

2. Une technologie au service du développement du Grand Nord

Contrairement aux États-Unis, **la Russie ne cherche pas à concurrencer les réacteurs de forte puissance**. Elle considère les SMR trop coûteux, avec des perspectives d'optimisation insuffisantes pour parvenir à un coût actualisé attractif. En revanche, elle se positionne sur **des marchés de niche où le prix de l'électricité est déjà élevé et la cogénération peut servir les intérêts industriels**, à commencer par **le Grand Nord** ²²⁷. Des territoires difficiles d'accès, **peu développés et aux tracés contestés**, mais dont les ressources représenteraient environ **20 % du PIB russe**. Un potentiel économique auxquelles s'ajoutent de nouvelles perspectives

²²⁴ Nuclear Engineering International, « Plans Progress For SMR In Russia's Yakutia - Nuclear Engineering International », 21 juillet 2023, <https://www.neimagazine.com/news/plans-progress-for-smr-in-russias-yakutia-8912250/>.

²²⁵ Fabienne Pehuet Lucet, *Financing Nuclear Power Plant Projects A New Paradigm?* (IFRI, Paris : 2015).

²²⁶ World Nuclear News, « Russia Commits To Further Floating NPPs », 27 juillet 2021, <https://world-nuclear-news.org/Articles/Russia-commits-to-further-floating-nuclear-power-p>.

²²⁷ Daniel T. Ingersoll et Mario D. Carelli, *Handbook Of Small Modular Nuclear Reactors* (Woodhead Publishing, Cambridge : 2021).

minières et l'ouverture du passage du Nord-Est par l'intermédiaire du **réchauffement climatique**^{228, 229, 230}.

Son développement est donc une priorité de longue date pour Moscou qui pourrait s'accélérer grâce aux SMR. C'est l'objectif de l'Akademic Lomonosov et du dernier projet lancé en Yakoutie, la centrale **SMR d'Ust-Kuyga**²³¹, qui doivent réduire le coût de l'énergie pour les populations et soutenir la mine d'or voisine de Kyuchus pour les quarante prochaines années^{232; 233}. Un projet qui doit précéder d'autres installations flottantes dans **la baie de Chaunskaya**, à proximité de futurs sites miniers²³⁴, non loin du Lomonosov dont les apports énergétiques serviront à la mise en place du projet^{235; 236}. Par le nucléaire, Moscou espère également **consolider sa souveraineté sur ces territoires en déclin démographique**, où les conséquences des dérèglements climatiques et du maldéveloppement desserrent d'autant plus les liens avec les populations locales.

À noter par ailleurs que cette présence de l'industrie nucléaire dans la région n'est pas nouvelle. En effet, Rosatom est **mandatée depuis 2018 pour superviser le développement de la route du Nord** avec le ministère des transports. Un rôle qui s'explique par ses moyens techniques et ses brise-glaces nucléaires, mais aussi par son rayonnement international et sa

²²⁸ Marlène Laruelle, *La politique Arctique de la Russie* (IFRI, Paris : 2020).

²²⁹ André Gattolin, « Arctique : Préoccupations européennes pour un enjeu global », *Senat Rapport d'information n° 684*, 2 juillet 2014.

²³⁰ Camille Escudé, « Les Régions de L'Arctique Entre États et Sociétés ». *Géoconfluences*, 19 septembre 2019, <https://geoconfluences.ens-lyon.fr/informations-scientifiques/dossiers-regionaux/arctique/articles-scientifiques/regions-arctiques-entre-etats-et-societes>.

²³¹ La centrale d'Ust-Kuyga doit accueillir un réacteur RITM-200N développé par Afrikantov, sur la base d'un modèle RITM-200 pour brise-glace à propulsion nucléaire. Le projet a été accrédité par Rostekhnadzor en avril 2023 et devrait être opérationnel pour 2028. Les travaux ont débuté en 2024.

²³² World Nuclear News, « Deal Signed For Nuclear To Power Russian Gold Mine », 21 janvier 2022, <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Deal-signed-for-nuclear-to-power-Russian-gold-mine>.

²³³ World Nuclear News, « Preparatory Work Stepped Up For Russia's First Land-based », 9 février 2024, <https://world-nuclear-news.org/Articles/Preparatory-work-stepped-up-for-Russia-s-first-land-based>.

²³⁴ Un accord a été signé en juillet 2021 entre Rosatom et GDK Baimskaya LLC pour alimenter en électricité nucléaire les activités d'extraction et de raffinage de Baimskaya dans la région.

²³⁵ Rosatom, « Rosatom Demonstrates Progress In Implementing Low-capacity Nuclear Power Projects At The SMR Day », 4 décembre 2023, <https://rosatom-europe.com/press-centre/news/rosatom-demonstrates-progress-in-implementing-low-capacity-nuclear-power-projects-at-the-smr-day/>.

²³⁶ FNPP, « Rosatom To Build Four Power Units To Supply Electricity To The Baimsky Mining And Processing Plant », 30 juillet 2021, <https://fnpp.info/latest-news/rosatom-to-build-four-power-units-to-supply-electricity-to-the-baimsky-mining-and-processing-plant>.

faible exposition aux sanctions internationales²³⁷, qui en font **un intermédiaire crédible et acceptable pour des investisseurs étrangers**, notamment chinois^{238,239, 240}.

3. Des projets d'exportation axés sur les pays en développement

Les SMR sont aussi une opportunité pour Moscou de **consolider sa présence** sur un marché encore peu touché par les sanctions internationales. Ils renforcent également son influence **auprès de pays qui ne sont pas en mesure de se nucléariser** par des moyens conventionnels, ou **qui contestent l'ordre actuel de non-prolifération** qu'ils jugent discriminant envers les pays en développement. **Autant de soutiens potentiels** dans son bras de fer avec l'UE et les États-Unis^{241,242,243}.

Plusieurs accords **d'exportation ou de collaboration seraient en discussion** à des degrés divers, potentiellement pour l'exportation de SMR sur terre ou sur mer. Parmi eux

²³⁷ Malgré la guerre en Ukraine, l'Union européenne n'a imposé aucune sanction sur Rosatom qui garde une emprise sur le parc nucléaire de l'Union avec 15 réacteurs de conception russe en Tchéquie, Slovaquie, Finlande et Bulgarie. Seuls les États-Unis ont imposé des sanctions sur l'uranium russe en mai 2024.

²³⁸ Marlène Laruelle, *La politique Arctique de la Russie* (IFRI, Paris : 2020).

²³⁹ Jean-Michel Gradt, « Moscou Compte Sur Rosatom Pour Rendre la Route du Nord-Est Attractive », *Les Echos*, 14 décembre 2018, <https://www.lesechos.fr/industrie-services/tourisme-transport/moscou-compte-sur-rosatom-pour-rendre-la-route-du-nord-est-attractive-238973>.

²⁴⁰ Alexandra Brzozowski, « Guerre En Ukraine : La Pression Monte Sur L'UE Pour Qu'elle Sanctionne Rosatom », *Euractiv*, 21 avril 2023, <https://www.euractiv.fr/section/international/news/guerre-en-ukraine-la-pression-monte-sur-lue-pour-quelle-sanctionne-rosatom/>.

²⁴¹ Michal Onderco et Darren McCauley, « Going Nuclear ? The Long-term Problem Is Political », *Clingendael Institute*, 28 janvier 2021, <https://spectator.clingendael.org/en/publication/going-nuclear-long-term-problem-political>.

²⁴² João Paulo Nicolini Gabriel, « Russian Nuclear Diplomacy In The Global South, And How To Respond To », *Istituto Affari Internazionali*, 22 mars 2024, <https://www.iai.it/en/pubblicazioni/russian-nuclear-diplomacy-global-south-and-how-respond-it>.

²⁴³ Andrew Futter et Olamide Samuel, « Accommodating Nutoxia : The Nuclear Ban Treaty And The Developmental Interests Of Global South Countries », *Review Of International Studies* (2023) : 1-22, <https://doi.org/10.1017/s0260210523000396>.

l'Indonésie²⁴⁴, la Malaisie²⁴⁵, l'Algérie²⁴⁶, le Burkina Faso²⁴⁷, la Birmanie²⁴⁸, la Mongolie²⁴⁹, l'Ouzbékistan²⁵⁰, le Maroc²⁵¹, l'Arabie saoudite²⁵², le Bangladesh²⁵³ et la Guinée²⁵⁴.

Bien que ces discussions n'aient pas encore abouti à des engagements concrets elles participent à **l'édition d'un bloc géopolitique**, où l'énergie nucléaire est **un vecteur d'intégration**.

4. La dualité russe sur les SMR

Officiellement en 2024, **il n'existerait aucun concept avancé de SMR à finalité militaire** dans la Fédération de Russie. Pour autant, l'industrie et la recherche nucléaire russe restent intimement liées au secteur de la défense, à l'appui d'institutions dédiées au développement de technologies nucléaires duales, depuis l'Union soviétique^{255, 256, 257}.

À titre d'illustration, **le PAMIR soviétique** aurait connu un regain d'intérêt à partir de 2010, au travers d'une collaboration entre le biélorusse SOSNY et NIKIET pour de possible application

²⁴⁴ Rosatom, « Rosatom State Atomic Energy Corporation ROSATOM Global Leader In Nuclear Technologies Nuclear Energy », 26 mai 2023, <https://www.rosatom.ru/en/press-centre/news/the-delegation-from-indonesia-visited-rosatom-enterprises/>.

²⁴⁵ Rosatom Newsletter, « Small Reactor, Large Benefit », 1 décembre 2021, <https://rosatomnewsletter.com/2021/12/01/small-reactor-large-benefit/>.

²⁴⁶ Rosatom, « Rosatom State Atomic Energy Corporation ROSATOM Global Leader In Nuclear Technologies Nuclear Energy », 15 mars 2023, <https://www.rosatom.ru/en/press-centre/news/rosatom-and-algerian-atomic-energy-commission-discussed-nuclear-energy-solutions-in-a-jointly-organ/>.

²⁴⁷ Feriol Bewa, « Le Burkina Faso Signe Avec L'agence russe Rosatom un Accord Pour la Construction D'une Centrale Nucléaire Locale », *Agence Ecofin*, 14 octobre 2023, <https://www.agenceecofin.com/energie/1410-112729-le-burkina-faso-signe-avec-l-agence-russe-rosatom-un-accord-pour-la-construction-d-une-centrale-nucleaire-locale>.

²⁴⁸ Nikkei Asia, « Myanmar Turns To Small Russian Nuclear Reactors For Energy Solution », 22 décembre 2022, <https://asia.nikkei.com/Spotlight/Myanmar-Crisis/Myanmar-turns-to-small-Russian-nuclear-reactors-for-energy-solution>.

²⁴⁹ Rosatom, « Rosatom Demonstrates Progress In Implementing Low-capacity Nuclear Power Projects At The SMR Day », 4 décembre 2023, <https://rosatom-europe.com/press-centre/news/rosatom-demonstrates-progress-in-implementing-low-capacity-nuclear-power-projects-at-the-smr-day/>.

²⁵⁰ World Nuclear News, « Russia Set To Build SMR Nuclear Power Plant In Uzbekistan » 28 mai 2024, <https://world-nuclear-news.org/Articles/Russia-set-to-build-SMR-nuclear-power-plant-in-Uzb>.

²⁵¹ Michaël Tanchum, « Morocco's Nuclear Option : Russian Vs US Technological Cooperation To Power Its Water Scarcity Solutions », *Middle East Institute*, 10 août 2023, <https://www.mei.edu/publications/moroccos-nuclear-option-russian-vs-us-technological-cooperation-power-its-water>.

²⁵² Middle East Eye, « Saudi Arabia Mulls Nuclear Power Offers From China And Russia In Bid To Sway US », 27 août 2023, <https://www.middleeasteye.net/news/saudi-arabia-china-russia-us-nuclear-power>.

²⁵³ John Dyer, « Russian Rosatom Proposes Establishing Several Small Nuclear Power Plants In Bangladesh », *SightLine*, 5 avril 2024, <https://sightlineu3o8.com/2024/04/russian-rosatom-proposes-establishing-several-small-nuclear-power-plants-in-bangladesh/>.

