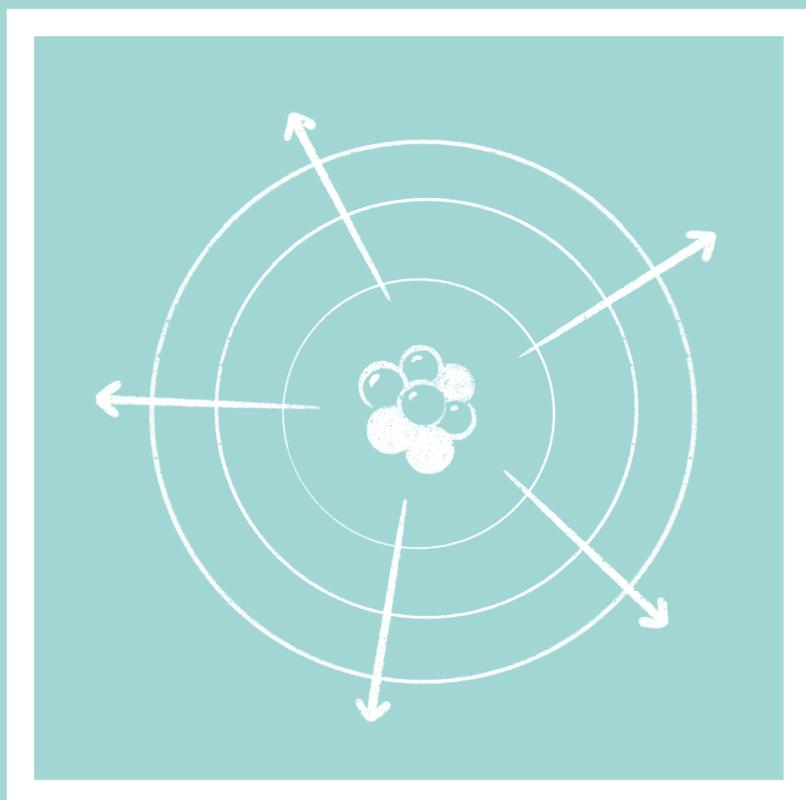


La relance du nucléaire dans le monde

**Rapport de veille
édition 2023**

Préface de l'Institut français des relations internationales (Ifri)



Face au retour brutal de la géopolitique, une stratégie industrielle est indispensable

Sécurité d'approvisionnement, souveraineté économique, décarbonation... À l'heure où le mythe de la globalisation heureuse est derrière nous et où la transition devient douloureuse, l'Europe doit faire face à tous ces défis alors qu'elle n'y est guère préparée. Elle doit s'appuyer sur ses atouts existants, dont le nucléaire, première source d'électricité bas carbone du continent, dans le cadre d'une véritable politique industrielle.

Par Marc-Antoine EYL-MAZZEGA, directeur du Centre Énergie & Climat de l'Institut français des relations internationales (Ifri)

La neutralité climatique, nouvelle raison d'être du projet européen

L'élaboration du Pacte vert européen (Green Deal) fin 2019 par la nouvelle Commission européenne, et sa mise en place courant 2020 et 2021 avec le soutien sans précédent du Parlement européen et des États membres, ont été accompagnées par un optimisme et un entrain réels dans les sphères économiques, politiques et sociétales bien au-delà de Bruxelles. L'on pouvait même estimer que l'Union européenne (UE), secouée et accaparée par le Brexit, puis menacée par les réflexes nationaux au début de la pandémie, était finalement sortie largement renforcée et revigorée de ces épreuves, en particulier par le plan de relance commun à portée historique et la décision d'accélérer la transition énergétique. L'élection de Joe Biden aux États-Unis fin 2020, et l'absence de défaite de son camp lors des

élections de mi-mandat au Congrès (fin 2022), remettaient les États-Unis en selle dans l'effort pour limiter le changement climatique. Enfin, la Chine et d'autres puissances émettrices s'étaient engagées à atteindre la neutralité climatique d'ici à 2060 lors de la COP26 (2070 pour l'Inde).

Il y a quatre ans, les taux d'intérêt étaient bas, tout comme, dans l'ensemble, les prix de l'énergie, l'euro était fort, la balance commerciale excédentaire, la croissance de retour, et les Européens avaient finalement été parmi les mieux protégés pendant la pandémie au sens économique et sanitaire. Dans ce contexte de sursaut européen, certains se sont même aventurés à prédire un renversement géopolitique par lequel les États pétroliers rentiers seraient rapidement affaiblis et marginalisés au profit de nouveaux acteurs totalement absents du système traditionnel des échanges et interdépendances et qui fourniraient métaux, hydrogène vert et électricité renouvelable bon marché.

L'UE pouvait même se rêver en puissance géopolitique : elle serait autonome en énergie et deviendrait un leader environnemental qui impacte le reste du monde. Une troisième voie européenne paraissait possible pour offrir une alternative à la confrontation sino-américaine qui s'aiguissait. La Chine devenait d'ailleurs le premier partenaire commercial de l'Allemagne, dont la nouvelle coalition à trois formée fin 2021 avait fixé un cap

L'UE pouvait même se rêver en puissance géopolitique : elle serait autonome en énergie et deviendrait un leader environnemental qui impacte le reste du monde.

Préface

géopolitique avec trois priorités – alliance avec les États-Unis, interdépendance constructive et vigilante avec la Russie et la Chine, et intégration européenne. En réalité, Berlin s'est enfermé dans une dépendance au gaz russe bon marché, et aux exportations vers la Chine. Et sa stratégie visait à y associer toute l'Europe, dont les politiques devaient viser à soutenir le modèle allemand de transition appuyé sur les énergies renouvelables tous azimuts, le gaz naturel bon marché en équilibre, les contrats carbone, et l'hydrogène à grande échelle. Si cet hydrogène avait vocation à être largement subventionné, ce n'était que pour l'amorçage, car l'idée était répandue que l'électricité serait abondante et bon marché vu l'essor irrésistible des énergies renouvelables. Et si le constat s'est imposé qu'il faudrait en importer l'essentiel, cela se ferait avec des briques technologiques allemandes.

Avec plus de 400 TWh par an de production nucléaire et de larges exportations, la France somnolait tranquillement en ne se mobilisant ni sur le nucléaire, ni sur les énergies renouvelables. Le paradoxe est que la France s'est désindustrialisée alors qu'elle disposait d'une électricité abondante, peu chère et bas carbone. L'endettement public supérieur à 110 % du PIB désormais s'est construit pendant cette période et nous en paierons de plus en plus le prix fort, le remboursement de la dette est le premier poste budgétaire de l'État. Il est évident que cela devrait être la modernisation économique et technologique, et la défense. La stratégie chinoise du Made in China 2025, la sécurité des approvisionnements électriques, le défi des métaux, l'avenir des industries énérgo-intensives, les défis de l'innovation, des chaînes de

valeur des technologies bas carbone, tous ces enjeux clés n'étaient pas au cœur des politiques publiques nationales ou européennes, car le spectre géopolitique était encore trop cantonné aux vestiges de la lutte contre le terrorisme des années 2000 et 2010 (Afghanistan, Libye, Irak, Sahel), au défi de l'immigration par exemple et aux tensions aux périphéries de l'Europe dont on ne percevait pas la nature systémique et métastatique (comme le Mali, le Donbass ou la Syrie).

Dans l'énergie, il fallait du bas coût à tout prix, et chacun comptait sur ses voisins en cas de besoin pour passer les pointes ou l'hiver. Enfin, l'on cherchait encore à privilégier la coopération tous azimuts avec la Chine, car l'on était incapable de penser et agir, que ce soit au niveau national ou européen, dans les catégories de la rivalité, voire de la confrontation, et que les intérêts de court terme primaient. Le long terme était un horizon stratégique flou.

La fin de la globalisation heureuse : le rapport de force omniprésent

Près de quatre ans après l'annonce du Green Deal et près de deux ans après l'invasion de l'Ukraine par la Russie, l'Europe a subi de nombreux chocs et, dans un monde de plus en plus fragmenté, elle devient périphérique tandis que d'autres pôles se maintiennent ou s'affirment (Chine, États-Unis, Inde) sans qu'aucun n'ait toutefois la puissance absolue. Le système international marqué de l'empreinte et de l'emprise occidentale s'effrite et est contesté, les systèmes autoritaires s'affirment dans des logiques transactionnelles et d'alliances multiples et flexibles, et les rapports de puissance s'aiguisent et méprisent les règles en place. La gouvernance internationale est affaiblie mais demeure toutefois effective sur certains enjeux, ce qui a son importance (accord sur la limitation des subventions à la pêche à l'OMC, sur la protection de l'environnement – COP15).

La page de la globalisation bienheureuse ouverte par l'entrée de la Chine dans l'OMC s'est définitivement refermée.

La page de la globalisation bienheureuse ouverte par l'entrée de la Chine dans l'OMC s'est définitivement refermée.

Les défis auxquels sont confrontés les Européens sont désormais existentiels.

Si le commerce international se maintient tout en ralentissant sa progression avec la montée rapide de nombreuses barrières tarifaires, ce sont avant tout les flux d'investissements qui sont en voie de progressive réorientation.

Enfin, les grandes puissances se livrent désormais à une rivalité exacerbée sur les politiques industrielles et mobilisent les technologies, les industries, l'accès aux marchés, les investissements, la finance, les ressources et fournitures en hydrocarbures et matières premières à des fins géopolitiques et géoéconomiques, pour conforter leur puissance ou se prémunir contre celle des autres.

Individuellement, les États européens ne pèsent guère à l'échelle mondiale et sont très affaiblis financièrement. Les éléments collectifs de puissance de l'UE, qui reposent avant tout sur les règles de droit et le marché commun où la concurrence s'exerce librement, doivent changer de registre et se renforcer pour exister sur les nouveaux terrains d'affrontements géopolitiques et géoéconomiques. Une prise de conscience existe : il n'y a jamais eu autant de convergences d'analyse et d'efforts pour renforcer l'autonomie stratégique de l'Europe, gage de prospérité, mais avancer à 27 est forcément long et compliqué, sachant qu'un retard très important a été pris.

Des défis existentiels pour l'Europe

C'est dans ce contexte dégradé que les Européens doivent désormais mener leur transition énergétique accélérée, dont les objectifs stratégiques n'ont pas été formulés. Ils devraient être : réduction

des émissions et dégradations environnementales de manière réelle et rapide ; ce faisant, garantir la sécurité économique et sociale des Européens, ce qui signifie que la décarbonation ne doit pas renforcer les dépendances extérieures, fermer des usines et mettre les citoyens en difficulté sans accompagnement et solutions ; enfin, agir de manière stratégique avec des priorités, un séquençage bien établi, des moyens adéquats sur le court et long terme, une coordination étroite, et un consensus, pour garantir la faisabilité du processus et la maîtrise des coûts.

Les défis auxquels sont confrontés les Européens sont désormais existentiels : la marginalisation stratégique signifierait être incapable de peser de manière décisive sur le cours du monde et subir les risques géopolitiques multiples ; la réduction des industries énérgo-intensives renforcerait les dépendances et vulnérabilités et affaiblirait les tissus économiques, sociaux et institutionnels ; la dépendance accrue aux métaux et à leur raffinage signifie une vulnérabilité économique et géopolitique croissante ; la non-maîtrise des équipements et briques des technologies bas carbone impliquerait une balance commerciale déficitaire, une monnaie faible, et un risque de remontée de chaîne de valeur, et probablement aussi le maintien dans la durée d'une dépendance aux hydrocarbures élevée. En somme, les recettes fiscales chuteraient, les importations augmenteraient, les vulnérabilités extérieures et intérieures aussi, alors qu'il faut investir, protéger, accompagner et se réarmer dans toutes les dimensions.