²⁵⁴ <https://world-nuclear-news.org/Articles/Guinea-and-Russia-sign-MoU-for-floating-nuclear-po>

²⁵⁵ NTI ? « Facilities », s. d., <https://www.nti.org/education-center/facilities/> consulté le 2 juin 2024.

²⁵⁶ IAEA, *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments* (AIEA, Vienne : 2020).

²⁵⁷ World Nuclear Association, « Small Nuclear Power Reactors », 16 février 2024, <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>.

militaire²⁵⁸. Les deux entreprises se seraient entendues pour reprendre le concept original pour développer **un réacteur nucléaire modulaire transportable de petite puissance (MTSPNR)**, HTGR de 2,5MW(e). Depuis, le ministère russe de la Défense se serait tourné vers la société russe **IPEC**²⁵⁹ pour un projet similaire, sans que le lien ne puisse être avéré entre les deux^{260 ; 261}.

Au-delà d'hypothétiques projets militaires, la nucléarisation de l'Arctique peut s'assimiler à un double emploi civil et militaire. Car depuis le début des années 2000, la diminution des surfaces gelées du Grand Nord est analysée par le Kremlin comme la perte d'une barrière naturelle face aux nations limitrophes, à commencer par les États-Unis. Une vulnérabilité qui nécessite selon lui de renforcer sa présence militaire, pour sécuriser les territoires et les ressources dont il s'estime dépositaire^{262 263}.

Carte 3 – Partage de l'Arctique



Source : AFP

²⁵⁸ Le projet est porté côté russe par l'institut de recherche scientifique et de conception des technologies énergétiques N.A. Dollezhal, rattaché à NIKIET.

²⁵⁹ Innovation Projects Engineering Company (IPEC)

²⁶⁰ Charles Digges, « Russian Defense Ministry Confirms Portable Nuclear Reactor Development », *Bellona*, 6 novembre 2015, <https://bellona.org/news/nuclear-issues/2015-11-russian-defense-ministry-confirms-portable-nuclear-reactor-development>.

²⁶¹ Pakistan Defence. « Small Nuclear Power Reactors », 18 janvier 2017. <https://defence.pk/threads/small-nuclear-power-reactors.473115/>.

²⁶² Janis Kluge et Paul Michael, *Russia's Arctic Strategy through 2035* (German Institute for International and Security Affairs, Berlin : 2020).

²⁶³ Tiziana Melchiorre, *The Akademik Lomonosov and the Arctic legal regime geopolitics versus international law* (University of Amsterdam, Amsterdam :2022).

5. Conclusion

- La Russie **développe** des réacteurs nucléaires mobiles de faible puissance **depuis l'époque soviétique** pour la propulsion navale et le développement des territoires isolés.
- La filière est dominée par deux entreprises, **Afrikantov et Nikiet**, qui s'emploient à remobiliser des designs déjà opérationnels pour construire des centrales SMR.
- Elle dispose déjà de **deux SMR en fonction sur l'Academic Lomonosov (KLT-40S)**, une centrale nucléaire flottante, actuellement en service dans le port de Pevek en Sibérie
- La priorité est mise sur **le développement de l'Arctique russe**, pour maintenir l'unité territoriale, asseoir son contrôle sur la route maritime du Nord-Est et renforcer ses forces militaires opérationnelles dans la région
- Les SMR offrent la possibilité à Rosatom de **diversifier son offre vers des pays émergents et en développement** qui jusqu'ici n'étaient pas en mesure de se nucléariser. Avec à la clé la création ou le renforcement de **liens stratégiques et diplomatiques en Afrique, en Asie ou au Moyen-Orient.**



RÉPUBLIQUE POPULAIRE DE CHINE

La Chine est sans nul doute l'acteur le plus dynamique aujourd'hui sur la scène électronucléaire, malgré son retard. En seulement vingt ans, elle est parvenue à étendre son parc nucléaire de 9 à 56 réacteurs et à indigéniser une partie des technologies nécessaires à son autonomie. Pour autant, ses performances à l'export restent modestes et ne lui permettent pas de s'imposer dans le champ de la gouvernance nucléaire mondiale. Dans ce contexte, les SMR seraient une option prometteuse pour **lui ouvrir les portes d'un marché qui jusqu'ici lui restait fermé**, mais aussi un atout dans **la consolidation de son unité territoriale** et sa lutte contre une crise écologique qui fédère les oppositions^{264, 265, 266}.

1. Une réponse polyvalente aux enjeux intérieurs et extérieurs

À partir du 12^e plan quinquennal en 2011, les « **petits systèmes énergétiques nucléaires** ²⁶⁷ » sont progressivement rentrés dans la **stratégie énergétique et écologique de Beijing**²⁶⁸. Les objectifs sont prioritairement centrés sur des enjeux intérieurs : l'autonomie énergétique, la décarbonation, l'assainissement de l'air, la désalinisation, la propulsion navale, l'exploitation offshore, le développement des territoires insulaires et la réduction des inégalités énergétiques entre les provinces. Depuis, ils ont été reconnus par les 13^e et 14^e plans quinquennaux (2016 et 2022) comme **une industrie stratégique** pour la compétitivité économique, l'autonomie énergétique et la réduction de la dépendance technologique vis-à-vis de l'occident^{269, 270, 271}.

Les objectifs de Pékin pour les SMR ont donc évolué. Jusqu'au 13^e plan quinquennal, l'objectif était avant tout de **répondre à ses enjeux intérieurs**, notamment sociaux et

²⁶⁴ Philipp Andrews-Speed, *Nuclear Power in China : its role in national energy policy* (The Oxford Institute for energy studies, Oxford : 2023).

²⁶⁵ World Nuclear Association, « Nuclear Power In China », 3 mai 2024, <https://world-nuclear.org/information-library/Country-profiles/countries-a-f/china-nuclear-power>.

²⁶⁶ Philippe Copinschi, Pierre Laboué et Teva Meyer, *Les stratégies nucléaires civiles de la Chine, des États-Unis et de la Russie* (Observatoire de la sécurité des flux et des matières énergétiques, Paris : 2020).

²⁶⁷ Le terme est repris du 13^e plan quinquennal de 2016

²⁶⁸ China's National People's Congress, « CHINA: 12th Five-Year Plan (2011-2015) for National Economic and Social Development », mars 2011, <https://policy.asiapacificenergy.org/node/37>.

²⁶⁹ China's National People's Congress, « The 13th five-year plan for economic and social development of the people's republic of China », mars 2016, <https://en.ndrc.gov.cn/policies/202105/P020210527785800103339.pdf>.

²⁷⁰ China's National People's Congress, « The 14th Five-Year Plan of the People's Republic of China », mars 2021, <https://policy.asiapacificenergy.org/sites/default/files/14th%20Five-Year%20Plan%20of%20the%20People%E2%80%99s%20Republic%20of%20China%20%E2%80%94%20Fostering%20High-Quality%20Development.pdf>.

²⁷¹ The State Council of The People's Republic of China, *The National Medium- and Long-Term Program for Science and technology Development (2006 - 2020)* (People's republic of China, Beijing : 2006).

environnementaux. Mais à partir du 14^e plan quinquennal, c'est explicitement le gain d'autonomie qui est recherché, face à un **environnement extérieur que Pékin considère de plus en plus instable**, notamment dans sa relation avec les États-Unis ^{272, 273, 274}.

Du côté des acteurs, les projets se partagent entre les trois entreprises d'État qui administrent le nucléaire civil chinois : **China National Nuclear Corporation (CNNC)**, **China General Nuclear Power Corporation (CGNPC)** et **China Power Investment Corporation (SPIC)**. Trois entreprises qui évoluent en concurrence l'une de l'autre, mais sous le contrôle du gouvernement central²⁷⁵.

Tableau 5 : Liste des projets SMR à eau légère et HTGR les plus avancés en République Populaire de Chine

Design	Type	Designer	Configuration
ACPR50S	PWR	CGNPC	Maritime
ACP100S	PWR	CNNC	Maritime
ACP100	PWR	CNNC	Terrestre
DHR400	PWR	CNNC	Terrestre
HAPPY200	PWR	SPIC	Terrestre
CAP200	PWR	SPIC	Terrestre
HTR-PM	HTGR	Tsinghua University	Terrestre
HTR-10	HTGR	Tsinghua University	Terrestre
NHR200-II	PWR	Tsinghua University & CGNPC	Terrestre

Parmi ces entreprises, **la CNNC semble la plus avancée** avec son réacteur à eau légère **ACP100 (Linglong One)** reconnu comme **stratégique par le 12^e plan quinquennal**. En 2016, il est devenu le premier SMR certifié par l'AIEA et le régulateur chinois NDRC (Commission nationale du Développement et de la Réforme)²⁷⁶. Un premier module est déjà assemblé et devrait rentrer en exploitation dans les prochaines années (voir annexe 12)^{277, 278, 279}.

²⁷² Daniel T. Ingersoll et Mario D. Carelli, *Handbook Of Small Modular Nuclear Reactors* (Woodhead Publishing, Cambridge : 2021).

²⁷³ Caisse des Dépôts, *12^e Plan Quinquennal Chinois : marché(s) du carbone en vue* (Caisse des Dépôts, Paris : 2011).

²⁷⁴ Tim Rühlig, « La Stratégie Technologique de Xi », *Le Grand Continent*, 5 avril 2023, <https://legrandcontinent.eu/fr/2023/04/05/la-strategie-technologique-de-xi/>.

²⁷⁵ Philippe Copinschi, Pierre Laboué et Teva Meyer, *Les stratégies nucléaires civiles de la Chine, des États-Unis et de la Russie* (Observatoire de la sécurité des flux et des matières énergétiques, Paris : 2020).

²⁷⁶ L'ACP100 est le premier SMR à acquérir la certification GRSR de l'AIEA, attestant de la conformité du design avec les standards internationaux de sécurité nucléaire.

²⁷⁷ L'ACP100 a été déployé sur site en août 2023, mais CNNC n'a communiqué aucune date pour sa mise en marche.

²⁷⁸ CNNC, « Development and Construction of ACP100 », AIEA, 5 septembre 2023.

²⁷⁹ Peter Lobner, « China's CNNC ACP100Z and ACP25S Floating Nuclear Power Plant (FNPP) Concepts », 2021.

Du côté de **SPIC et CGNPC**, peu d'informations sont disponibles depuis 2019. Le HAPPY200 (SPIC) et l'ACPR50S accumulent les retards, tandis que le CAP200 (SPIC) semble **rester à l'état de concept** ^{280,281,282}.

2. Quelles perspectives d'exportation ?

Si la Chine connaît un développement nucléaire sans pareil sur le plan intérieur, **ses résultats à l'export restent mitigés** ²⁸³. Pékin peine encore à se démarquer des produits russes et ne dispose pas de capacités de retraitement suffisamment développées pour inclure la gestion du combustible usé dans ses propositions commerciales ²⁸⁴. Pour autant l'exportation reste **une priorité pour accroître son influence** sur la gouvernance nucléaire mondiale. En cela, les SMR offriraient l'opportunité à la Chine de se positionner sur un segment émergent à fort potentiel, à partir de technologies qu'elle est en voie de maîtriser ^{285,286}.

Parmi les candidats **l'ACP100 de CNNC est** envisagé comme un produit phare pour promouvoir les compétences de la Chine. Mais c'est surtout avec **les réacteurs haute température (HTGR)** que Pékin entend se distinguer de la concurrence. Un segment où elle **creuse l'écart** et qui lui permettrait de se positionner sur des marchés en recherche d'une solution décarbonée et polyvalente pour des besoins énergétiques et industriels (voir annexe 16) ^{287; 288}. **Une priorité explicitée dans le 14^e plan quinquennal** pour un système énergétique moderne ²⁸⁹.

²⁸⁰ IAEA, *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments* (AIEA, Vienne : 2020).

²⁸¹ NEA, *The NEA Small Modular Reactor Dashboard* (OECD Nuclear Energy Agency, Washington : 2023).

²⁸² Peter Lobner, « China's CNNC ACP100Z and ACP25S Floating Nuclear Power Plant (FNPP) Concepts », 2021.