Or les Européens ne maîtrisent pas l'industrie solaire à grande échelle, des signes préoccupants pointent vers une perte de la domination sur l'éolien offshore où les équipements chinois deviennent omniprésents, l'hydrogène est loin d'être passé à l'échelle sous pavillon européen, des maillons clés des chaînes de valeur de la mobilité électrique ne sont pas maîtrisés et la Chine a pris une longueur d'avance générale, de surcroît avec le passage à l'échelle. La perte de compétence dans le

Le nucléaire représente un immense défi, mais il s'agit d'une opportunité historique, de surcroît si la promesse des petits réacteurs se matérialise.

nucléaire est préoccupante et les avancées des Russes et Chinois sur la quatrième génération, et des Américains sur les petits réacteurs nucléaires, sont avérées. Les États-Unis et d'autres consacrent par ailleurs des moyens croissants aux technologies de capture directe du CO₂ ou de géo-ingénierie, au CCUS et à la fusion, tout en profitant largement de leurs abondantes ressources en hydrocarbures qui offrent un avantage économique et fiscal de nature stratégique.

Il faut pleinement intégrer deux données essentielles : la Chine a acquis une avance considérable, si ce n'est décisive, sur bon nombre de technologies bas carbone et numériques, et les États-Unis déploient l'Inflation Reduction Act et d'autres programmes pour tenter de rattraper le retard technologique et industriel et devenir autonomes. L'Europe a désormais des coûts de l'énergie parmi les plus élevés des pays de l'OCDE et est la grande perdante des polycrises actuelles, qui ne font que se renforcer et vont s'inscrire dans la durée. Cet environnement de menaces existentielles pour l'Europe requiert un sursaut historique et une mobilisation sans précédent. Et d'abord, de s'appuyer sur nos atouts qu'il faut consolider et non pas négliger. Dans le secteur de l'électricité et de l'électrification, qui est la

colonne vertébrale de la décarbonation, le nucléaire en fait incontestablement partie, tout comme les énergies renouvelables.

Le nucléaire, une opportunité historique pour l'Europe

L'Europe ne peut se permettre de se précipiter dans un système électrique où l'essentiel des capacités de production sera intermittent, avec des pics de demande auxquels l'offre ne pourra plus faire face, à moins de sanctuariser un rôle important pour le gaz (forcément importé et émetteur) à long terme et d'investissements massifs dans les centrales à gaz. L'Europe ne peut pas non plus espérer parvenir à atteindre ses objectifs d'énergies renouvelables et garantir sa sécurité électrique et économique d'ici à 2030 dans les circonstances actuelles avec les politiques qui sont menées et qui précèdent l'ère des polycrises.

Elles forment un nouvel environnement qui change la donne et réduit encore la capacité à atteindre les objectifs fixés. Les travaux du Giec montrent qu'à court terme, pour espérer sauver la planète d'un réchauffement hors de contrôle, il faut limiter les émissions fugitives de méthane et investir massivement dans l'éolien et le solaire et réduire le charbon. À long terme, il faut y ajouter du nucléaire, ce qui représente un immense défi, mais une opportunité historique, de surcroît si la promesse des petits réacteurs se matérialise. Pour la France et les autres États européens qui désormais se mobilisent autour de cet enjeu du nucléaire civil, cela implique de mener la bataille des savoir-faire et de l'outil industriel adéquat, d'obtenir un cadre réglementaire facilitateur et harmonisé qui permette le financement de ces équipements hautement capitalistiques, et de mener la bataille en parallèle des réseaux électriques et du stockage, et celle de l'hydrogène bas carbone.

Certains États européens, ou des citoyens, sont sceptiques, voire hostiles. C'est pourtant un enjeu clé pour espérer gagner la bataille de l'électricité et de l'électrification, et plus généralement, des technologies bas carbone, qui sont toutes

Préface

confrontées à des difficultés et ne se suffisent pas. Il convient de rechercher la complémentarité des outils de production bas carbone dans un système optimisé pour garantir à la fois la sécurité énergétique et économique, et il faut sortir du mirage du tout nucléaire versus le tout renouvelable. Cette bataille doit désormais être engagée sur tous les fronts de l'électricité à l'échelle européenne, sans équivoques et exclusions : énergies renouvelables, hydroélectricité, réseaux, équipements d'électronique de puissance, systèmes de stockage, métaux, recyclage... et nucléaire civil. C'est un enjeu vital pour la décarbonation, et pour la préservation du tissu industriel français et européen, déjà largement fragilisé, qu'il s'agisse de l'automobile, de l'acier, de la pétrochimie.

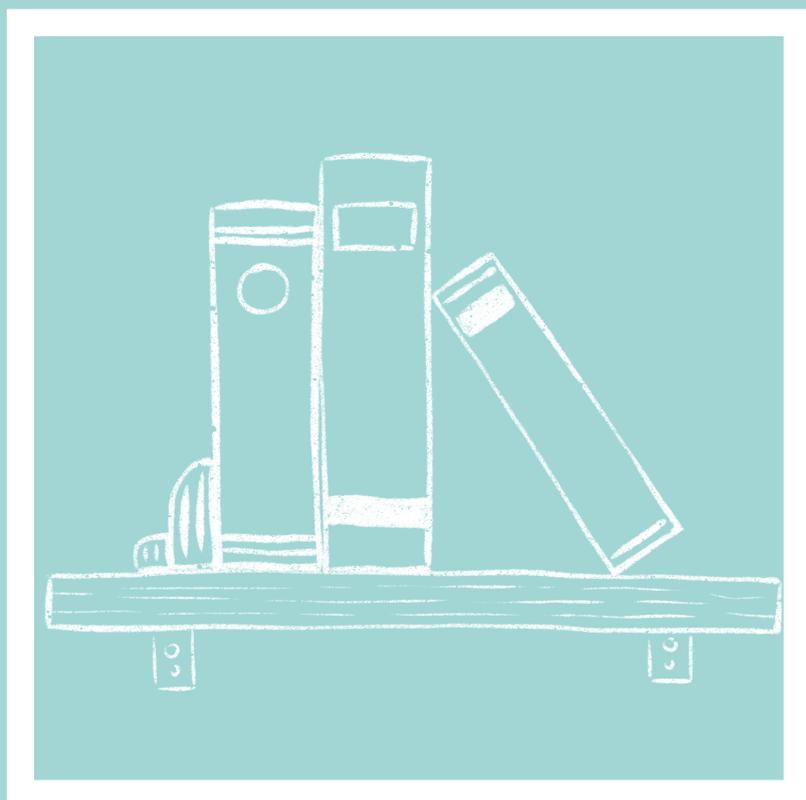
Au risque d'une fragmentation intérieure, ce secteur est désormais aussi confronté à un risque de fragmentation extérieure. Si les concurrents russes et chinois sont désormais évincés des marchés européens, les États-Unis mènent une campagne agressive et efficace pour placer leurs technologies et combustibles en Europe et harmoniser les réglementations pour déployer en série leurs réacteurs modulables. Dans une moindre mesure, la Corée du Sud fait de même. Si les Européens remplacent déjà leurs achats d'hydrocarbures russes par des achats d'hydrocarbures nord-américains, couplés demain à de l'hydrogène, et ensuite complétés par des technologies nucléaires et de stockage et capture de CO₂, et ce, en sus de tous les achats d'armements, la sécurité économique européenne sera mise à mal, et inévitablement, l'intégration européenne. La

marginalisation stratégique de la France, et des Européens, s'accélérera.

Si les Européens ne se mobilisent pas davantage pour coordonner, structurer et soutenir ensemble leurs industries nationales du nucléaire, tout comme le font toutes les grandes puissances établies ou émergentes, à l'instar d'autres secteurs, et ce, notamment au niveau financier, il est acquis que la maîtrise des chaînes de valeur par des acteurs européens s'effritera. La sécurité des approvisionnements énergétiques en toutes circonstances sera encore moins garantie. Cela implique aussi de surmonter le Brexit et de reconstruire une entente industrielle avec le Royaume-Uni, allié et partenaire de bon sens dont l'arrimage européen est fondamental. L'appel de Charles III à former une nouvelle entente cordiale doit être saisi.

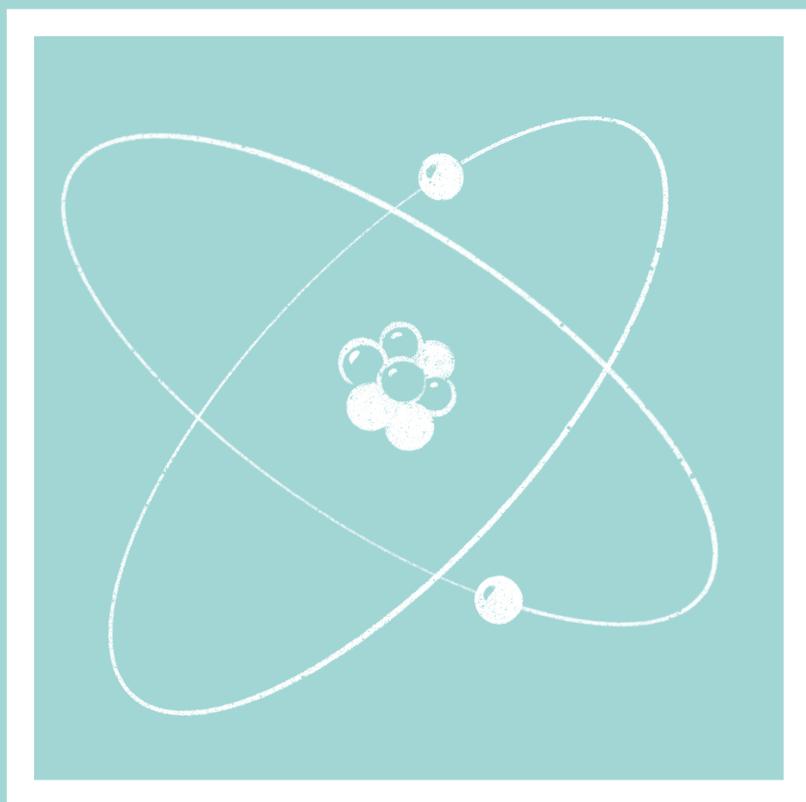
Autant d'enjeux qui devront également être abordés de manière responsable et lucide lors des débats en vue des élections européennes de juin 2024, mais aussi de la prochaine planification pluri-annuelle de l'énergie, dans la perspective desquelles cette étude apporte une contribution des plus utiles.

Il convient de rechercher la complémentarité des outils de production bas carbone dans un système optimisé.



Sommaire

Édito	11
Résumé pour les décideurs	13
Introduction	15
I Enseignements	16
1. Une place significative dans le mix bas carbone mondial	17
1.1. La seconde source d'électricité bas carbone dans le monde	17
1.2. Une contribution attendue	17
1.3. La construction des réacteurs de nouvelle génération arrive à maturité	18
2. Les signaux de la relance	19
2.1. Un regain de soutien pour l'énergie nucléaire dans l'opinion publique	19
2.2. Des décisions d'exploitation à long terme des réacteurs	19
2.3. Des annonces de programmes de nouvelles constructions	20
2.4. Une vague mondiale d'innovations dans le nucléaire	21
3. De nouveaux schémas	22
3.1. La géopolitique du combustible	22
3.2. Les enjeux de financement	23
3.3. Les nouveaux usages : au-delà de l'électricité	24
II Focus géographiques	26
1. Europe : relance du nucléaire	27
2. Les quatre programmes du nucléaire français	30
3. États-Unis : le réveil d'une superpuissance	32
4. Chine : le nouveau géant	34
5. La Russie, premier exportateur mondial de réacteurs	36
6. L'Inde, un futur acteur global du nucléaire	38
7. Japon : la relance nucléaire se confirme	40
8. Le renouveau du nucléaire canadien	41
9. La Corée du Sud révisé sa politique nucléaire avec des ambitions à l'export	42
10. Ailleurs dans le monde	43
III Data	44





« L'énergie nucléaire fait son grand come-back », annonçait le directeur général de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), Fatih Birol, à la COP27¹ en novembre 2022. Au milieu des crises mondiales du climat et de l'énergie, il notait que « des pays du monde entier manifestent un regain d'intérêt pour l'énergie nucléaire, y compris des pays qui avaient précédemment cherché à éliminer progressivement cette technologie ». Ces pays recherchent aujourd'hui de l'énergie bas carbone mais aussi de la sécurité énergétique et « l'énergie nucléaire fournit les deux ».

Alors que la guerre en Ukraine a placé la sécurité nucléaire, avec la centrale de Zaporijia, au cœur de l'actualité internationale, l'énergie nucléaire semble être entrée depuis fin 2021 dans une nouvelle phase, que l'on peut qualifier de « relance ». Elle bénéficie d'abord, comme on le verra dans ce rapport, d'un regain d'adhésion des opinions publiques de très nombreux pays. Aussi, des annonces de projets se succèdent désormais partout dans le monde, semaine après semaine, que ce soit concernant le redémarrage ou la prolongation de réacteurs existants, la construction de nouveaux réacteurs ou le développement de petits réacteurs modulaires de technologie actuelle (SMR) et de technologies avancées (AMR).

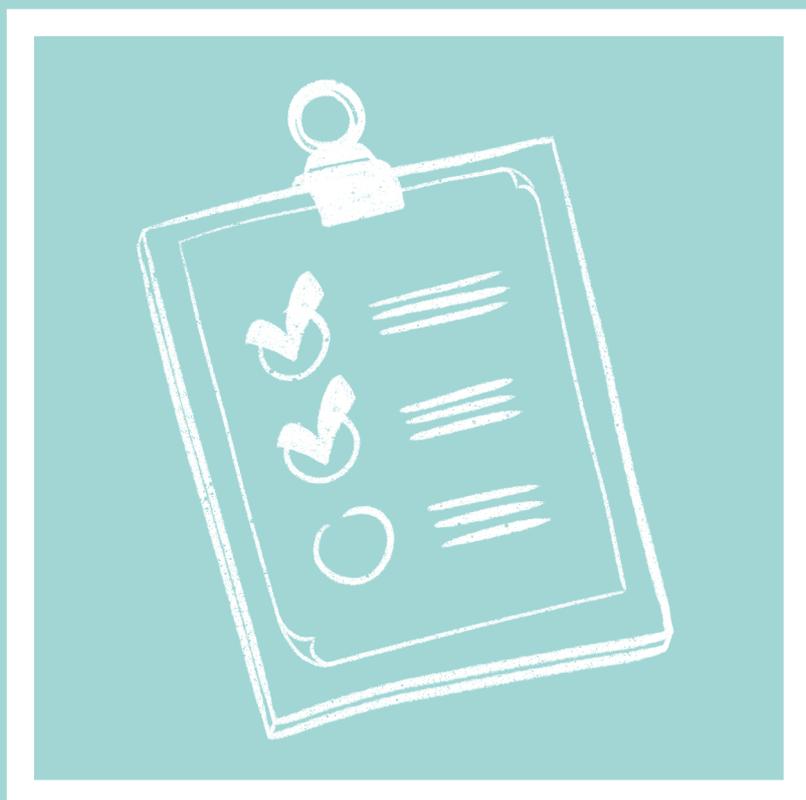
Cette relance est aujourd'hui une promesse. Pour la concrétiser, les États et l'industrie nucléaire devront relever plusieurs défis. Tout d'abord, démontrer qu'ils réussiront, dans le cadre de programmes industriels cadencés, à construire les réacteurs de dernière génération en série, dans les

délais et dans les budgets prévus. Ensuite, qu'ils sont susceptibles d'innover, en particulier via les petits réacteurs avancés, pour rendre plus facile l'accès au nucléaire pour de nouveaux pays entrants et permettre, au-delà de la production d'électricité, de décarboner de nouveaux usages, comme la chaleur urbaine, la chaleur industrielle ou la production d'hydrogène bas carbone. Enfin, qu'ils peuvent mettre en place des schémas financiers permettant de mobiliser les capitaux nécessaires au financement des nouvelles infrastructures, à des taux garantissant la compétitivité du système électrique de demain.

L'objet de ce rapport, nouvel outil de référence de la Sfen, est d'observer et mesurer de manière régulière, dans différentes régions du monde, les progrès des États et de l'industrie nucléaire dans cette relance. Ce document a vocation à être mis à jour avec une périodicité annuelle, sachant que la Sfen, via la publication quotidienne d'articles de la Revue générale nucléaire (RGN), décrypte en continu l'actualité internationale tout au long de l'année. Pour cette première édition, le focus restera principalement sur les réacteurs, sachant que de nombreux autres sujets méritent d'être explorés à l'avenir, en particulier la question du cycle du combustible nucléaire.

Valérie FAUDON,
déléguée générale de la Sfen

¹ AIEA – « Nuclear is making a strong comeback », IEA's Birol Tells IAEA Director General Grossi at IAEA COP27 Event – Novembre 2022.



Résumé pour les décideurs

1 L'énergie nucléaire tient une place significative dans la décarbonation des mix électriques mondiaux.

Elle représentait en 2022 la seconde source d'électricité bas carbone dans le monde, et la première dans l'Union européenne. Les scénarios de décarbonation des grandes institutions montrent la nécessité, en complément des énergies solaire et éolienne, d'une contribution accrue du nucléaire, correspondant à un doublement, voire à un triplement de la production d'ici à 2050. Après des retards sur les premiers projets, la construction de réacteurs de troisième génération arrive à maturité dans les pays, comme la Chine, qui ont engagé des programmes industriels de construction en série.

2 On constate plusieurs signaux de relance du nucléaire partout dans le monde.

Les États sont portés par des opinions publiques de plus en plus en faveur de l'atome. Une étude mondiale Ipsos montre en 2022 une progression de 7 points des personnes pour l'énergie nucléaire. Cette progression est de 11 points en Europe, et de 15 points en Allemagne. Cela permet aux gouvernements de lancer des programmes. Ainsi sont annoncées de nombreuses décisions de prolonger l'exploitation des réacteurs existants, jusqu'à 80 ans aux États-Unis. Plusieurs pays, comme la Belgique, sont revenus sur des décisions initiales de fermeture de réacteurs. Quinze pays

européens, rassemblés au sein de « l'Alliance du nucléaire », ont annoncé en mai un objectif de 150 GW de nucléaire en 2050, soit la construction de 30 à 45 nouveaux réacteurs. Enfin, à l'image du monde spatial, le nucléaire est porté par une vague d'innovations sans précédent, avec plus de 70 concepts de petits réacteurs innovants dans le monde.

3 Au-delà de la capacité industrielle à construire de nouvelles installations, de nouveaux schémas devront être mis en place.

La guerre en Ukraine a révélé les liens de certains pays avec la Russie dans la chaîne de fabrication du combustible. C'est le cas pour l'Europe de l'Est (réacteurs de technologie russe) et les États-Unis (enrichissement de l'uranium). À noter aussi que le coût de production de l'énergie nucléaire, avec une forte proportion de coûts fixes, est très sensible au coût de financement des installations. Si les Russes historiquement, et les Américains aujourd'hui, proposent des aides bilatérales, le soutien au nucléaire au sein des taxonomies et des portefeuilles des institutions multilatérales doit être renforcé. Enfin, au-delà de l'électricité, les pays doivent accélérer les expérimentations pour l'utilisation de l'énergie nucléaire dans la chaleur urbaine (Chine), la chaleur industrielle (États-Unis) ou la production d'hydrogène bas carbone (Royaume-Uni).



Introduction

« L'énergie nucléaire peut permettre d'accélérer et de sécuriser la sortie des énergies fossiles »², déclarait l'Agence internationale de l'énergie (AIE)³ mi-2022. Si les énergies solaire et éolienne sont amenées à croître de manière très forte dans les trajectoires de décarbonation mondiales, l'agence rappelle qu'elles devront être complétées par des énergies pilotables bas carbone (hydraulique, nucléaire, CCUS) et/ou des moyens de flexibilité (stockage).

La question principale qui se posera dans les années qui viennent est de savoir si la relance annoncée permettra au nucléaire d'apporter sa contribution au niveau attendu.

Le présent rapport dresse un état des lieux du nucléaire dans le monde aujourd'hui, des éléments dont on dispose à date sur la relance en cours, ainsi que des défis posés aux États et à l'industrie pour réussir cette relance. Il est basé exclusivement sur des sources publiques, que ce soit des bases de données d'organismes internationaux (AIEA, OCDE-NEA) ou une veille effectuée par la Sfen et les conseillers nucléaires des ambassades de France à l'étranger, à partir de sources gouvernementales.

Remerciements

Merci à Gaïc Le Gros qui a dirigé ce projet à la Sfen et aux conseillers nucléaires des ambassades pour leurs relectures et leurs suggestions. Tous nos remerciements vont aussi à Marc-Antoine Eyl-Mazzega de l'Institut français des relations internationales (Ifri) pour avoir accepté de rédiger la préface de ce rapport. Nous sommes preneurs de vos retours et suggestions en vue de l'édition 2024. N'hésitez pas à nous contacter : sfen@sfen.org.

2. AIE - « Nuclear energy can help make the energy sector's journey away from unabated fossil fuels faster and more secure », « A new dawn for nuclear energy? » - Juin 2022.

3. AIE - « Nuclear Power and Secure Energy Transitions » - Juin 2022.

Enseignements



Enseignements

1 Une place significative dans le mix bas carbone mondial

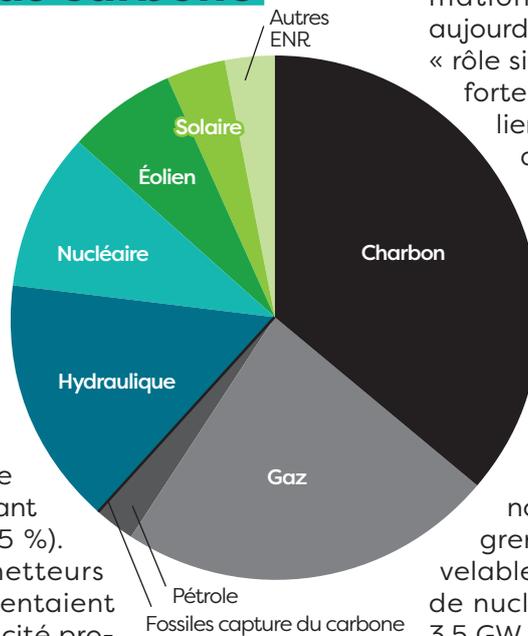
1.1 La seconde source d'électricité bas carbone dans le monde

Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE)⁴, l'énergie nucléaire, avec plus de 400 réacteurs en exploitation dans plus de 30 pays, était en 2021 la seconde source d'électricité bas carbone dans le monde avec 9,8 % de la production électrique, derrière l'hydroélectricité (15,3 %), et devant l'éolien (6,6 %) et le solaire (3,5 %). Le charbon et le gaz, très émetteurs de gaz à effet de serre, représentaient encore plus de 60 % de l'électricité produite (figure 1).

La contribution passée et future du nucléaire à la lutte contre le changement climatique est reconnue. Selon l'AIE⁵, l'énergie nucléaire a permis, entre 1971 et 2020, d'éviter près de 66 Gt d'émissions de CO₂ et donc de freiner la croissance des émissions, principalement dans les pays industrialisés. Sans l'énergie nucléaire, les émissions liées à la production d'électricité auraient été supérieures de 40 % en Europe et de 25 % aux États-Unis. En Europe, l'énergie nucléaire était en 2022 la première source d'électricité bas carbone devant l'éolien⁶. En incluant le Royaume-Uni et la Suisse, l'espace européen est le premier continent nucléaire dans le monde avec 116 réacteurs nucléaires en exploitation dans 15 pays.