²⁸³ En 2024, seul le Pakistan disposait d'un réacteur nucléaire de conception chinoise.

²⁸⁴ World Nuclear Association, « Nuclear Power In China », 3 mai 2024. <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/china-nuclear-power>.

²⁸⁵ Aitong Li, Yahan Liu, et Zongyao Yu, « China's Nuclear Exports : Understanding The Dynamics Between Domestic Governance Reforms And International Market Competition », *Energy Research & Social Science* 103 (septembre 2023) : 103230, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103230>.

²⁸⁶ Charles Merlin, « Les petits réacteurs modulaires dans le monde : perspectives géopolitiques, technologiques, industrielles et énergétiques », IFRI, mai 2019.

²⁸⁷ Zhang Zuoyi, Wang Haitao, Dong Yujie et Li Fu, *Future Development of Modular HTGR in China after HTR-PM* (Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing : 2014).

²⁸⁸ IAEA, *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments* (AIEA, Vienne : 2020).

²⁸⁹ China's National People's Congress, « "14th Five-Year" Modern Energy System Planning », CDN, 2022, https://cdn.climatepolicyradar.org/navigator/CHN/2022/14th-five-year-plan-on-modern-energy-system-planning_5349101f7ca0284d6c6e9a1d73e3fdb7.pdf.

En 2024, plusieurs discussions seraient ouvertes, en vue de l'exportation potentielle de SMR avec, l'Égypte²⁹⁰, le Kenya²⁹¹, le Maroc²⁹², le Ghana²⁹³, le Soudan²⁹⁴, l'Indonésie, la Turquie²⁹⁵, l'Arabie saoudite²⁹⁶, la Jordanie²⁹⁷, la Thaïlande²⁹⁸ et les Émirats arabes unis²⁹⁹. La Chine entend par ailleurs profiter de son projet des nouvelles routes de la Soie (Belt and Road Initiative – BRI) pour élargir ses opportunités commerciales auprès des pays adhérents.

3. Un enjeu en mer de chine méridionale ?

En 2024, **il n'y a officiellement aucun projet de SMR à finalité militaire en Chine**. Pour autant, cette affirmation doit être nuancée par le **rapprochement opéré entre le secteur civil et militaire** depuis le premier mandat de Xi Jinping et le 13^e plan quinquennal qui évoque le caractère dual de l'industrie nucléaire civile^{300,301,302}. Mais le risque actuel n'est pas tant le développement d'un SMR militaire que **le détournement des concepts civils pour consolider l'espace territorial chinois**, selon les termes du 13^e plan quinquennal (2016).

En 2016, la CNNC et l'agence de sûreté nucléaire chinoise (NNSA) ont déclaré vouloir déployer **20 plateformes nucléaires flottantes en mer de Chine méridionale**. Un espace représentant

²⁹⁰ Enterprise, « China In Talks With Egypt To Provide Small-scale Nuclear Reactors », 15 juin 2017. <https://enterprise.press/stories/2017/06/15/china-in-talks-with-egypt-to-provide-small-scale-nuclear-reactors/>.

²⁹¹ Liu Caiyu, « Linglong-1 Reactor Attracts Global Attention », *The Global Times*, 6 septembre 2023, <https://www.globaltimes.cn/page/202309/1297689.shtml>.

²⁹² Liu Caiyu et Fan Wei, « Developing Countries Look To China In Push For Smaller Nuclear Reactors », *Energy Central*, 6 septembre 2023, <https://energycentral.com/news/developing-countries-look-china-push-smaller-nuclear-reactors>.

²⁹³ Ibid.

²⁹⁴ Meredith J. DeBoom, « Exporting the Nuclear 'China Model': 'Win-Win' Radioactive Development and the Geopolitics of Nuclear Energy in Africa », Conference: Fallout: Asian Networks of Nuclearity (Boulder, CO : 2024), DOI:10.13140/RG.2.2.32846.27202

²⁹⁵ World Nuclear Association, « Nuclear Power In China », 3 mai 2024, <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/china-nuclear-power>

²⁹⁶ Ali Ahmad, Reem Salameh, et M.V. Ramana, *Localizing nuclear capacity Saudi Arabia and small modular reactors* (Beyrouth : Issam Fares Institute for Public Policy and International Affairs, 2021) https://www.aub.edu.lb/ifi/Documents/publications/working_papers/2018-2019/20190708_localising_nuclear_capacity_KSA.pdf

²⁹⁷ World Nuclear Association, « Nuclear Power In Jordan », 28 mars 2024. <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/jordan>.

²⁹⁸ Liu Caiyu and Fan Wei, « Developing Countries Look To China In Push For Smaller Nuclear Reactors », *Global Times*, 5 septembre 2023. <https://www.globaltimes.cn/page/202309/1297624.shtml>.

²⁹⁹ World Nuclear Association, « Nuclear Power In China », 3 mai 2024. <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/china-nuclear-power>.

³⁰⁰ CNNC fait par ailleurs partie des dix groupes industriels de défense contribuant aux avancées militaires et un des bénéficiaires du fonds Junmin du ministère des Finances et l'administration nationale de la science, de la technologie et de l'industrie pour la défense nationale.

³⁰¹ Antoine Bondaz, *Un tournant pour l'intégration civilo-militaire en Chine* (Fondation pour la Recherche Stratégique, Paris : 2017).

³⁰² CNNC, « China Isotope & Radiation Corporation », 2020, <https://www1.hkexnews.hk/listedco/listconews/sehk/2023/0330/2023033004640.pdf>.

plus du quart du commerce mondial, au contour contesté par les pays limitrophes et revendiqué par la Chine populaire (voir annexe 15) ^{303,304}.

Si la CNNC et les autorités chinoises n'ont pas explicité leurs intentions, il est aisé de faire le lien avec **les bases militaires des îles Paracels et Spratleys**, déployées par Pékin dans les années 2010, en plein cœur des zones disputées. Leur nucléarisation serait à la fois un atout opérationnel, mais aussi **un moyen de dissuasion** face à tout belligérant soucieux des principes de sûreté nucléaire. Un prétexte par ailleurs pour **justifier la présence chinoise en toutes circonstances pour assurer une sûreté continue des installations**, suivant les principes de l'AIEA (voir annexe 07). Ce qui reviendrait de facto à une « **sacralisation** » **du contrôle de Beijing sur ces territoires et les voies maritimes attenantes**³⁰⁵.

Les interrogations portent tout particulièrement sur deux modèles de SMR : **l'ACP100S (CNNC)**³⁰⁶ et **l'ACPR50S (CGNPC)**³⁰⁷. Deux réacteurs flottants sont destinés au développement des zones côtières, insulaires et à l'alimentation des installations offshore. Les deux concepts auraient été certifiés par la NDRC en 2016, et des démonstrateurs seraient prévus dans les prochaines années. La CNNC notamment, envisage **deux prototypes sur le littoral du Fujian, dans le détroit de Taiwan**³⁰⁸.

4. Existe-t-il une convergence stratégique entre la Chine et les BRICS+ sur les SMR ?

À l'image d'Euratom pour l'Union européenne, il est permis d'imaginer que **les BRICS+**³⁰⁹ parviennent à **mutualiser leurs ressources et à harmoniser leurs standards**, pour s'autonomiser des technologies nucléaires en provenance des États-Unis ou de l'Union

³⁰³ Reuters, « China media again tout plans to float nuclear reactors in disputed South China Sea », 15 juillet 2016, <https://www.reuters.com/article/us-southPRCsea-ruling-PRC-nuclear-idUSKCN0ZVOUH/>.

³⁰⁴ China's National People's Congress, « The 13th five-year plan for economic and social development of the people's republic of China », mars 2016, <https://en.ndrc.gov.cn/policies/202105/P020210527785800103339.pdf>.

³⁰⁵ Jonathan Deemer ; Omar Pimentel ; Mi Jin Ryu, Miku Yamada ; Edward Jenner, « Research, Uncharted Waters : Assessing China's intentions to Deploy Floating Nuclear Power Plants in the South China Sea », Center fo Global Security (Juin 2023)

³⁰⁶ L'ACP100S est la variante maritime de l'ACP100/ Linglong One, déjà certifié et déployé sur la centrale de Changjiang.

³⁰⁷ Ibid.

³⁰⁸ World Nuclear Association, « Nuclear Power In China », 3 mai 2024. https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/china-nuclear-power#Russian_FNPP.

³⁰⁹ L'appellation BRICS+ fait référence au sommet annuel des BRICS, devenu BRICS+ en janvier 2024, réunissant des économies parmi les plus peuplées et les plus dynamiques au monde : l'Arabie saoudite, le Brésil, la Russie, l'Inde, la Chine, l'Afrique du Sud, l'Egypte, les Emirats arabes unis, l'Ethiopie et l'Iran. Ce groupe hétérogène, économiquement dominé par la Chine est régulièrement analysé comme un contre poids à l'ordre international et aux institutions financière hérité de la guerre froide.

européenne³¹⁰. Dans cette hypothèse, les BRICS+ pourraient devenir **un vecteur de développement technique et commercial pour la Chine, en coordination avec la Fédération de Russie**, avec l'adoption d'un concept commun de SMR, tel que furent imaginés les premiers réacteurs EPR (European Pressure Reactor) entre la France et l'Allemagne dans les années 1990³¹¹.

Il faut dire que **la Chine et la Russie affichent leur rapprochement sur le volet nucléaire depuis le début des années 1990**³¹² : La Russie en mettant à disposition son expérience, la Chine ses capacités d'investissements. Une coopération qui selon certaines communications officielles serait les prémices **d'une alliance nucléaire sino-russe** pour faire front commun face aux offensives occidentales sur les marchés³¹³. Mais **cette relation est en réalité bien plus déséquilibrée et précaire** que ne le laissent entendre les deux pays^{314, 315, 316, 317, 318}.

Si, la Chine est **un débouché commercial important pour Rosatom**, les entreprises chinoises ne verrait Moscou que comme un intermédiaire avant de devenir **une puissance nucléaire autonome et exportatrice**^{319, 320}. Ce déséquilibre transparait dans le champ des SMR où les interactions entre les deux pays sont finalement limitées.

En effet, malgré un protocole d'accord en 2014 entre Rosatom et CNNC pour l'ACP100S en mer de Chine, **l'implication de la Russie n'a toujours pas été confirmée**. Rosatom, en difficulté pour tenir ses engagements dans la baie de Chaunskaya, (voir Fédération de Russie, partie 2)

³¹⁰ Géococonfluences, « Les BR passent de 5 à 10 membres et deviennent les BRICS+ », <https://geoconfluences.ens-lyon.fr/actualites/veille/breves/elargissement-brics-2024> (page consultée le 16 juin 2024)

³¹¹ Paul Reuss, *L'épopée de l'Énergie Nucléaire : une histoire scientifique et industrielle* (Edp Sciences, Les Ulis : 2007).

³¹² En 2023, la Chine et la Russie se sont entendues sur un programme de coopération pour le développement de réacteurs à neutrons rapides et la production de combustible à base de plutonium. Cet accord fait suite à un précédent accord en 2018 pour la construction de centrales nouvelle génération 3+, et la fourniture de combustible innovant en Chine (NEI 2023).

³¹³ Le 13 mai 2024, les États-Unis ont adopté un embargo sur l'uranium enrichi russe. Dans le même temps, le groupe SAPPARO 5, réunissant le Canada, le Japon, la France, le Royaume-Uni et les États-Unis, s'est engagé à réduire l'influence de la Russie sur le marché du combustible nucléaire (Gouvernement du Canada 2023) (Boutin, L'administration Biden adopte un embargo sur l'uranium enrichi russe 2023). Préalablement en 2023, les États-Unis ont durci leur régime de non-prolifération à l'encontre de la Chine (Egan, et al. 2023)

³¹⁴ Gouvernement de la Fédération de Russie, « Russia and China sign a series of cooperation deals following intergovernmental talks », 2010, <http://archive.government.ru/eng/docs/13037/print/>.

³¹⁵ World Nuclear News, « Russia And China Outline Expanded Cooperation », 8 novembre 2016, <https://world-nuclear-news.org/Articles/Russia-and-China-outline-expanded-cooperation>.

³¹⁶ ANS. « Examining Russia And China In The Global Nuclear Energy Market », 17 octobre 2017, <https://www.ans.org/news/article-4405/examining-russia-and-china-in-the-global-nuclear-energy-market/>.

³¹⁷ Daniel Shats, *China-Russia Nuclear Industry Cooperation* (China Aerospace Studies Institute, Montgomery : 2024).

³¹⁸ Rosatom, « Strengthening Partnerships With China », 26 juin 2023. <https://rosatomnewsletter.com/2023/06/26/strengthening-partnerships-with-china-2/>.

³¹⁹ La seule implication chinoise sur le territoire russe est l'exploitation de la mine d'uranium de Krasnokamensk dont 50% de l'uranium extrait revient à la Chine. Un exemple éloquent du déséquilibre entre les deux pays, l'industrie russe étant dépendante de ses importations pour soutenir ses activités d'enrichissement.

³²⁰ Daniel Shats, *China-Russia Nuclear Industry Cooperation* (China Aerospace Studies Institute, Montgomery : 2024).

a dû mandater pour 226 millions de dollars l'énergéticien chinois Wison Heavy Industries pour lui fournir les coques de ses deux prochaines centrales flottantes. Depuis, **peu d'informations sont disponibles sur de possibles projets communs** en dehors du champ scientifique et universitaire^{321, 322, 323}.

Mis à part la Russie, **seule l'Afrique du Sud s'est engagée dans la course aux SMR**, et a exprimé son intérêt pour coopérer avec la Chine. En 2009, un protocole d'accord a été passé en ce sens avec l'université du Tsinghua (INET)³²⁴, mais **aucun des projets initiés par Pretoria n'ont abouti** à des avancées concrètes^{325, 326, 327}. Au sein des autres pays nucléarisés parmi les BRICS+, l'Inde, le Brésil et plus récemment l'Iran, aucune association portant sur des SMR n'a été officialisée.

Il apparaît donc que les BRICS+ ne soient qu'un **futur terrain de compétition entre la Russie et la Chine**, plutôt qu'un bloc de coopération animé par des objectifs partagés. Une compétition qui risque de s'affirmer dans les années à venir au fur et à mesure que le fragile équilibre entre Moscou et Beijing va s'éroder.

5. Conclusion

- La République Populaire de Chine envisage le développement de petits systèmes énergétiques depuis le début des années 2010 pour accélérer sa transition écologique, consolider son développement et réduire sa dépendance aux importations d'énergie.
- Elle dispose déjà d'un réacteur HTGR opérationnel et devrait prochainement commencer l'exploitation d'un SMR à eau légère sur l'île du Hainan.
- Son avancée, notamment sur les SMR HTGR, pourrait lui permettre de se distinguer de la concurrence internationale et se positionner en force sur le marché international.

³²¹ Jonathan Deemer et al., *Uncharted Waters: Assessing China's intentions to Deploy Floating Nuclear Power Plants in the South China Sea* (Center for Global Security Research, Lawrence Livermore National Laboratory : 2023).

³²² World Nuclear News, « Construction Starts On Russia's Next Floating Nuclear Power Plant », 31 août 2022, <https://world-nuclear-news.org/Articles/Construction-starts-on-Russia-s-next-floating-nucl>.

³²³ Daniel Shats, *China-Russia Nuclear Industry Cooperation* (China Aerospace Studies Institute, Montgomery : 2024).

³²⁴ Cet accord prévoyait notamment l'édification d'une chaîne de valeur commune autour des HTGR.

³²⁵ David Dalton, « South Africa And China Sign PBMR Cooperation Agreement », *Nucnet*, 30 mars 2009, <https://www.nucnet.org/news/south-africa-and-china-sign-pbmr-cooperation-agreement>.

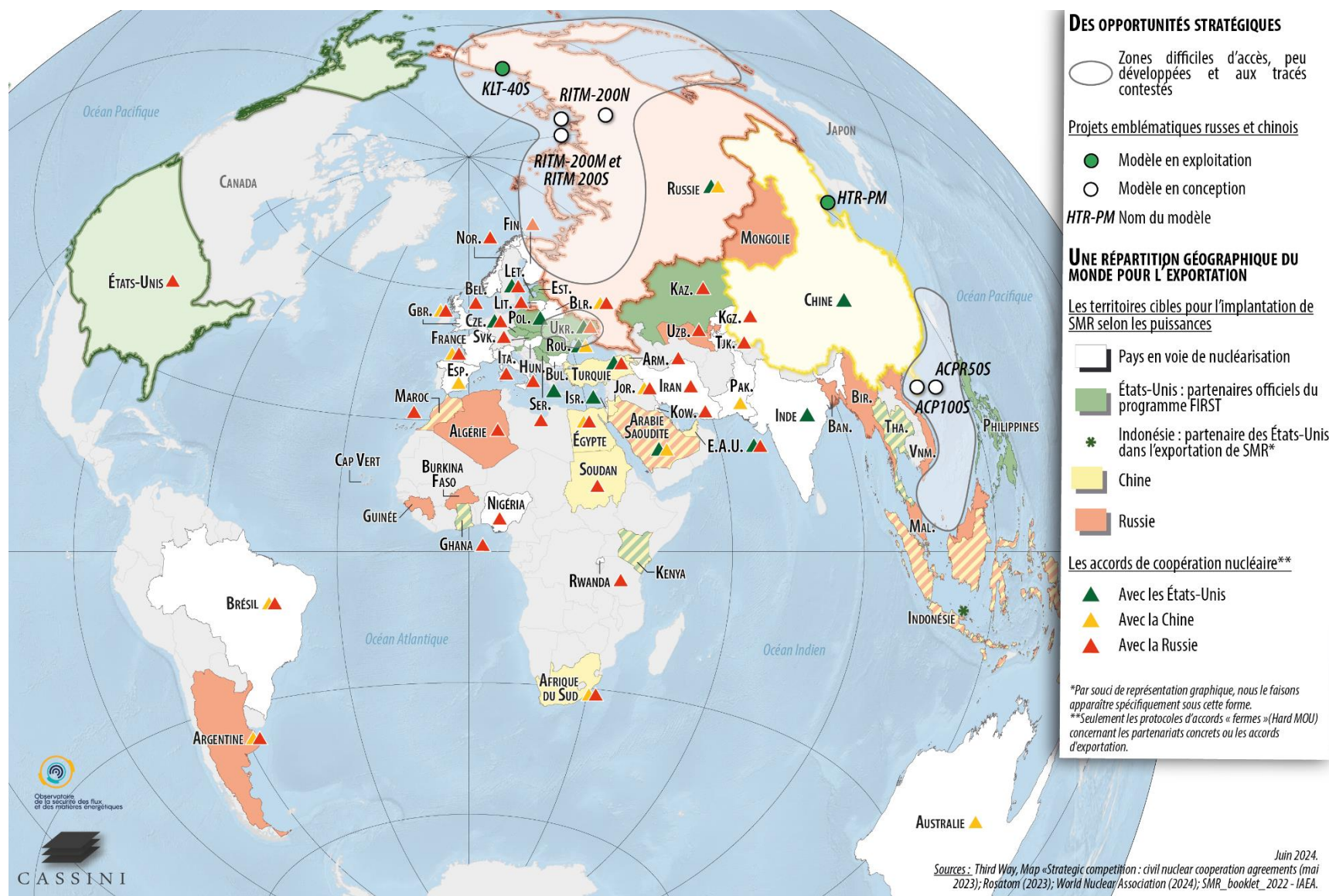
³²⁶ World Nuclear News, « Partnership Aims To Drive Forward HTMR-100 SMR In South Africa », 10 avril 2024, <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Partnership-aims-to-drive-forward%C2%AOHTMR-100-SMR-in>.

³²⁷ NEI, « South Africa's Niasa Looks At Nuclear Financing And SMRs - Nuclear Engineering International », 22 mai 2020, <https://www.neimagazine.com/news/south-africas-niasa-looks-at-nuclear-financing-and-smrs-7936871/>.



- Malgré une collaboration affichée entre la Chine et la Russie, Beijing priorise le développement de ses propres technologies, en vue de devenir une puissance nucléaire autonome et concurrente de Moscou.
- La Chine envisagerait le déploiement de barges nucléaires flottantes en mer de Chine méridionale et dans le détroit de Taiwan, pour verrouiller son contrôle sur ces zones maritimes revendiquées et contestées.

Carte 4 – Chine, Russie et États-Unis : rivaux et partenaires dans le secteur des SMR ?





UNION EUROPÉENNE

Bien plus qu'aux États-Unis, en Russie ou en Chine, **l'acceptation sociale et politique est restée un frein à la relance de l'industrie nucléaire en Europe**. L'Union est historiquement divisée sur le sujet, entre ceux qui voient dans l'atome une source d'énergie décarbonée et d'indépendance et ceux pour qui le nucléaire est synonyme de risque environnemental et humain. Une dichotomie qui s'est cristallisée dans **les divisions entre l'Alliance du nucléaire³²⁸ et les Amis des renouvelables³²⁹**. Particulièrement visible dans le plan REPowerEU³³⁰, où le nucléaire, trop controversé, a dû être retiré du texte pour parvenir à un compromis³³¹ (Judah, et al. 2023)³³² (Meyer, Géopolitique du Nucléaire 2023).³³³ Pourtant, **l'Europe n'est pas restée inactive sur les SMR**.

1. Quelles réflexions politiques pour les SMR en Europe ?

En juin 2021, la Commission européenne avait exprimé son intérêt en lançant un **prépartenariat pour le développement de SMR européen³³⁴**. Un atelier qui a abouti à un document d'orientation qualifiant les SMR de solution sûre, abordable et flexible pour répondre à la multitude de besoins de la transition énergétique, sous réserve d'adapter le cadre réglementaire, d'engager les parties prenantes et d'établir une chaîne de valeur européenne pour mutualiser les ressources, les coûts et les risques³³⁵.

Un engagement renouvelé deux ans plus tard dans le **Net Zero Industry Act**, où les SMR sont identifiés comme **une technologie clé pour la transition énergétique³³⁶**. Cette appellation ouvre la porte à une révision du cadre réglementaire, avec une simplification des processus

³²⁸ France, Belgique, Bulgarie, Croatie, Estonie, Tchéquie, Finlande, Hongrie, Pays-Bas, Pologne, Roumanie, Slovaquie, et la Slovénie (l'Italie en observateur et le Royaume-Uni en tant qu'invité) (Ministère de la transition écologique 2023)

³²⁹ Allemagne, Autriche, Belgique, Danemark, Grèce, Irlande, Italie, Luxembourg, Malte, Pays-Bas et Portugal

³³⁰ Le plan REPowerEU adopté dans le sillage de la guerre en Ukraine visait à accélérer la transition énergétique de l'Union pour réduire sa dépendance aux énergies fossiles importées, notamment de Russie (Conseil européen 2024).

³³¹ Benjamin Frémeaux et Cécile Maisonneuve, « Souveraineté énergétique européenne : en finir avec le nucléaire honteux », *Institut Montaigne*, 17 mars 2023, <https://www.institutmontaigne.org/expressions/souverainete-energetique-europeenne-en-finir-avec-le-nucleaire-honteux>.

³³² Ben Judah, Rachel Rizzo, Théophile Pouget-Abadie, Jonah Allen, et Francis Shin, « How To Strike A Grand Bargain On EU Nuclear Energy Policy » , *Atlantic Council*, 16 octobre 2023, <https://www.atlanticcouncil.org/in-depth-research-reports/report/how-to-strike-a-grand-bargain-on-eu-nuclear-energy-policy/>.

³³³ Teva Meyer, *Géopolitique du Nucléaire : pouvoir et puissance d'une industrie duale* (Cavalier Bleu, Paris : 2023).

³³⁴ Nuclear Europe, « European SMR Pre-Partnership », s. d. <https://www.nucleareurope.eu/project/european-smr-pre-partnership/>

³³⁵ Ibid.