1.2 Une contribution attendue

Les enjeux climatiques vont accroître le rôle de l'électricité, dont la production va être multipliée par 2,5 à 3 dans le scénario de neutralité carbone en 2050 (Net



1. Production électrique mondiale 2021

■ Charbon	: 36,1 %
■ Gaz	: 23,2 %
■ Pétrole	: 2,4 %
□ Fossiles capture du carbone	: 0,004 %
■ Nucléaire	: 9,8 %
■ Éolien	: 6,6 %
■ Solaire	: 3,5 %
■ Autres ENR	: 3 %

Source : AIE WEO, 2022

Zero Emissions, NZE) de l'AIE. Ainsi l'électricité représentera 50 % de la consommation finale en 2050, contre 20 % aujourd'hui. L'énergie nucléaire jouera un « rôle significatif », dans un contexte de forte croissance du solaire et de l'éolien, pour sécuriser la trajectoire de décarbonation à 2050. La production d'électricité nucléaire (NZE 2023) fera plus que doubler en passant de 2700 TWh en 2022 à 6000 TWh en 2050. Sans cette contribution du nucléaire, l'agence indique que l'atteinte de la neutralité carbone serait à la fois plus difficile et plus chère, car il faudrait « repousser les frontières » technologiques sur la possibilité d'intégrer une part importante de renouvelables variables. Ainsi, tout gigawatt de nucléaire non construit demandera 3,5 GW de construction d'autres sources, avec un appel accru aux matériaux critiques aussi bien pour la production que pour les réseaux⁷. Multiplier par deux la capacité nucléaire d'ici à 2050 correspond à un rythme d'addition nette de 35 GW/an à partir de 2030, supérieur au rythme actuel, malgré la reprise des mises en chantier de nouveaux réacteurs ces dernières années (on compte 58 réacteurs en construction dans le monde mi-2023). Les décisions doivent se prendre maintenant.

Dans son rapport SR 1.5 de 2018, le GIEC a modélisé 90 trajectoires cohérentes avec la limitation du réchauffement à 1,5 °C. La majorité des scénarios comportaient une croissance du nucléaire, avec une capacité moyenne de

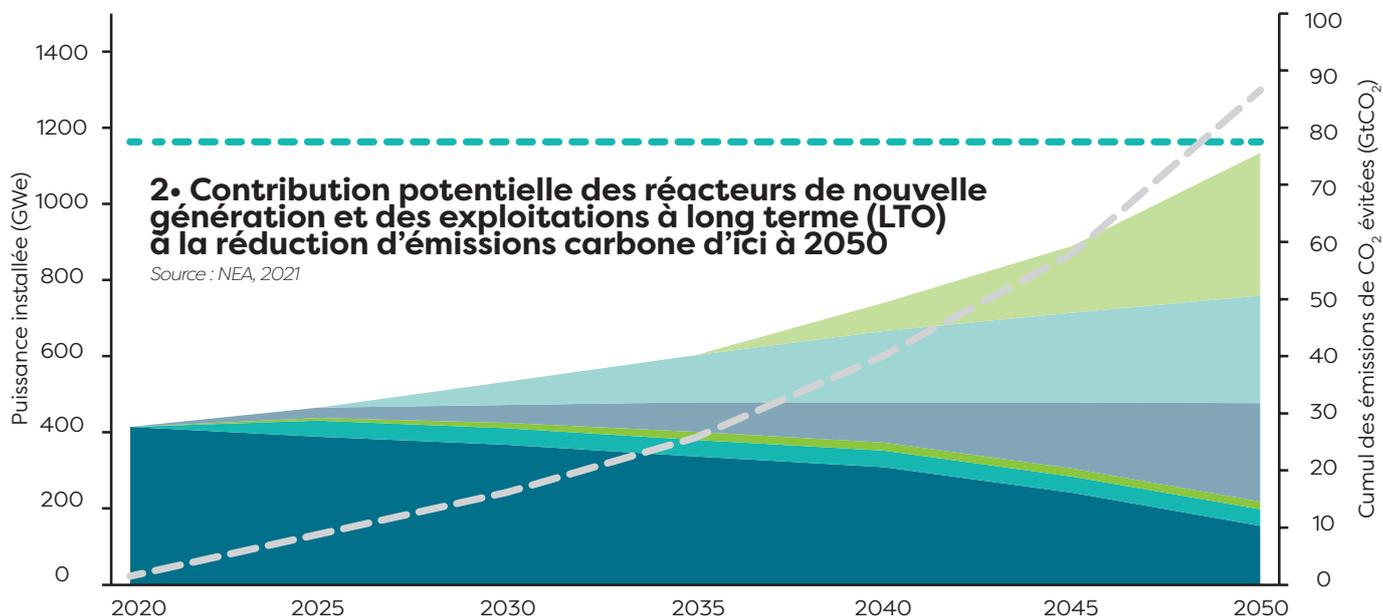
4. AIE - « World Energy Outlook » - 2022.

5. AIE - Ibid.

6. Eurostat.

7. AIE - « Nuclear Power and Secure Energy Transitions » - Juin 2022.

Enseignements



— Émissions cumulées évitées
— Scénarios du Giec à 1,5 °C (moyenne en 2050) = 1160 GW de capacité nucléaire

Perspectives actuelles

- Petits réacteurs modulaires (perspectives de marché en 2035)
- Grands réacteurs de nouvelle génération (en cours de construction)
- Exploitations à long terme (planifiées)

Ambitions

- Petits réacteurs modulaires (extrapolation du marché post-2035)
- Grands réacteurs de nouvelle génération (planifiés)
- Exploitations à long terme (à 80 ans)

1160 GW d'ici à 2050, soit un triplement de la capacité de production. L'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN) a, dans une étude de 2022 (figure 2), étudié comment réaliser cette ambition en combinant le prolongement de réacteurs existants, la construction de nouveaux réacteurs de grande puissance et de petite et moyenne puissance, et de réacteurs avancés capables aussi de réduire les émissions via d'autres vecteurs comme l'hydrogène ou la chaleur. Avec cette trajectoire, la contribution du nucléaire est proche de 90 Gt de CO₂ évitées entre 2020 et 2050.

1.3. La construction des réacteurs de nouvelle génération arrive à maturité

Historiquement, la France ou la Suède ont démontré dans les années 1980, dans le cadre d'ambitieux programmes industriels, leur capacité à construire des réacteurs en série et à décarboner leur système électrique en moins de deux décennies.

Les premiers chantiers des EPR en Europe (Olkiluoto-3 en Finlande et Flamanville-3 en France) et les AP1000 de Westinghouse aux États-Unis (Vogtle-3 et 4) ont connu des retards importants. Ces dérapages s'expliquent d'abord

par la décision de développer une nouvelle génération de réacteurs (dits « de troisième génération ») présentant une sûreté renforcée. Ils témoignent aussi d'une perte de compétence industrielle, dans la mesure où l'Occident n'avait plus construit de nouveaux réacteurs depuis un grand nombre d'années.

Plusieurs exemples récents témoignent pourtant que le déploiement rapide de grands réacteurs de dernière génération est possible. Ainsi les Émirats arabes unis (EAU), en partenariat avec la Corée du Sud, ont construit à Barakah entre 2012 et 2023 quatre réacteurs nucléaires pour une capacité totale de 5,6 GW, capables de fournir à eux seuls 25 % de l'électricité du pays. La Chine, avec plus de 20 réacteurs mis en service au cours des cinq dernières années, dispose d'une chaîne industrielle complète et opérationnelle, ainsi que d'un processus de planification qui garantit à ses industriels une visibilité et une activité continues. Son premier réacteur de technologie domestique Hualong-One a été mis en service en soixante-six mois de construction (Fuqing-5). Les dernières annonces de chantiers tablent maintenant sur soixante mois. L'industriel CNNC⁸ a annoncé une version simplifiée, le Hualong-Two, avec le dessein de réduire le temps de construction à quatre ans.

Enseignements

2 Les signaux de la relance

2.1. Un regain de soutien pour l'énergie nucléaire dans l'opinion publique

Une étude Ipsos (figure 3) réalisée en septembre 2022 pour EDF dans 30 pays auprès de plus de 20 000 personnes révèle que désormais 46 % des personnes interrogées au niveau mondial se prononcent en faveur de l'énergie nucléaire comme moyen de produire de l'électricité. Cela représente un saut de 7 points par rapport à 2021.

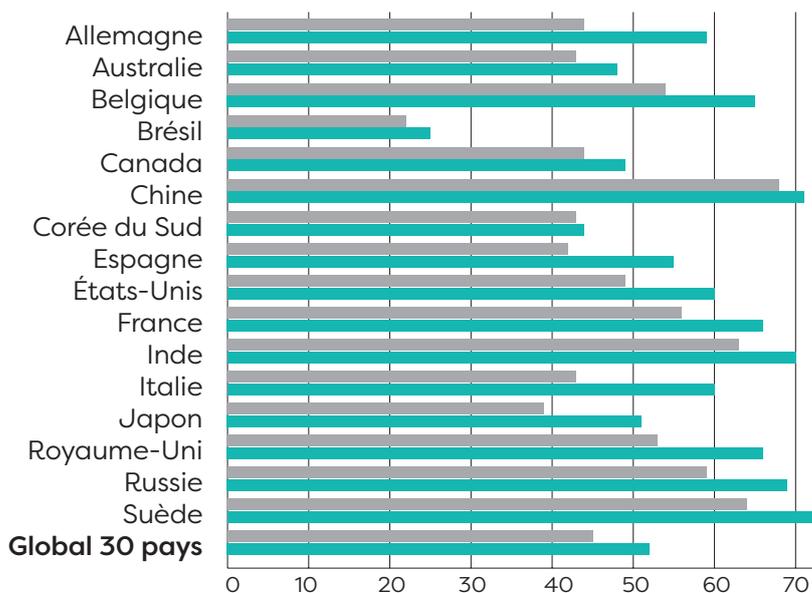
La progression est particulièrement importante sur le continent européen, touché par la crise du gaz et la hausse des prix de l'électricité, avec 11 points de plus en moyenne, et des pics à +17 en Italie, +15 en Allemagne, et +13 en Espagne, trois pays historiquement peu favorables au nucléaire.

À noter que ce regain de soutien est obtenu dans un contexte de déficit de connaissances concernant l'énergie nucléaire. Alors que 66 % des personnes interrogées placent le changement climatique et les événements climatiques extrêmes comme les premiers problèmes environnementaux, 57 % estiment encore que les centrales nucléaires produisent beaucoup ou significativement du CO₂ responsable du changement climatique.

2.2. Des décisions d'exploitation à long terme des réacteurs

Selon l'OCDE-AEN⁹, l'exploitation des réacteurs dans la durée est à la fois la manière la plus rapide et la plus compétitive de produire de l'électricité. Si les autorités de sûreté peuvent être amenées à demander des travaux de maintenance lourde (remplacement de composants, installation de nouveaux systèmes de sûreté), les coûts de construction initiaux sont déjà en grande partie amortis.

Aux États-Unis, où l'énergie nucléaire représente plus de la moitié de l'électricité bas carbone, sur les 93 unités en



3. Pourcentage des personnes favorables au nucléaire pour produire de l'électricité à l'avenir Source : Ipsos, 2022

■ 2022
■ 2021

exploitation, 78 réacteurs disposent déjà d'une licence d'exploitation leur permettant d'aller jusqu'à 60 ans et 6 réacteurs ont même des autorisations jusqu'à 80 ans. En Finlande, deux unités ont obtenu des autorisations jusqu'à 70 ans. En Suisse, les 60 ans sont déjà acquis et peut-être au-delà. Le Japon a annoncé vouloir accélérer le redémarrage de son parc. En septembre 2023, seules 11 unités avaient redémarré sur 33 réacteurs opérables. Une loi a été adoptée afin d'étendre la durée de fonctionnement des réacteurs de l'archipel à 60 ans afin de garantir la sécurité d'approvisionnement et d'atteindre les objectifs climatiques.

De nombreux pays qui envisageaient la fermeture de réacteurs nucléaires ont récemment changé de politique. Aux États-Unis, le gouverneur démocrate de

9. AEN - « Long-Term Operation of Nuclear Power Plants and Decarbonisation Strategies » - 2021.

Enseignements

Californie¹⁰ est revenu en 2022 sur le projet de fermeture de la centrale nucléaire de Diablo Canyon et a annoncé des soutiens financiers pour la maintenance et l'exploitation dans la durée. La France, qui s'était fixé dans sa programmation annuelle de l'énergie un objectif de fermeture de 12 réacteurs d'ici à 2035, est revenue sur cette décision. EDF et l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) ont annoncé étudier sans a priori la possibilité de faire fonctionner des réacteurs à 60 ans, voire au-delà. La première licence d'exploitation à 50 ans a été octroyée à Tricastin-1 en juin 2023.