³³⁶ Tel que formulé par la Commission européenne : « pour produire de l'énergie à partir de processus nucléaires avec un minimum de déchets dans le cycle du combustible ».

de certification, à l'ouverture de marchés publics et à un engagement européen pour la formation et la coordination des industries.

Plus récemment, l'annonce de **l'Alliance des SMR**, le 6 février 2024, est venue donner un caractère plus concret à l'engagement initié par la Commission en 2021³³⁷. Cette alliance constituée d'entreprises privées, d'acteurs publics, d'institutions scientifiques, financières et de représentants de la société civile, devrait poser les bases d'un environnement favorable pour **le déploiement des premiers SMR européens entre 2030 et 2040**^{338, 339} (Voir annexe 2).

Cette série d'annonces et d'engagements porte à croire qu'il existe donc **une distinction entre le nucléaire conventionnel et les SMR**, à l'avantage de ces derniers. Mais cet **engagement à deux vitesses** pose néanmoins question, car **les SMR restent partie intégrante d'une chaîne de valeur** qui enregistre un déclin depuis 2011 (Voir partie II – Une faisabilité encore incertaine).

Enfin, des incertitudes perdurent, à commencer par **la question du financement qui n'a toujours pas été tranchée** en juin 2024^{340, 341}. Quant à **l'alliance des SMR**, ses modalités de fonctionnement et son plan d'action **restent en construction**. Dix projets SMR auraient été présélectionnés en vue d'une première évaluation dont les résultats seront communiqués à partir de septembre 2024, en amont du plan d'action définitif au premier trimestre 2025 (voir annexe 14)^{342, 343}.

³³⁷ Ludovic Dupin, « La Commission européenne crée l'alliance des SMR et acte le caractère stratégique du nucléaire », *SFEN*, 13 février 2024, <https://www.sfen.org/rgn/la-commission-europeenne-cree-lalliance-des-smr-et-acte-le-caractere-strategique-du-nucleaire/>.

³³⁸ Ibid.

³³⁹ Paul Messad, « Nucléaire : L'alliance Sur les SMR Dévoile Sa Feuille de Route Pour les Prochains Mois », *Euractiv*, 6 juin 2024, <https://www.euractiv.fr/section/energie-climat/news/nucleaire-lalliance-sur-les-smr-devoile-sa-feuille-de-route-pour-les-prochains-mois/>.

³⁴⁰ Jonathan Packroff, et Paul Messad, « NZIA : L'UE Adopte Sa Loi Pour Stimuler une Industrie Européenne Propre », *Euractiv*, 7 février 2024, <https://www.euractiv.fr/section/energie-climat/news/nzia-lue-adopte-sa-loi-pour-stimuler-une-industrie-europeenne-propre/>.

³⁴¹ CEA, *Answer to the European Consultation* (CEA, Paris : 2023).

³⁴² Paul Messad, « Nucléaire : L'alliance Sur les SMR Dévoile Sa Feuille de Route Pour les Prochains Mois », *Euractiv*, 6 juin 2024, <https://www.euractiv.fr/section/energie-climat/news/nucleaire-lalliance-sur-les-smr-devoile-sa-feuille-de-route-pour-les-prochains-mois/>.

³⁴³ European Industrial Alliance on SMRs, *European Industrial Alliance on SMRs 1st General Assembly meeting* (Eu, Bruxelles, 2024).

Tableau 6 : Projets de SMR HTGR et LWR parmi les plus avancés dans l'Union européenne

Design	Type	Designer	Pays	Configuration
NUWARD	PWR	EDF	France	Terrestre
CALOGENA	LWR (PWR ou BWR)	Corgé	France	Terrestre
JIMMY	HTGR	JIMMY ENERGY SAS	France	Terrestre
HTGR-POLA	HTGR	NCBJ	Pologne	Terrestre
ROLLS-ROYCE SMR	PWR	Rolls-Royce SMR Ltd.	Royaume- Uni	Terrestre
U-BATTERY	HTGR	Urenco	Royaume- Uni	Terrestre

Quelle est la place des Britanniques dans le débat en Europe depuis le Brexit ?

En marge de l'UE, le Royaume-Uni aussi a des ambitions pour les SMR, nourries depuis 2015 par **Rolls-Royce**³⁴⁴. Le pays a l'ambition de passer ses capacités nucléaires de 6 GWe à 24 GWe, et de se positionner en leader de l'innovation nucléaire d'ici 2050³⁴⁵,
346,347, 348 .

Malgré le Brexit, certaines coopérations perdurent avec l'UE sur le volet nucléaire et les SMR, notamment dans la recherche, le développement, le transfert de technologies et d'informations³⁴⁹. Le Royaume-Uni a par ailleurs un statut d'invité dans l'Alliance du nucléaire et est indirectement présent dans l'Alliance des SMR par l'intermédiaire de l'entreprise anglo-germano-néerlandaise Urenco, sous leadership néerlandais³⁵⁰.

Pour autant, cette collaboration apparaît secondaire pour Londres qui semble privilégier sa relation avec le Canada et les États-Unis. Depuis 2019, trois protocoles d'accords ont été signés entre les trois pays en vue d'harmoniser leurs normes et leurs

³⁴⁴ En 2017, Rolls-Royce a pris la tête d'un consortium, the UK SMR consortium, rassemblant Assystem, SNC Lavalin, Wood, Arup, Laing O'Rourke, BAM Nuttall, Siemens, the National Nuclear Laboratory and the Nuclear AMRC.

³⁴⁵ NEI, « UK Government Announces Support For Nuclear Innovation », 11 décembre 2017, <https://www.neimagazine.com/news/uk-government-announces-support-for-nuclear-innovation-5999434/>.

³⁴⁶ UKRI, « UK Government Invests £ 215 Million Into Small Nuclear Reactors », 19 novembre 2020, <https://www.ukri.org/news/uk-government-invests-215-million-into-small-nuclear-reactors/>.

³⁴⁷ Nuclear ARMC, Admin, « Government Proposes Support For UK SMR », 19 juillet 2019, <https://www.energyamrc.co.uk/industry/uksmr-iscf-support/>.

³⁴⁸ Department for Energy Security, *Civil Nuclear Roadmap to 2050* (United Kingdom Parliament, London : 2024).

³⁴⁹ Journal Officiel de l'Union européenne, « Accord de coopération entre le gouvernement du Royaume-Uni de Grande Bretagne et d'Irlande du Nord et la Communauté Européenne de l'Énergie Atomique relatif aux Utilisations sûres et pacifique de l'énergie nucléaire », 30 avril 2021.

³⁵⁰ Urenco, « Urenco To Lead SMR Working Group », 3 juin 2024, <https://www.urenc.com/news/global/2024/urenc-to-lead-smr-working-group>.

standards technologiques, en faveur d'une approche coordonnée pour des SMR ³⁵¹. Dans le même temps, le gouvernement britannique a accordé 4,23 millions de dollars à un projet mené par l'États-Unien X-Energy (Xe-100), sur le site de Cavendish en Angleterre.

Actuellement, plusieurs entreprises sont en lice pour équiper le pays d'une flotte de SMR : EDF, GE Hitachi, Holtec, NuScale, Rolls Royce et Westinghouse. Le résultat prévu pour le printemps 2024 devrait donner plus d'indications sur la direction prise par le Royaume-Uni³⁵². Pour autant, la collaboration avec l'UE semble ténue.

2. Va-t-on vers une massification industrielle et normative pour un SMR européen ?

En comparaison des industries russe, chinoise ou états-unienne, la mobilisation de l'UE a été plus tardive. Parvenir au lancement d'un SMR européen compétitif implique dès lors **l'accélération de la mise en œuvre d'une chaîne industrielle et d'un cadre législatif propice** aux SMR.

Cela passe d'abord par **le dépassement du stade de la R&D** vers la planification d'une technologie européenne techniquement et commercialement mature. Or les premiers travaux rendus publics de l'alliance des SMR restent de l'ordre du préliminaire et **bien éloignés des enjeux de production**, qui ne sont **pas anticipés avant 2030, voire 2040**³⁵³.

La question s'annonce d'autant plus épineuse qu'il reste des ambiguïtés sur le caractère prioritaire du dossier SMR en Europe. Si ce dernier est bien intégré dans le Net Zero Industry Act³⁵⁴, il n'est initialement pas considéré comme une technologie stratégique prioritaire³⁵⁵. Une subtilité supprimée dans la version définitive du texte, mais qui questionne l'engagement

³⁵¹ World Nuclear News, « Transatlantic Collaboration On SMR Regulation Expanded : Regulation & Safety-», 14 mars 2024, <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Transatlantic-collaboration-on-SMR-regulation-expa>.

³⁵² Ibid.

³⁵³ Paul Messad, « Nucléaire : L'alliance Sur les SMR Dévoile Sa Feuille de Route Pour les Prochains Mois », *Euractiv*, 6 juin 2024, <https://www.euractiv.fr/section/energie-climat/news/nucleaire-lalliance-sur-les-smr-devoile-sa-feuille-de-route-pour-les-prochains-mois/>.

³⁵⁴ Le Net Zero Industry Act est une initiative de l'Union européenne, intégré au Green Deal, visant à stimuler la production européenne de technologies nécessaires à la transition bas carbone, pour répondre à 40% des besoins annuels européens d'ici 2030.

³⁵⁵ Paul Messad, « Paris Veut L'intégration Complète du Nucléaire Dans le Net-Zero Industry Act », *Euractiv*, 24 mars 2023, <https://www.euractiv.fr/section/energie-climat/news/paris-veut-lintegration-compleete-du-nucleaire-dans-le-net-zero-industry-act/>.

concret des instances européennes et les États membres, considérant le poids en ressource et en investissement que représentent les secteurs initialement désignés comme stratégiques (voir annexe 13)³⁵⁶.

Enfin, se pose la question du cadre législatif. Le projet **HARMONISE**, financé par Euratom vise justement à sortir de l'approche prescriptive dominante, pour aller **vers plus de performance** dans les processus de certification, de validation et de contrôle, partagé entre les régulateurs nationaux et la Commission européenne³⁵⁷. Lancés en juin 2022, **les résultats préliminaires ne devraient pas être disponibles avant juin 2025**³⁵⁸.

L'Union accuse donc un retard qu'elle peine à rattraper, doublé d'une ambiguïté sur son engagement concret en faveur de la filière. Ce retard apparaît d'autant plus critique au vu de l'entrée en scène d'acteurs états-uniens sur le marché européen. En effet, **Westinghouse** a notamment signé un protocole d'accord avec la Belgique, l'Italie et la Roumanie pour former un consortium pour les SMR, **en dehors du cadre de l'UE**³⁵⁹. En parallèle, **NuScale** s'est d'ores et déjà positionné en Pologne, en Roumanie, en Bulgarie et en Slovaquie pour déployer ses propres technologies³⁶⁰. Concomitamment aux efforts de Bruxelles, **il existe donc un risque de dilution des efforts européens**, corrélé à la pénétration du marché par des acteurs américains qui multiplient les partenariats pour imposer son savoir-faire, avant de laisser toute possibilité à la filière européenne de murir^{361, 362}.

³⁵⁶ Council of the European Union, « Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL » février 2024.

³⁵⁷ ECA, « Special Report : Nuclear Safety In The EU, The Commission's Role », 2020, <https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/nuclear-safety-3-2020/en/>.

³⁵⁸ Commission européenne, Cordis.Europa.Eu Cordis, « Towards Harmonisation In Licensing Of Future Nuclear Power Technologies In Europe », 28 octobre 2022, <https://cordis.europa.eu/project/id/101061643/fr>.

³⁵⁹ SCK CEN, « Des Leaders En Technologie des Métaux Lourds Liquides Unissent Leurs Forces Pour Déployer Les Petits Réacteurs Modulaires Refroidis Au Plomb », 8 novembre 2023, <https://www.sckcen.be/fr/nouvelles/des-leaders-en-technologie-des-metaux-lourds-liquides-unissent-leurs-forces-pour-deployer-les-petits-reacteurs-modulaires-refroidis-au-plomb>.

³⁶⁰ NuScale, « Projects | NuScale Power », s. d., <https://www.nuscalepower.com/en/projects>.