La Belgique, engagée dans un plan de fermeture de ses sept réacteurs nucléaires d'ici à 2025, est aussi revenue sur sa décision. Deux unités seront finalement exploitées jusqu'en 2035 (Doel-4 et Tihange-3).

L'Allemagne, à contre-courant, a décidé de procéder à la fermeture de ses derniers réacteurs en avril 2023, en faisant fi des recommandations de l'Agence internationale de l'énergie à la suite de la crise du gaz, aggravée par l'invasion de l'Ukraine. À l'été 2023, la question du redémarrage des centrales fermées est revenue dans le débat public, à l'initiative de la CDU, parti d'Angela Merkel, puis du FDP, parti de la coalition gouvernementale.

En France, EDF et l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) ont annoncé étudier sans a priori la possibilité de faire fonctionner des réacteurs à 60 ans, voire au-delà.

2.3. Des annonces de programmes de nouvelles constructions

En mai 2023, 15 pays¹¹ de l'Union européenne et le Royaume-Uni, réunis au sein de l'Alliance du nucléaire à l'initiative de la France, ont affiché l'objectif ambitieux de développer un parc nucléaire de 150 GW en Europe pour 2050, contre 100 GW aujourd'hui. Ils ont précisé vouloir engager la construction de « 30 à 45 nouveaux grands réacteurs et le développement de petits réacteurs modulaires (SMR) ». Pour sa part, la France a annoncé sa volonté de lancer sans tarder la construction de six réacteurs EPR, et d'engager les études pour la construction de huit unités supplémentaires d'ici à 2050. Elle projette aussi de lancer vers 2030 de premières constructions de petits réacteurs nucléaires flexibles conçus pour la cogénération d'électricité et de chaleur de type Nuward, ainsi qu'un prototype de réacteur innovant de type AMR dans le cadre du plan France 2030.

Selon l'AIEA, en septembre 2023, le monde comprend 57 réacteurs nucléaires en construction. Ces réacteurs sont essentiellement des réacteurs de forte puissance. La Chine représente à elle seule plus d'un tiers de ces réacteurs avec son programme domestique de construction en série. La Russie continue sa politique d'exportation vers de nouveaux pays entrants, et rend compte de l'avancée de ses chantiers, en particulier en Turquie (quatre unités) et en Égypte (quatre unités).

L'année 2023 a fait l'objet de nombreuses annonces gouvernementales, comme la Pologne ou les Pays-Bas qui ont relancé, contre toute attente, un projet de construction de nouveaux réacteurs. Parmi ces annonces, beaucoup concernent les petits réacteurs, comme aux États-Unis ou en Estonie qui est un pays primo-accédant au nucléaire. Plusieurs pays ont annoncé des réacteurs de

10• California Governor – « Governor Newsom Statement on Federal Funding for Diablo Canyon Extension » – Novembre 2022.

11• Belgique, Bulgarie, Croatie, Estonie, Finlande, France, Hongrie, Pays-Bas, Pologne, République tchèque, Roumanie, Slovaquie, Slovénie, Suède, Royaume-Uni en tant qu'invités et Italie en tant qu'observateur.

Enseignements

forte puissance, comme la Bulgarie. Le Canada table à la fois sur des constructions de petits réacteurs dans la province de la Saskatchewan pour des sites isolés, et des programmes de grands réacteurs. Ainsi Bruce Power dans l'Ontario a annoncé en juillet 2023 un projet de construction de 4,8 GW¹² de nouvelle capacité nucléaire.

2.4. Une vague mondiale d'innovations dans le nucléaire

À l'image de ce que connaît le monde spatial depuis maintenant une quinzaine d'années, le nucléaire est porté par une vague d'innovations liée au développement de petits réacteurs modulaires (SMR) et de technologies avancées (AMR), des réacteurs de fission dits « de quatrième génération » ou même de fusion. Ainsi, l'AIEA recensait, en 2022, plus de 70 concepts différents dans le monde entier. Ce mouvement est soutenu par les gouvernements.

Ainsi, aux États-Unis, le budget annuel du Department of Energy (DoE) pour la recherche et développement nucléaire s'est élevé à environ 1,7 milliard de dollars pour 2021, 2022 et 2023, pour soutenir une dizaine de projets. Les autorités chinoises soutiennent également de nombreux projets, dans toutes les technologies : elles ont ainsi annoncé la mise en service d'un premier réacteur à haute température en 2021, lancé la construction de deux réacteurs à neutrons rapides en 2017 et 2020 et octroyé une licence d'exploitation à un réacteur expérimental à sels fondus.

Dans le cadre du programme France 2030, l'Hexagone a lancé un appel à projets pour des réacteurs innovants pour un montant total de 500 millions d'euros. Le nombre de répondants a dépassé les attentes initiales puisque près d'une quinzaine de start-up se sont manifestées. Paris a annoncé en juin 2023 les

À l'image de ce que connaît le monde spatial depuis une quinzaine d'années, le nucléaire est porté par une vague d'innovations.

deux premiers lauréats de la phase 1 du projet : Naarea et Newcleo. Si aujourd'hui l'agence européenne Euratom est très peu active pour soutenir la recherche dans les réacteurs de fission, on voit apparaître des start-up dans d'autres pays européens, comme Thorizon aux Pays-Bas, ou Seaborg au Danemark¹³, un pays qui n'exploite pas de réacteur nucléaire aujourd'hui.

Enfin, le monde de la fusion nucléaire¹⁴ a connu en 2022 une année record avec une vague d'investissements de 6,1 milliards de dollars, selon le troisième rapport annuel de la Fusion Industry Association (FIA)¹⁵. La base d'investissements est de plus en plus large, puisque pour son étude, la FIA a interrogé 43 entreprises privées spécialisées dans la fusion, contre seulement 27 l'année précédente.

12. Bruce Power – « Ontario government supports long-term planning and consultation work to explore the expansion of clean nuclear at Bruce Power » – Septembre 2023.

13. RGN – « Barge nucléaire : le Danois Seaborg s'allie avec des constructeurs » – Avril 2023.

14. RGN – « Nouveau record d'investissement dans la fusion nucléaire en 2022 » – Août 2023.

15. Fusion Industry Association – « Global Fusion Industry Report » – 2023.

Enseignements

3 De nouveaux schémas

Le principal enjeu de l'industrie dans les années qui viennent sera de concrétiser cette relance. L'Occident doit en particulier retrouver la capacité industrielle de construire en série de nouvelles installations. Au-delà, l'actualité de 2023 a mis en évidence la nécessité de nouveaux schémas dans au moins trois domaines : la géopolitique du combustible, le financement des projets et les nouveaux usages du nucléaire.

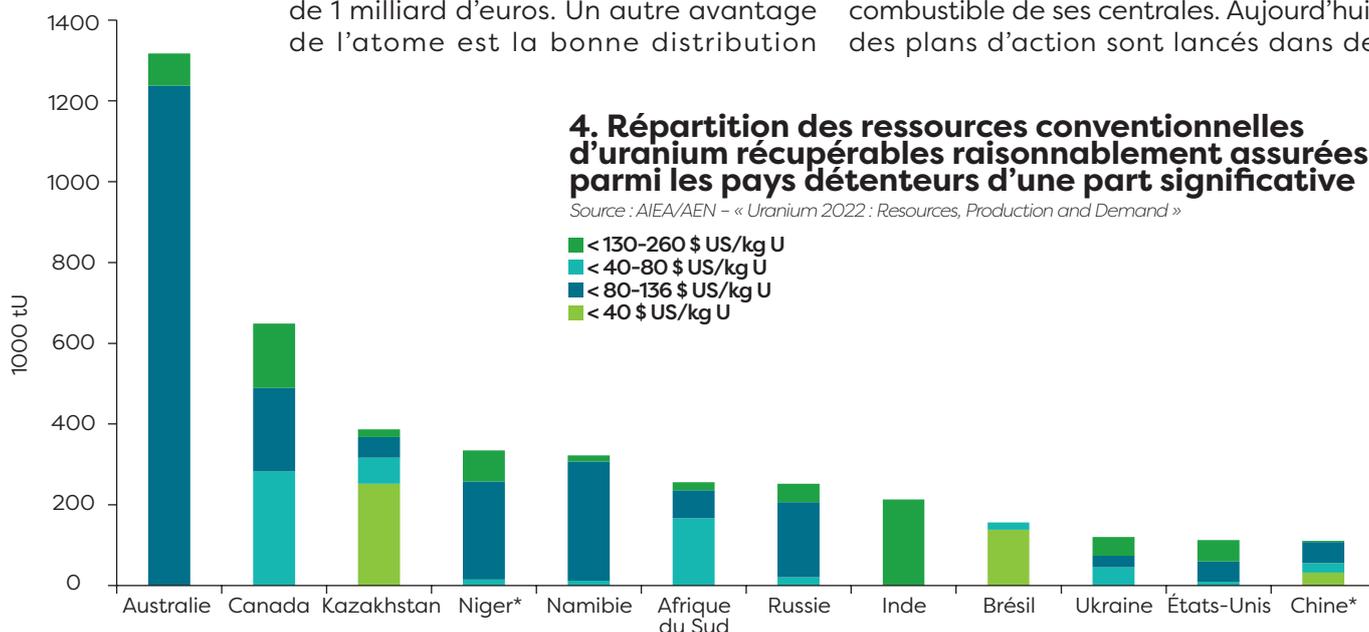
3.1. La géopolitique du combustible

De nombreux États, dont la France, ont investi dans le nucléaire dans le but de protéger leur économie des variations des marchés mondiaux de l'énergie. Un des grands avantages de l'atome est en effet que le coût de production de l'électricité ne dépend que pour 5 % du prix de l'uranium. Ainsi, la France a importé en 2022 pour 115 milliards d'euros¹⁶ de pétrole et de gaz. En comparaison, les importations d'uranium pour la consommation des centrales françaises ont représenté moins de 1 milliard d'euros. Un autre avantage de l'atome est la bonne distribution

géographique des ressources d'uranium (figure 4) qui facilite l'approvisionnement. Enfin, la densité énergétique de l'uranium étant très élevée, elle permet aux exploitants de disposer de stocks importants, qui les mettent à l'abri d'une coupure soudaine de l'approvisionnement. En France, le stock correspond à dix ans de production¹⁷.

La crise en Ukraine a, depuis 2022, révélé un certain nombre de dépendances pour plusieurs pays en ce qui concerne l'ensemble du cycle du combustible. Si la Russie ne représentait qu'un faible pourcentage de la production d'uranium au niveau mondial, sa part de marché sur la conversion chimique et l'enrichissement de l'uranium était importante, en particulier pour les États-Unis. La Russie fabrique aussi des assemblages de combustible pour des exploitants de centrales de sa technologie (VVER) en Europe de l'Est.

La France dispose sur son sol des installations nécessaires pour convertir et enrichir son uranium naturel (à l'exception de l'uranium de retraitement) et fabriquer le combustible de ses centrales. Aujourd'hui, des plans d'action sont lancés dans de



* Estimation ou estimation partielle du Secrétaire de l'AEN.

16. Le chiffre du commerce extérieur - « Synthèse annuelle : les résultats annuels 2022 ».
17. Orano - Comprend les stocks d'uranium naturel et appauvri.

Enseignements

nombreux pays. Ainsi, des pays de l'Est, comme la République tchèque et la Bulgarie, ont annoncé de nouveaux accords avec l'Américain Westinghouse et le Français Framatome. Les États-Unis ont lancé des initiatives pour ne plus importer d'uranium enrichi russe et ne plus dépendre du monopole russe sur le combustible moyennement enrichi, dit « Haleu ». En France, Orano a annoncé la poursuite de son projet d'extension de capacité de son usine d'enrichissement Georges Besse-2 au Tricastin pour servir ses clients occidentaux en substitution des usines russes. La poursuite du projet devra être entérinée par le conseil d'administration d'ici à fin 2023.

Enfin, en marge du G7 d'avril 2023, cinq des pays (Canada, États-Unis, France, Japon et Royaume-Uni) se sont entendus sur une coopération renforcée sur le combustible nucléaire pour les réacteurs actuels et futurs.