³⁶¹ Anne-Sophie, « Nucléaire : Belgique, Italie et Roumanie S'unissent Pour Accélérer la Recherche Sur les Petits Réacteurs Modulaires », *Euractiv*, 9 novembre 2023, <https://www.euractiv.fr/section/energie-climat/news/nucleaire-belgique-italie-et-roumanie-sunissent-pour-accelerer-la-recherche-sur-les-petits-reacteurs-modulaires/>.

³⁶² SCK CEN, « Des Leaders En Technologie des Métaux Lourds Liquides Unissent Leurs Forces Pour Déployer Les Petits Réacteurs Modulaires Refroidis Au Plomb », 8 novembre 2023, <https://www.sckcen.be/fr/nouvelles/des-leaders-en-technologie-des-metaux-lourds-liquides-unissent-leurs-forces-pour-deployer-les-petits-reacteurs-modulaires-refroidis-au-plomb>.

3. Existe-t-il une pensée duale autour des SMR en Europe ?

À l'heure actuelle, il **n'y a pas eu de déclarations d'États membres de l'UE sur un possible usage dual des SMR**. De même, au sein des instances européennes, aucune évocation officielle n'a été faite sur un usage militaire³⁶³. **Le sujet n'est pas pour autant inexistant** et des réflexions sont en cours sur la possibilité, en Europe et dans le monde, de mobiliser des technologies énergétiques innovante, possiblement des SMR, pour autonomiser des formes armées. Pour autant **ces réflexions restent préliminaires**³⁶⁴.

Cette absence de pensée duale au sein de l'Union pourrait s'expliquer par les difficultés de la filière à s'imposer dans les instances européennes et auprès de l'opinion publique, car l'acceptation reste fragile. En l'état, le sujet n'est ni à l'agenda de l'Alliance des SMR, ni de la Commission européenne, ni des principaux projets en développement au sein de l'Union européenne.

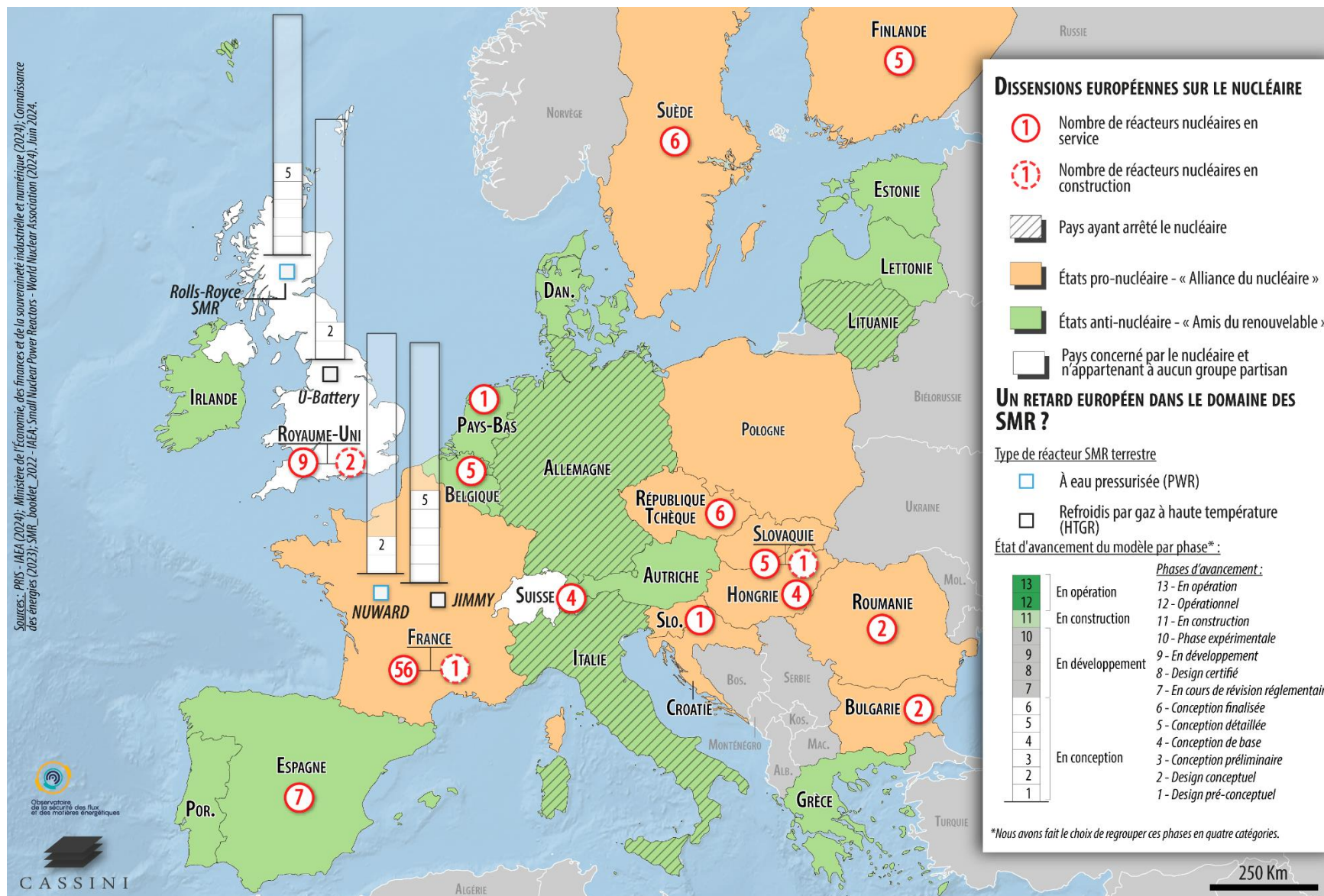
4. Conclusion

- L'Union européenne envisage une approche coordonnée pour le développement de SMR européens depuis 2021.
- En 2024, l'Union a adopté le Net Zero Industry Act et lancé l'Alliance des SMR, deux initiatives pour mettre en place un cadre légal et industriel favorable à l'édification d'une filière européenne.
- Malgré un retour en grâce, le nucléaire reste un sujet clivant qui tend à minorer l'engagement politique, notamment en matière d'arbitrage avec les énergies renouvelables.
- Des incertitudes perdurent sur la capacité de l'Union à rattraper son retard, au vu des avancées actuelles et du gain d'influence des entreprises états-uniennes sur le marché européen.
- La dimension duale des SMR reste embryonnaire dans la réflexion européenne et totalement absente des travaux de l'Alliance des SMR.

³⁶³ Commission européenne « Commission To Ally With Industry On Small Modular Reactors », 9 février 2024, https://energy.ec.europa.eu/news/commission-ally-industry-small-modular-reactors-2024-02-09_en.

³⁶⁴ European Defence Fund, « Energy Independent and Efficient Deployable Military Camps », 2021, https://defence-industry-space.ec.europa.eu/system/files/2023-01/Factsheet_EDF21_INDY.pdf

Carte 5 – L'Europe, une attitude mitigée sur le nucléaire



Conclusion générale

Malgré des incertitudes persistantes, les SMR s'imposent dans la réflexion stratégique des grandes puissances nucléaires. Les États-Unis, la Russie et la Chine multiplient les initiatives pour créer les bases d'un environnement compétitif pour leurs industries et s'imposer sur ce marché à haute valeur stratégique. Face à eux, l'Union européenne tente de rattraper son retard, en dressant les contours d'une filière autonome, au service de sa transition énergétique. Mais il est encore trop tôt pour affirmer que les SMR vont rentrer dans notre quotidien. Les gages de compétitivité restent insuffisants et les faiblesses de la chaîne de valeur sont encore trop saillantes. Le coût, notamment, reste un facteur d'incertitude, car peu d'informations permettent d'établir avec certitude le montant réel des projets actuellement en fonctionnement ou à un stade de développement avancé, notamment en Russie et en Chine³⁶⁵. Tandis que les estimations tendent à annoncer des valeurs supérieures à celles avancées par les constructeurs, avec une tendance à la hausse d'année en année³⁶⁶. Un constat qui tend à détourner les investisseurs, questionne les modalités de financement et l'engagement de l'État pour soutenir la filière avant de partir à des économies d'échelles.

Malgré tout, il est raisonnable de penser que les SMR trouveront des applications dans le champ militaire et stratégique, en dehors de la propulsion. Aux États-Unis, le Département de la Défense s'est déjà positionné comme un moteur de leur développement, explicitement à des fins militaires. La Russie et la Chine quant à elles planifient la nucléarisation de zones isolées, mais non moins stratégiques, pour asseoir leur souveraineté sur des territoires, leurs ressources et les flux attenants.

Enfin, des questions restent en suspens sur les garanties d'encadrement des matières nucléaires et la gestion du combustible. Car les SMR ouvrent la porte à des usages inédits, hétéroclites et déconcentrés du combustible et de ses déchets, sous des formes variées à des concentrations supérieures à 5% d'enrichissement. Si le détournement des SMR à des fins de prolifération semble minime, il n'est pas pour autant inexistant et complètement anticipé.

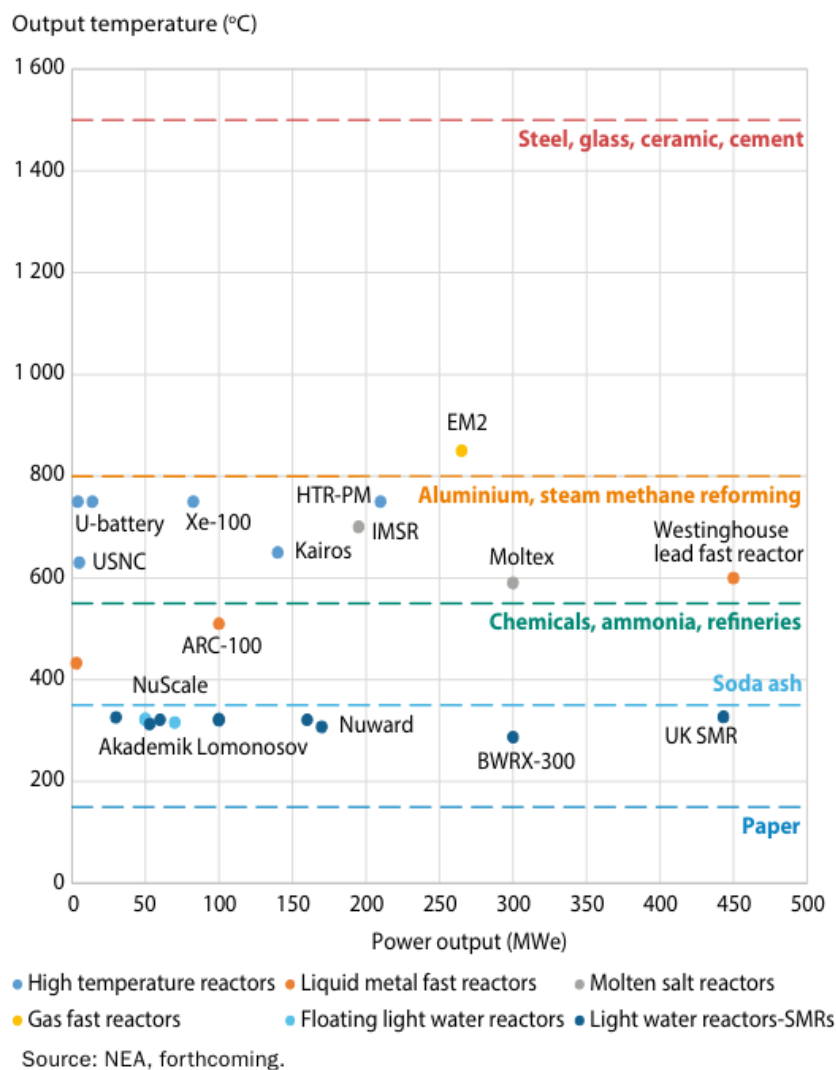
³⁶⁵ Nuclear Monitor, « SMR cost estimates, and costs of SMRs under construction », [SMR cost estimates, and costs of SMRs under construction | Wise International](#) (page consultée le 17 juin 2024)

³⁶⁶ David Schlissel ; Dennis Wamsted, « Institute for Energy Economics and Financial Analysis », Small Modular Reactors Still Too Expensive, Too Slow and Too Risky », Mai 2024



ANNEXES

Annexe 1 : Capacités électriques et thermiques des SMR et usages industriels associés

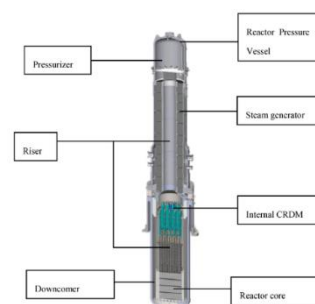
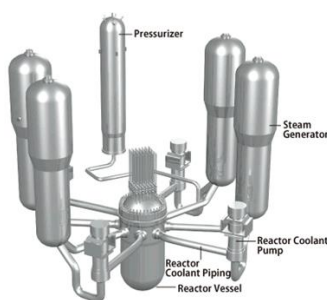


Annexe 2 : Présentation des huit groupes de travail de l'Alliance des SMR

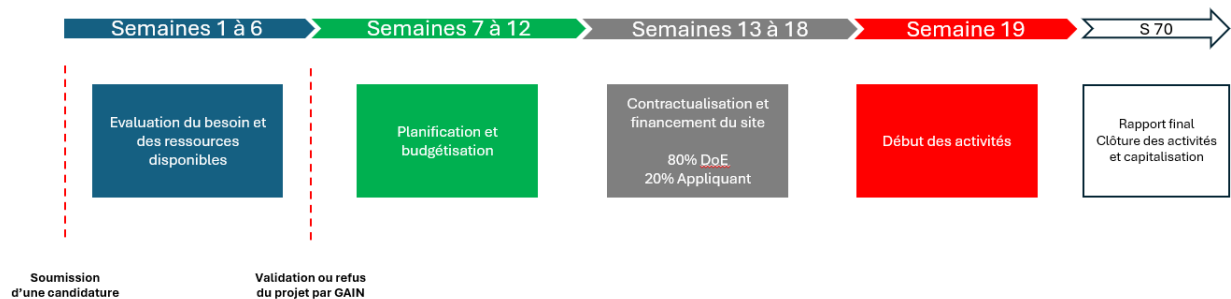
- Groupe 1 : application industrielle**
 Présidence : CEFIC, association européenne de l'industrie chimique
 Vice-présidence : Eurométaux, association européenne des producteurs de métaux
- Groupe 2 : recherches et développement**
 Présidence : SCK CEN, centre de recherche nucléaire belge
 Vice-Présidence : Framatome, fournisseur français d'équipements et de combustible pour centrales nucléaires.

- **Groupe 3 : chaines d’approvisionnement**
Présidence : Electricité de France (EDF)
Vice-présidence : Walter Tosto, fabricant d’équipements pour l’industrie chimique et pétrochimique.
- **Groupe 4 : compétences**
Présidence : Politecnico di Milano, école d’ingénieur
Vice-présidence : GIFEN, syndicat de l’industrie nucléaire française.
- **Groupe 5 : engagements publics**
Présidence : GMF, groupe européen des municipalités nucléarisées
Vice-présidence : Non confirmé en juin 2024.
- **Groupe 6 : sûreté nucléaire**
Présidence : Fortum, énergéticien d’État finlandais
Vice-présidence : Nuclearelectrica, exploitant nucléaire roumain.
- **Groupe 7 : cycles du combustible et gestion des déchets**
Présidence : Urenco, fournisseur européen d’uranium
Vice-présidence : Orano, fournisseur de combustible nucléaire français.
- **Groupe 8 : financements**
Présidence : CEZ, énergéticien tchèque
Vice-présidence : Non confirmé en juin 2024.

Annexe 3 : Comparaison entre un système d’alimentation en vapeur d’un réacteur à eau pressurisée Mitsubishi (gauche) et la coupe simplifiée d’un SMR (droite)



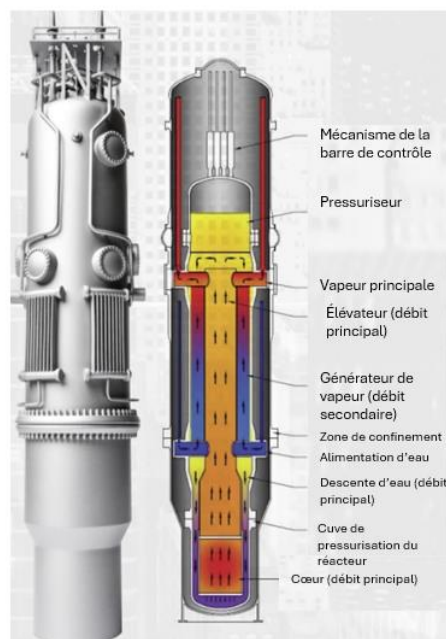
Annexe 4 : Procédure de candidature aux vouchers de La Passerelle pour l'accélération de l'innovation nucléaire



Annexe 5 : NuScale – VOYGR

Le VOYGR de NuScale est un réacteur modulaire à eau pressurisée de 77 MWe, destiné à la production d'électricité ou de chaleur à partir d'oxyde d'uranium enrichi à 5%. Sa conception prévoit un branchement multi-modulaire pouvant aller jusqu'à 12 modules pour un total de 924 MWe. Il est conçu pour répondre aux besoins des industries, remplacer des centrales à énergie fossile, et produire de l'hydrogène.

Le VOYGR a spécialement été pensé pour concurrencer les réacteurs nucléaires de forte puissance, à partir d'un design simplifié, flexible et modulaire. Il s'appuie sur des technologies éprouvées, déjà largement commercialisées afin de maximiser les chances d'exportation.



Source : (NEA 2023)

Annexe 6 : Extrait de la proposition budgétaire du DoE pour l'année fiscale 2025

Reactor Concepts Research, Development, and Demonstration Funding (\$K)					
	FY 2023 Enacted Comparable	FY 2024 Annualized CR Comparable	FY 2025 Request	FY 2025 Request vs FY 2023 Enacted (\$)	FY 2025 Request vs FY 2023 Enacted (%)
Reactor Concepts Research, Development and Demonstration					
Advanced Small Modular Reactor RD&D	164,400	164,400	0	-164,400	-100.0%
Light Water Reactor Sustainability	44,400	44,400	35,000	-9,400	-21.2%
Advanced Reactor Technologies	59,072	59,072	43,800	-15,272	-25.9%
Integrated Energy Systems	12,000	12,000	9,500	-2,500	-20.8%
Total, Reactor Concepts Research, Development and Demonstration	279,872	279,872	88,300	-191,572	-68.4%

Annexe 7 : Les sept piliers de la sûreté nucléaire de l'AIEA

À la suite de la prise de contrôle de la centrale nucléaire de Zaporijia par l'armée russe en mars 2022, le directeur général de l'AIEA a formulé **sept principes** pour prévenir tout accident nucléaire en temps de guerre :



Source : (AIEA 2023)

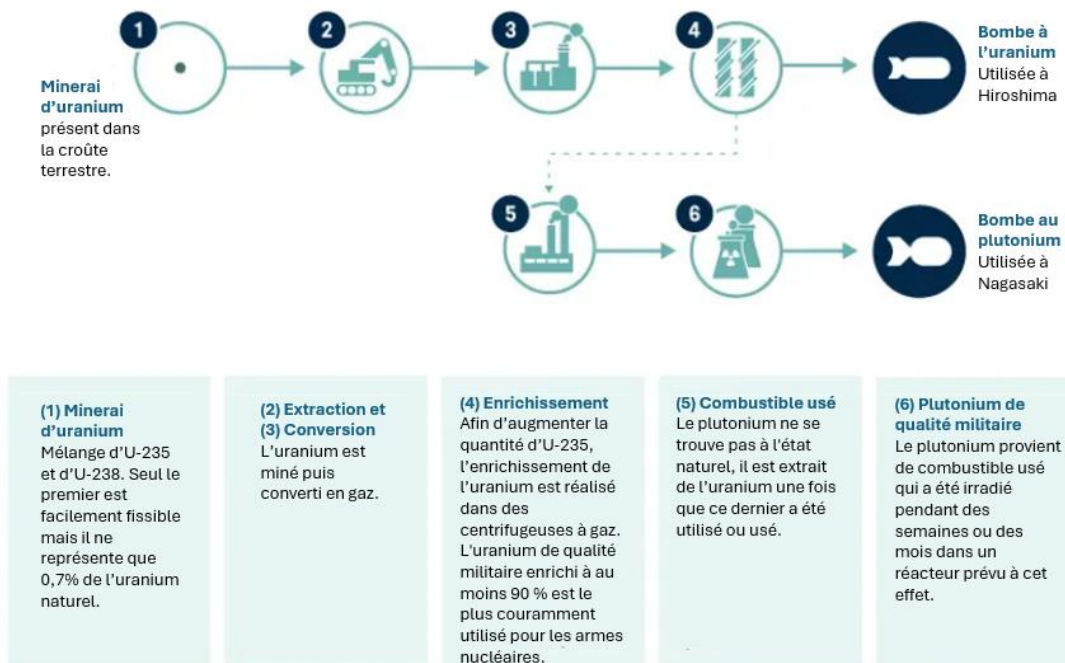
Découlant de ces sept piliers, l'AIEA et ses États membres prohibent toute forme d'entrave à la continuité des opérations et à la circulation du personnel et des ressources nécessaires à la sécurité du site (AIEA 2023). Ce qui revient de facto, à reconnaître une forme d'autorité à Moscou sur le site et ses territoires adjacents.

Annexe 8 : Risques naturels pouvant impacter l'intégrité ou le fonctionnement d'une installation nucléaire



Sources: Nuclear Regulatory Commission documents ; summary of lite ; GAO (icons) | GAO-24-106326

Annexe 9 : Étapes dans la conception d'une bombe atomique

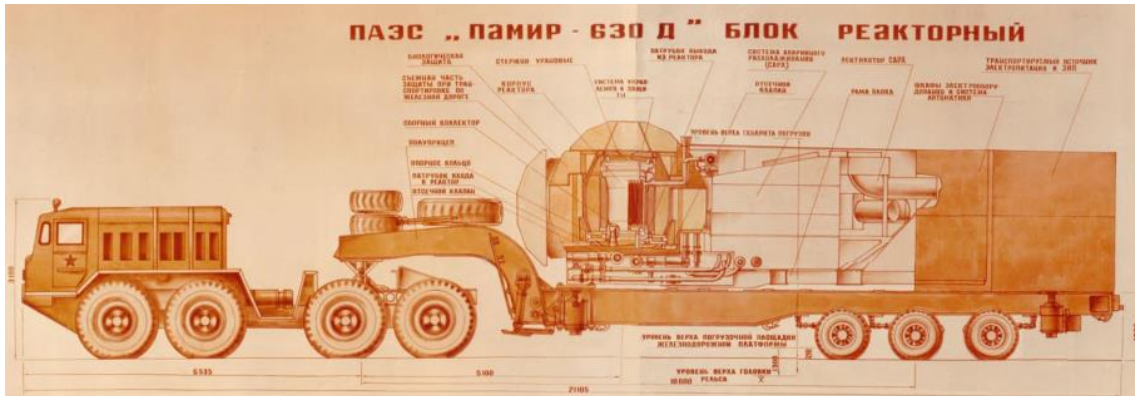


Source: New York Times; Nuclear Threat Initiative (CFR 2023)³⁶⁷

³⁶⁷ CFR Education From The Council On Foreign Relations. « How Do Countries Create Nuclear Weapons ? », 27 juillet 2023. <https://education.cfr.org/learn/reading/how-do-countries-create-nuclear-weapons>.