Pour ce qui concerne l'approvisionnement global en uranium, la relance

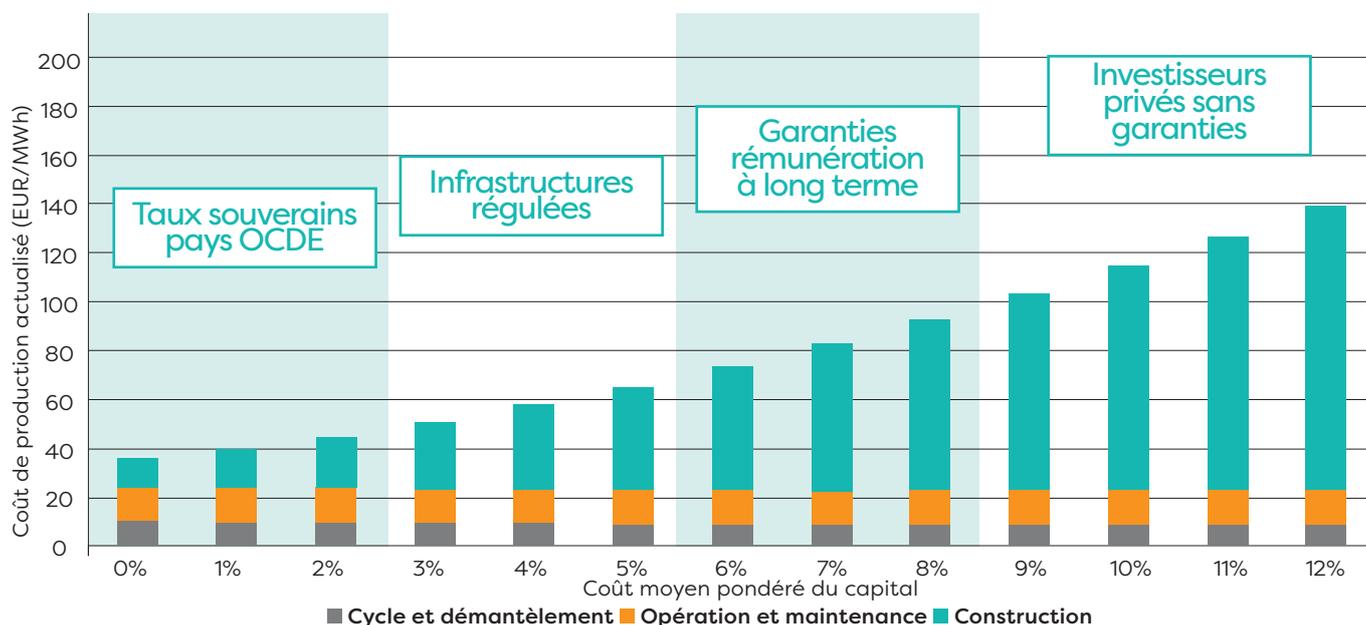
mondiale ne pose pas de contrainte. Selon le dernier rapport de la World Nuclear Association (WNA)¹⁸, l'industrie minière est en capacité de fournir les réacteurs à long terme, même selon leur scénario le plus ambitieux qui anticipe un triplement des besoins d'ici à 2040. En revanche, l'approvisionnement à moyen terme demande des mises en chantier de mines rapidement pour compenser la chute de production à partir de 2030.

3.2. Les enjeux de financement

Au-delà de leur caractère capitalistique, les projets nucléaires sont spécifiques par leur taille et par leur durée. Ils nécessitent des investissements initiaux importants, assortis de frais financiers élevés pendant toute la durée de construction, et ne permettent pas de retour sur investissement avant cinq à dix ans. La Sfen (figure 5) a montré¹⁹ que le coût de production de l'électricité est extrêmement sensible au taux de rendement

5. Coût de production de l'électricité selon le coût de financement

Source : Sfen, octobre 2022.



18. WNA - « Nuclear Fuel Report 2023 » - Septembre 2023.

19. Sfen - « Comment financer le renouvellement du parc nucléaire ? » - Octobre 2021.

Enseignements

attendu du projet. À titre d'exemple, le coût du kilowattheure de Hinkley Point C (Royaume-Uni) double quand le taux de rémunération passe de 3 % à 10 % (valeur proche du taux retenu par EDF pour le projet).

Historiquement, la Russie a accompagné ses projets à l'export avec des financements bilatéraux. Ainsi, dans le cas du projet Paks en Hongrie, elle a proposé un prêt interétatique à 3 % (taux souverain). Ces derniers mois ont aussi vu les États-Unis développer des offres de financement bilatérales, en particulier en Pologne ou en Ukraine, au service des technologies américaines. Ils ont annoncé en Égypte à la COP7 en 2022 le programme de financement Phoenix, qui vise à promouvoir l'énergie nucléaire et les SMR en particulier. La question de l'intégration du nucléaire dans les nouvelles taxonomies pour les investissements propres a agité l'Union européenne. Alors que l'organe scientifique européen, le Joint Research Center (JRC), avait validé le nucléaire comme répondant aux

critères de la taxonomie, cette énergie a été classée seulement comme énergie de transition. Les débats portent désormais à Bruxelles sur le statut stratégique du nucléaire au sein du programme Net-Zero Industry Act (NZIA), lequel doit soutenir les activités favorables à l'atteinte de la neutralité carbone en 2050. À noter que, de leur côté, les États-Unis ont intégré naturellement le nucléaire comme énergie bas carbone bénéficiant des aides de l'Inflation Reduction Act (IRA).

3.3. Les nouveaux usages : au-delà de l'électricité

Si l'électricité est un vecteur essentiel de la décarbonation de l'économie, d'autres vecteurs, comme la chaleur et l'hydrogène bas carbone, seront nécessaires, en substitution des énergies fossiles, dans l'industrie, le bâtiment et le transport. De nombreuses expérimentations se développent partout dans le monde pour permettre au nucléaire de contribuer à la décarbonation au-delà de l'électricité.

Pour alimenter des réseaux de chaleur urbains, la cogénération, c'est-à-dire la production simultanée de chaleur et d'électricité bas carbone, est déjà une solution éprouvée. Selon l'AIEA, 43 réacteurs nucléaires dans le monde alimentent aujourd'hui des réseaux de chauffage urbain, la plupart en Europe de l'Est et en Russie. Plus proche, la centrale de Beznau en Suisse fournit depuis 1983 de la chaleur à 20 000 personnes²⁰. La Chine accélère aujourd'hui et a lancé fin 2020²¹ un service de fourniture de chaleur bas carbone à grande échelle dans la ville côtière de Haiyang, à partir de réacteurs AP1000. Ce projet doit accueillir une boucle d'extension de 23 km qui servira un million d'habitants, et éliminera, en remplacement des chaudières à charbon

Outre l'électricité, d'autres vecteurs, comme la chaleur et l'hydrogène bas carbone, seront nécessaires, en substitution des énergies fossiles, dans l'industrie, le bâtiment et le transport.

20. AIEA - « Au-delà de la production d'électricité : l'électronucléaire au service des applications non électriques ».
21. WNN - « China starts building long-distance nuclear heating pipeline » - Février 2023.

Enseignements

actuelles, 1,65 Mt d'émissions de CO₂ annuelles.

De nouvelles technologies nucléaires avancées visent la production de chaleur à températures élevées (supérieures à 500 °C), lesquelles sont nécessaires pour décarboner un certain nombre de procédés industriels. Alors qu'un premier réacteur à haute température a démarré en Chine fin 2021, le chimiste américain Dow Chemical a annoncé un accord avec la société X-energy pour construire quatre démonstrateurs Xe-100 de réacteurs à haute température, dont le premier sur son site industriel de Seadrift au Texas²².

Le nucléaire peut contribuer aux objectifs de production d'hydrogène bas carbone en alimentant des électrolyseurs à basse et haute température, sur le site même ou via le réseau de transport d'électricité. Aux États-Unis, une première centrale nucléaire²³, Nine Mile Point (Constellation), dans l'État de New York, a commencé en mars 2023 à produire de l'hydrogène bas carbone via un électrolyseur basse température sur site dans le cadre d'un programme fédéral. Au Royaume-Uni, un consortium dirigé par EDF a reçu en septembre 2023²⁴ un financement du gouvernement britannique pour développer à la centrale de Heysham-2 la production, avec des électrolyseurs haute température couplés aux réacteurs en mode « hybridation nucléaire », d'hydrogène bas carbone



Le nucléaire peut contribuer aux objectifs de production d'hydrogène bas carbone en alimentant des électrolyseurs à basse et haute température.

destiné à la production d'asphalte et de ciment.

Enfin, l'utilisation de l'énergie nucléaire pour dessaler l'eau est aussi une technologie éprouvée²⁵. Au Japon, plusieurs installations de dessalement liées à des réacteurs nucléaires produisent environ 14 000 m³ d'eau potable par jour. La centrale nucléaire de Madras²⁶ en Inde accueille une installation de dessalement qui produit 6,3 millions de litres d'eau douce par jour. Basée sur une technologie hybride thermique et osmotique, l'installation utilise l'eau de mer et la chaleur produite par la centrale.

22• Energy Intelligence - « United States: Dow's decarbonization ambitions via X-energy's SMR » - Juillet 2023.

23• Office of Nuclear Energy - « Nine Mile Point begins clean hydrogen production » - Mars 2023.

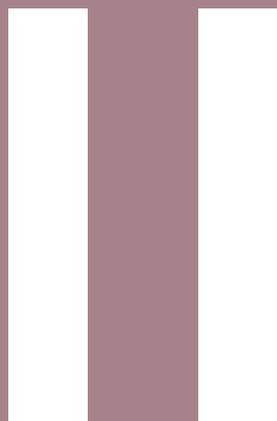
24• WNN - « More funding to progress UK nuclear-generated hydrogen project » - Septembre 2023.

25• AIEA - Ibid.

26• The Hindu - « Hybrid desalination plant at Kalpakkam » - Décembre 2012.

Focus

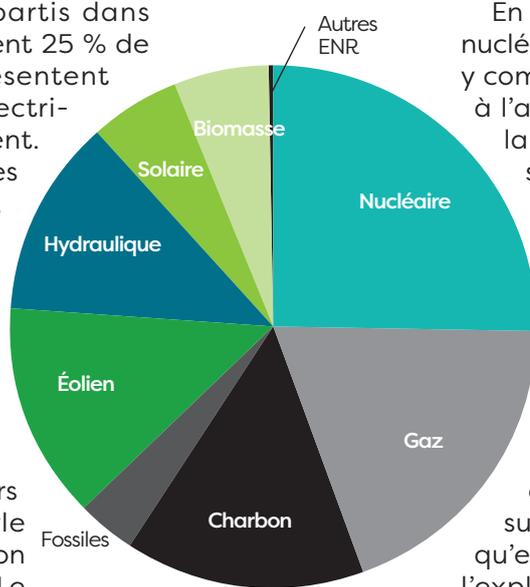
Géographiques



Focus géographiques Europe

1 Europe : relance du nucléaire

Pour l'Europe²⁷, le nucléaire est un socle bas carbone. Les 116 réacteurs nucléaires répartis dans quinze pays produisent 25 % de l'électricité et représentent 50 % de la production d'électricité bas carbone du continent. Cet atout est un héritage des années 1970-1990, et depuis, les nouveaux chantiers de réacteurs se sont résumés à quelques projets. Néanmoins, l'atome est bien de retour sur le Vieux Continent. Une dynamique qui s'observe à travers deux axes. Le premier est la généralisation de l'exploitation des réacteurs au-delà de 40 ans. On parle de LTO (Long term exploitation - exploitation à long terme). Le second est la planification de véritables programmes de construction de nouveaux réacteurs. Le 28 février 2023, quinze pays de l'Union européenne (Belgique, Bulgarie, Croatie, Estonie, Finlande, France, Hongrie, Italie, Pays-Bas, Pologne, République tchèque, Roumanie, Slovaquie, Slovénie, Suède²⁸) ont créé une « Alliance du nucléaire » visant à renforcer les coopérations dans le domaine.



6. Mix électrique en Europe 2021

■ Nucléaire : 25,4 %
■ Gaz : 19 %
■ Charbon : 14,5 %
■ Fossiles (autres) : 3,6 %
■ Éolien : 13,4 %
■ Hydraulique : 12 %
■ Biomasse : 5,8 %
■ Solaire : 5,6 %
■ Autres ENR : 0,2 %
Source : Eurostat

1.1. L'exploitation des réacteurs au-delà de 40 ans se généralise

En Europe, l'exploitation des réacteurs nucléaires se poursuit au-delà de 40 ans, y compris dans des pays non favorables à l'atome. C'est par exemple le cas de la Belgique qui a repoussé de 10 ans sa sortie du nucléaire grâce à la prolongation de deux réacteurs (Doel-4 et Tihange-3) jusqu'à 50 ans. La Finlande a annoncé l'exploitation jusqu'en 2050, soit pendant 70 ans, de deux réacteurs à Loviisa. En France, fin 2023, 25 des 56 réacteurs du parc auront été exploités plus de 40 ans. Dans l'Hexagone, les autorisations d'exploitation se font sur le pas décennal, moins en amont qu'en Finlande ou aux États-Unis, mais l'exploitation jusqu'à 60 ans est d'ores et déjà étudiée par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN).

27. L'Union européenne, le Royaume-Uni et la Suisse.

28. L'Italie et la Belgique y ont assisté avec le statut d'observateurs.

1.2. Les perspectives de nouveaux réacteurs se multiplient

Les projets de nouveaux réacteurs se multiplient, que ce soit en France, au Royaume-Uni, en Hongrie, en République tchèque, en Pologne, en Bulgarie ou encore aux Pays-Bas, en Suède, en Finlande, en Slovénie et en Slovaquie.

Trois programmes se démarquent par leur ampleur en France, au Royaume-Uni et en Pologne. Pour la France, il s'agit de construire six à quatorze EPR2 afin de maintenir un socle important d'électricité nucléaire. Le Royaume-Uni souhaite lancer à Sizewell le chantier de deux EPR, alors que deux unités sont actuellement en construction dans le sud-ouest du pays, à Hinkley Point C. Les autorités britanniques ont l'objectif ambitieux d'atteindre 24 GW de capacité nucléaire d'ici à 2050 contre 5,8 GW aujourd'hui, et ce, alors que le pays doit faire face au déclin

de son parc nucléaire dont les caractéristiques technologiques ne permettent pas une exploitation aussi longue que celle des réacteurs à eau pressurisée. Pour la Pologne, le défi consiste à construire les premiers réacteurs du pays dans le cadre d'un programme comprenant 6 à 9 GW de nucléaire. La Pologne a sélectionné, sans passer par un processus concurrentiel, l'Américain Westinghouse en octobre 2022 pour trois premières unités.

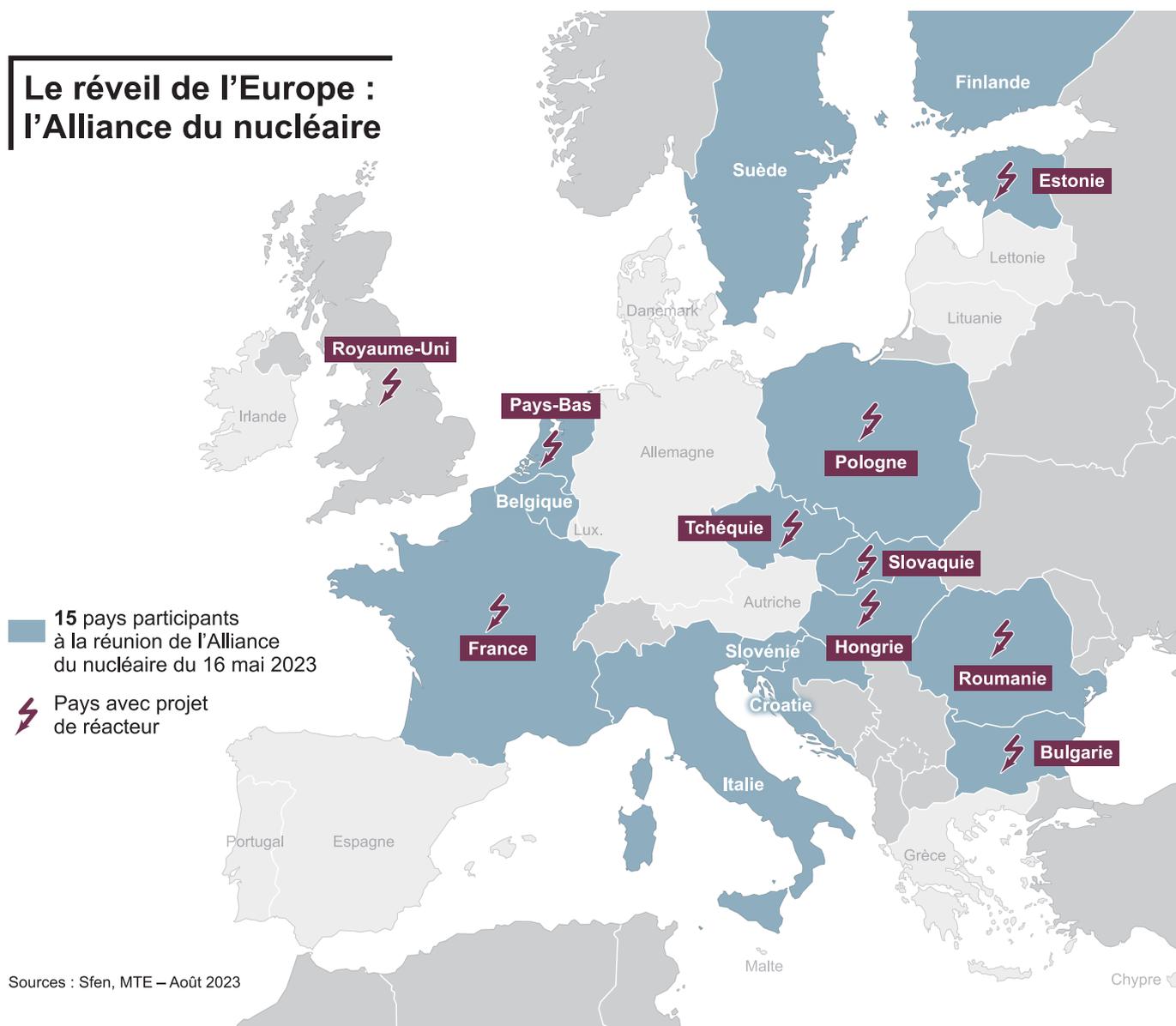
La République tchèque a lancé un appel à projets pour la construction d'un réacteur à Dukovany. Les Pays-Bas ont annoncé fin 2022 vouloir construire deux unités dès 2028. Le projet hongrois de deux réacteurs russes de 1200 MW (Paks-2) a reçu son permis de construction fin août 2022. La Bulgarie prévoit également la construction de quatre unités. Enfin, la Suède a lancé en 2023 une initiative visant à mettre fin à l'ancien cadre réglementaire qui limite à dix le nombre de réacteurs sur le territoire national et qui exclut la possibilité d'ouvrir de nouveaux sites.

À tous ces projets, il est nécessaire d'ajouter que plusieurs pays (Belgique, Estonie, Finlande, Italie, Pologne, Royaume-Uni...) sont intéressés par les petits réacteurs modulaires (SMR) et les réacteurs avancés (AMR), bien qu'il soit trop tôt pour savoir quels sont les projets qui se réaliseront.

À savoir : L'Alliance du nucléaire considère que l'énergie nucléaire pourrait fournir à l'Union européenne jusqu'à 150 GW de capacité électrique d'ici à 2050, contre environ 100 GW aujourd'hui.

Focus géographiques Europe

Le réveil de l'Europe : l'Alliance du nucléaire



Focus géographiques France

2 Les quatre programmes du nucléaire français

La France se prépare au renouvellement partiel de son parc nucléaire avec la construction de trois paires d'EPR2 (1650 MW), tout en encourageant le développement de réacteurs innovants à travers le plan d'investissement France 2030. C'est une enveloppe de 1 milliard d'euros qui se partage entre les technologies de rupture (AMR) et le projet SMR Nuward. La Sfen a identifié près d'une quinzaine de nouvelles start-up installées en France.

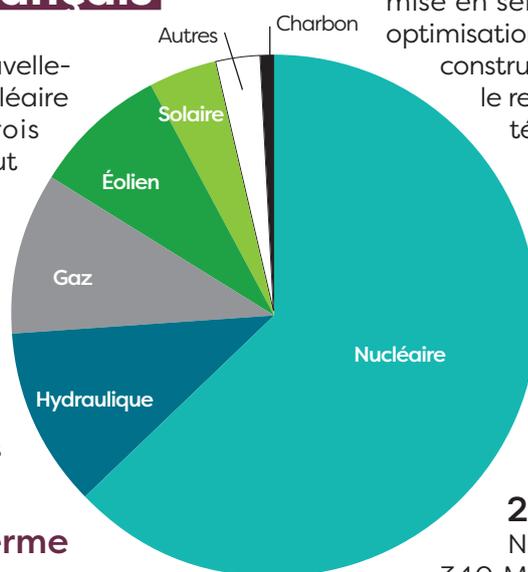
2.1. L'exploitation à long terme des réacteurs

L'exploitation à long terme, ou LTO en anglais, désigne une durée de fonctionnement au-delà de 40 ans. Le terme est notamment employé aux États-Unis, où la licence d'un réacteur est donnée pour 40 ans avec un renouvellement par tranche de 20 ans. En France, les 40 ans d'exploitation ne représentent pas une date symbolique puisque l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) autorise les réacteurs à fonctionner par tranche de 10 ans, sans durée limite. Afin que le parc nucléaire historique, qui représente entre 60 % et 70 % de la production d'électricité, continue à être exploité en toute sûreté, EDF a engagé en 2014 le programme « Grand Carénage ». Il consiste à rénover ou remplacer les gros composants arrivant en fin de vie technique, à réaliser les modifications nécessaires à l'amélioration de la sûreté et à assurer la pérennité de la qualification des matériels après 40 ans. Ces opérations ont été réalisées sur presque tous les réacteurs de 900 MWe et continuent sur ceux de 1300 MWe.

2.2. Le programme EPR2

Le programme EPR2 consiste en la construction de six réacteurs EPR2 avec une option pour huit unités supplémentaires. Le

lancement de la construction de la première unité est prévu en 2028 pour une mise en service en 2035. L'EPR2 est une optimisation, notamment sur le volet de la constructibilité, de l'EPR. Il s'appuie sur le retour d'expérience des trois unités EPR en service en Chine (Taishan-1 et Taishan-2) et en Finlande (Olkiluoto-3), mais aussi sur celui des deux unités en construction au Royaume-Uni à Hinkley Point C et l'unité de Flamanville, qui doit entrer en service en 2024. Les sites sélectionnés pour accueillir des EPR2 sont Penly, Gravelines et Bugey.



7. Mix électrique 2022

- Nucléaire : 63 %
- Hydraulique : 11 %
- Gaz : 10 %
- Charbon : 0,6 %
- Éolien : 8,4 %
- Solaire : 4 %
- Autres : 3 %

Source : RTE

2.3. Le SMR Nuward

Nuward est une centrale de 340 MWe composée de deux réacteurs à eau pressurisée de 170 MWe. Dévoilée en 2019, Nuward a bénéficié du savoir-faire du CEA, de TechnicAtome, de Naval Group ainsi que de celui de Framatome et de Tractebel. Son développement est, depuis mars 2023, concentré dans l'entreprise du même nom détenue à 100 % par EDF. Les marchés visés sont le remplacement des anciennes centrales à charbon, au fioul et au gaz dans le monde, mais aussi ceux en lien avec de nouveaux usages du nucléaire, y compris en France, comme la production de chaleur, le dessalement et la production d'hydrogène. La construction d'une première unité de référence pourrait être lancée en France dès 2030.

À savoir : Le 10 février 2022, le président de la République, Emmanuel Macron, a annoncé la construction de six EPR2 et le lancement d'études pour huit unités supplémentaires.