Annexe 10 : Représentation du SMR soviétique PAMIR-630D

Le PAMIR-630D soviétique, assemblé dans l'actuelle Biélorussie par SONSU en 1985, était déjà une tentative inédite de nucléariser des zones isolées à partir d'un réacteur mobile sur terre et sur mer³⁶⁸



Sources : (S.N.Sikorin 2021)³⁶⁹(Minsk News 2018)³⁷⁰ (Paliukhovich s.d.)³⁷¹ (Interfax 2023).³⁷²

Annexe 11 : le réacteur Linglong One lors de son déploiement sur la centrale de Changjiang sur l'île de Haïnan



Source : China Daily 2023³⁷³

³⁶⁸ Malgré des avancées, le projet a été stoppé en 1988, dans le sillage de l'accident de Tchernobyl, officiellement en raison d'une « absence de justification scientifique sur le choix du liquide de refroidissement » (Interfax 2023).

³⁶⁹ S. N. Sikorin, « JIPNR-Sosny advanced R&D to support for microreactors development », *Technical Meeting on the Status, Design Features, Technology Challenges and Deployment Models of Microreactors*, IAEA, Virtual Event, avril 2021.

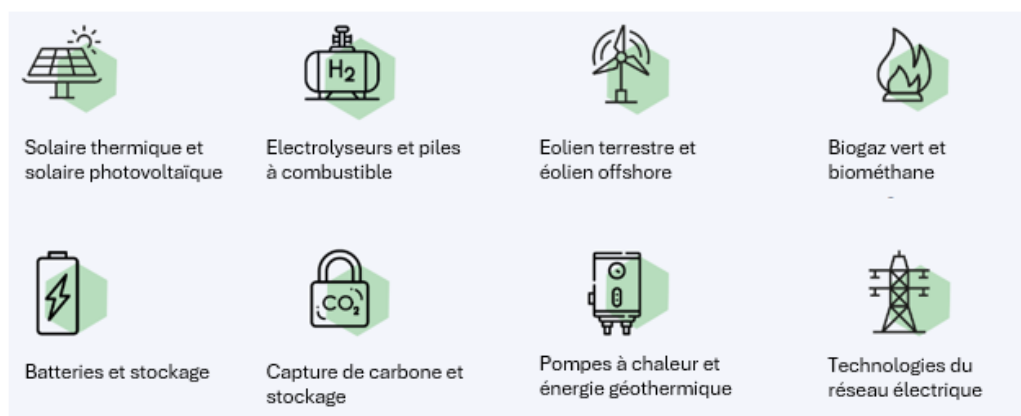
³⁷⁰ Minsk News, « Comment la centrale nucléaire mobile Pamir-630D a été créée en Biélorussie », 14 août 2018, <https://minsknews.by/kak-v-belarusi-sozdavali-peredvizhnyu-atomnyu-stantsiyu-pamir-630d/>.

³⁷¹ V.M. Pahukhovich, *Safe Decommissioning of Mobile Nuclear Power Plant* (Department for Supervision of Industrial and Nuclear Safety, Minsk : s. d.).

³⁷² Interfax, « Belarus might revisit mobile NPP projects - National Academy of Sciences », 30 mars 2023, <https://interfax.com/newsroom/top-stories/89147/>.

³⁷³ China Daily, « Core Of "world-first" Modular Reactor In Place », 11 août 2023, <https://www.chinadaily.com.cn/a/202308/11/WS64d5921ba31035260b81b85d.html>.

Annexe 12 : Liste des technologies Net Zero initialement désignées comme stratégiques pour l'Union européenne



Source : Commission européenne 2023 ³⁷⁴

Annexe 13 : NUWARD – Un « projet de SMR européen pour l'Europe » ³⁷⁵?

NUWARD est une filiale d'EDF qui a pour finalité le lancement d'un prototype de SMR, dont le chantier devrait débuter en 2030. Lancé en 2019, le projet est porté conjointement par d'autres grands acteurs de l'industrie (Edvance, TechnicAtome, Naval Group, CEA, Framatome et Tractebel) qui apportent chacun leur expertise à différentes étapes.

D'une puissance totale cumulée de 340 MWe, il aurait une vocation multimodale, produisant aussi bien de l'électricité que de la chaleur, de l'hydrogène ou de l'eau potable par désalinisation³⁷⁶.

Dans le cadre du plan de relance France 2030, NUWARD a bénéficié d'une subvention de 300 millions d'euros pour la phase de R&D. Cette aide a pu être versée après la validation par Commission européenne, reconnaissant la contribution apportée par le projet, notamment en matière de lutte contre le changement climatique³⁷⁷.

NUWARD présente l'ambition de s'inscrire comme le SMR de référence en Europe pour pouvoir gagner le marché européen. C'est dans cette optique qu'un système de pré-licence a été développé en collaboration avec les autorités de sûreté européennes

³⁷⁴ Commission européenne, « The Net-Zero Industry Act », Internal Market, Industry, Entrepreneurship And SMEs, 21 mars 2023, https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability/net-zero-industry-act_en.

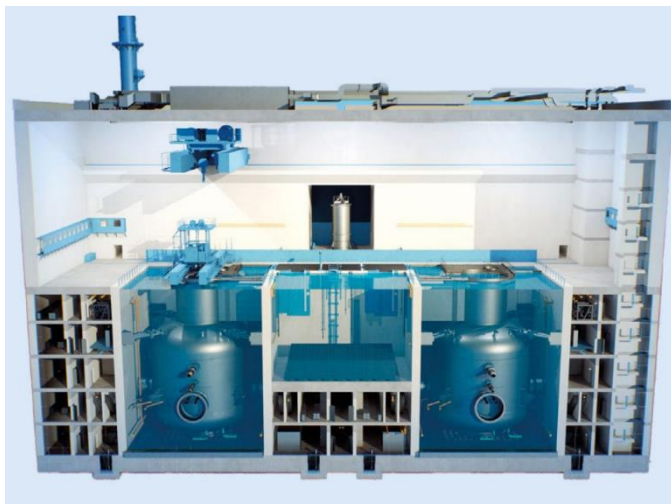
³⁷⁵ Sfen, « « Nuward est le projet de SMR européen pour l'Europe ! », assure Renaud Crassous », <https://www.sfen.org/rgn/nuward-est-le-projet-de-smr-europeen-pour-leurope-assure-renaud-crassous/> (page consultée le 17 juin 2024)

³⁷⁶ NUWARD SMR, « Leading the way to a carbon-free world », s.d. <https://www.nuward.com/sites/nuward/files/2023-11/NUWARDSMR.pdf>

³⁷⁷ Commission Européenne, « La Commission autorise une mesure d'aide d'État française d'un montant de 300 millions d'euros visant à soutenir Nuward dans la recherche et le développement de petits réacteurs nucléaires modulaires », 26 avril 2024. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/ip_24_2228

française (ASN), finlandaise (STUK) et tchèque (SUJB)³⁷⁸. Cette revue conjointe multilatérale devrait favoriser l'harmonisation des normes et faciliter l'exportation des SMR NUWARD en Europe.

Annexe 13 : SMR NUWARD constitué de deux réacteurs de 170 MWe chacun



Source : brochure NUWARD

Annexe 14 : Carte des territoires contestés en mer de Chine et photo de la base militaire chinoise de Fiery Cross Reef dans l'archipel des Spratleys



Sources : Center for Strategic and International Studies & CNN

³⁷⁸ ASN, « Petits réacteurs modulaires : pour la première fois, une revue conjointe a été réalisée par trois autorités de sûreté européennes sur des options de sûreté d'un projet de SMR », 26 septembre 2023. <https://www.asn.fr/l-asn-informe/actualites/petits-reacteurs-modulaires-revue-conjointe-realisee-par-trois-autorites-de-surete-europeennes>.

Annexe 15 : Le HTR-PM de l'université de Tsinghua

Le **HTR-PM** est la première centrale SMR commerciale chinoise opérationnelle, située dans la province du Shandong. Elle est composée de deux réacteurs haute température refroidis à l'hélium, d'une capacité totale de 210 MWe et de 500°C en sortie. Le site est **rentré en service** fin 2023, après neuf ans de construction et l'octroi de sa licence d'exploitation en 2021. Son design repose sur le **HTR-10**, un prototype de HTGR développé à partir des années 1990^{379; 380}.

Porté par l'**Institut des technologies nucléaires et des nouvelles énergies (INET)** de l'université de **Tsinghua**, le projet a été réalisé avec la collaboration notable de la **CNNC**. Il rentre dans la **stratégie nationale de décarbonation** des villes et des industries de l'Est du pays^{381 ;382}.

Son objectif est surtout de **prouver la faisabilité commerciale** d'un SMR HTGR et de faire la **démonstration des capacités chinoises** en vue d'exporter le concept^{383; 384}.

Figure 11 : Photo de l'HTR-PM



Source : (WNN 2023)³⁸⁵

³⁷⁹ Gaïc Le Gros, « Chine : Le Démonstrateur de Réacteur À Haute Température Est En Service », *SFEN*, 21 décembre 2023, <https://www.sfen.org/rgn/chine-le-demonstrateur-de-reacteur-a-haute-temperature-est-en-service/>.

³⁸⁰ Li Han, « Chinese HTR-PM Demo Begins Commercial operation », Tsinghua University, 2024, <https://www.tsinghua.cn/en/info/1244/12578.htm>.

³⁸¹ Li Han, « Chinese HTR-PM Demo Begins Commercial operation », Tsinghua University, 2024, <https://www.tsinghua.cn/en/info/1244/12578.htm>.

³⁸² China's National People's Congress, « The 14th Five-Year Plan of the People's Republic of China », 2021, <https://policy.asiapacificenergy.org/sites/default/files/14th%20Five-Year%20Plan%20of%20the%20People%E2%80%99s%20Republic%20of%20China%20%E2%80%94%20Fostering%20High-Quality%20Development.pdf>.

³⁸³ Li Han, « Chinese HTR-PM Demo Begins Commercial operation », Tsinghua University, 2024, <https://www.tsinghua.cn/en/info/1244/12578.htm>.

³⁸⁴ IAEA, *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments* (AIEA, Vienne : 2020).

³⁸⁵ World Nuclear News, « China's Demonstration HTR-PM Enters Commercial Operation », 6 décembre 2023, <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Chinese-HTR-PM-Demo-begins-commercial-operation>.

Annexe 16 : Quelle génération technologique pour les SMR ?

On distingue quatre générations de réacteurs nucléaires³⁸⁶ :

- **La Génération I** : Les réacteurs mis en service avant les années 1970, essentiellement pour la production de plutonium à finalité militaire.
- **La Génération II** : Les réacteurs déployés entre les années 1970 et la fin des années 1990, essentiellement à eau légère.
- **La Génération III** : Les réacteurs développés à la suite des accidents de Tchernobyl et Three Miles Island, intégrant des exigences de sûreté plus élevées³⁸⁷.
- **La Génération IV** : Les réacteurs reposant sur des concepts en rupture avec le précédents (réacteur à sels fondus, neutrons rapides, haute température ...).

Les SMR ne sont pas catégorisables dans une génération, mais ils intègrent à minima les mécanismes les plus avancés **de la 3^e génération**, et peuvent intégrer **des concepts de 4^e génération**, comme les réacteurs hautes températures, à sels fondus ou à neutron rapide. Dans ce dernier cas on parle de réacteur modulaire avancé (Reuss 2007)³⁸⁸.

³⁸⁶ Connaissance des Énergies. « Histoire de L'électronucléaire En France », 29 mai 2024. <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/histoire-de-lelectronucleaire-en-france>.

³⁸⁷ Les réacteurs Gen (III) intègrent notamment des mécanismes de sûreté passive.

³⁸⁸ Paul Reuss, *L'épopée de l'Énergie Nucléaire : une histoire scientifique et industrielle* (Edp Sciences, Les Ulis : 2007).

L'ANALYSE GÉOPOLITIQUE DES ENJEUX ÉNERGÉTIQUES EN MATIÈRE DE DÉFENSE ET DE SÉCURITÉ

L'Observatoire de la sécurité des flux et des matières énergétiques est coordonné par l'IRIS, en consortium avec Enerdata et Cassini, dans le cadre d'un contrat réalisé pour le compte de la Direction générale des relations internationales et de la stratégie (DGRIS) du ministère des Armées. Il est coordonné par Sami Ramdani, chercheur à l'IRIS, et rassemble une équipe d'une vingtaine de chercheurs et professionnels.



www.iris-france.org