Focus géographiques France

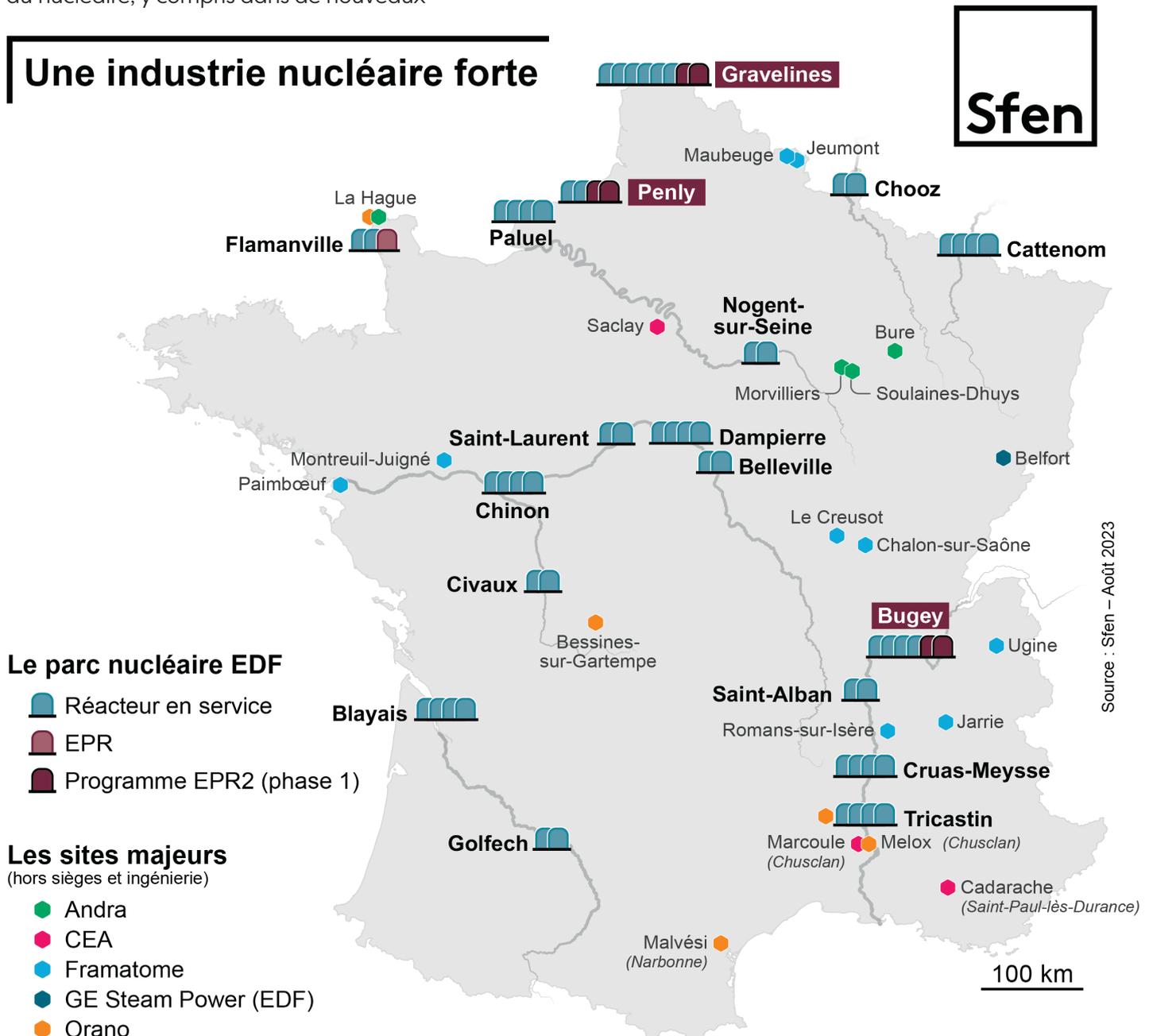
2.4. Un foisonnement de projets innovants

L'appellation « réacteurs innovants », ou AMR pour « Advanced Modular Reactors », désigne une multitude de technologies qui diffèrent des réacteurs à eau légère formant aujourd'hui la quasi-totalité des unités en exploitation. Ces réacteurs peuvent apporter d'importants bénéfices sur la gestion des matières nucléaires, la sûreté et la compétitivité du nucléaire, y compris dans de nouveaux

usages comme la production de chaleur urbaine ou industrielle, d'hydrogène, d'eau douce, etc. L'appel à projets de France 2030 a fait émerger un nombre important d'acteurs, français et parfois transnationaux, proposant des réacteurs innovants basés sur des concepts explorés par le passé, mais non développés à l'échelle industrielle, faute de compétitivité économique face au gaz ou au charbon.

Une industrie nucléaire forte

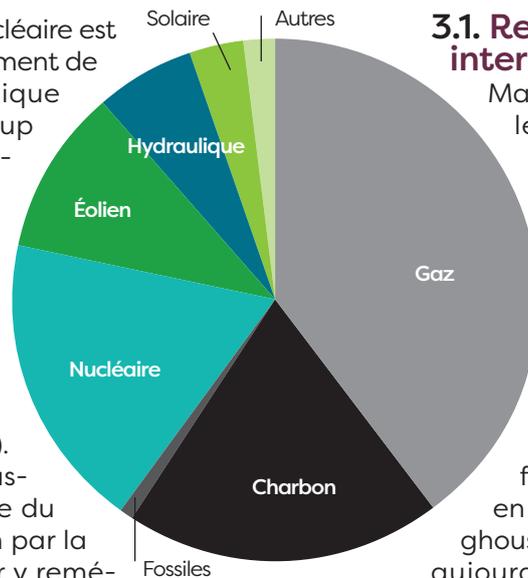
Sfen



Focus géographiques États-Unis

3 États-Unis : le réveil d'une superpuissance

La maîtrise de l'énergie nucléaire est encore aujourd'hui un élément de souveraineté technologique et compte pour beaucoup dans la stratégie géopolitique des grandes nations. Mais « l'Amérique est en train de perdre sa position de leader mondial dans le domaine du nucléaire au profit d'entreprises d'État, notamment [celles de] la Russie et [de] la Chine [...] », alertait en avril 2020 le ministère de l'Énergie américain (DoE). Cette situation résulte d'un sous-investissement dans le domaine du nucléaire civil, mis sous pression par la forte concurrence du gaz. Pour y remédier, les pouvoirs publics ont pris un certain nombre d'initiatives afin de relancer l'industrie américaine dans son ensemble : financement par les pouvoirs publics de la R&D pour le compte de l'industrie privée, renforcement de la coopération entre acteurs privés et laboratoires de recherche nationaux, développement d'une chaîne d'approvisionnement en combustible domestique, réforme du cadre réglementaire nucléaire, soutien via des incitations fiscales au parc nucléaire d'aujourd'hui et de demain. Plus encore, forts de ce volontarisme politique, les États-Unis ont fait un



8 • Mix électrique 2022
■ Gaz : 39,8 %
■ Charbon : 19,5 %
■ Fossiles (autres) : 0,9 %
■ Nucléaire : 18,2 %
■ Éolien : 10,2 %
■ Hydraulique : 6,2 %
■ Solaire : 3,4 %
■ Autres : 1,7 %
Source : US EIA

véritable retour en force à l'export avec le réacteur de troisième génération proposé par Westinghouse, l'AP1000 (1100 MW).

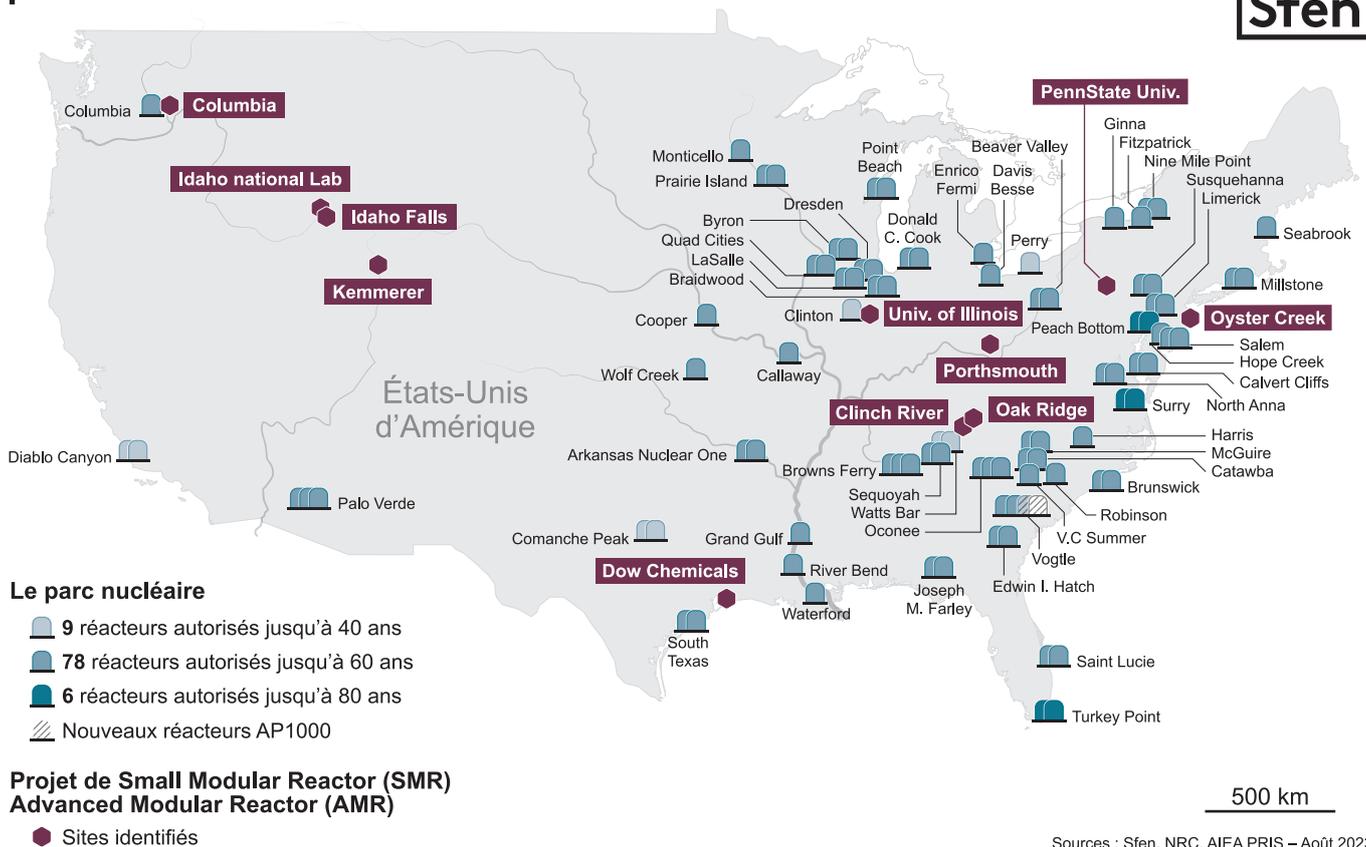
3.1. Retour sur la scène internationale

Malgré les difficultés rencontrées sur les chantiers nationaux, le futur du réacteur de troisième génération de Westinghouse semble s'éclaircir, avec notamment l'achèvement du projet Vogtle et le choix par certains pays de la technologie AP1000. Pour rappel, en 2013, le pays a lancé la construction de quatre réacteurs AP1000, dont les deux unités de V.C. Summer qui furent finalement abandonnées en 2017 lors de la faillite de Westinghouse. Ces temps incertains semblent aujourd'hui s'éloigner à grande vitesse avec l'entrée en service commercial du premier AP1000 américain le 31 juillet 2023 et avec l'intérêt de plusieurs pays (Chine, Pologne, Ukraine, Bulgarie) pour ce réacteur. Fin 2022, la Pologne a en effet sélectionné l'Américain pour trois premières unités. L'Ukraine et la Bulgarie se sont également montrées intéressées pour plusieurs unités et il est prévu que six réacteurs supplémentaires soient construits en Chine, en plus des quatre réacteurs déjà en exploitation commerciale depuis 2018. Ces projets restent aujourd'hui à concrétiser.

À savoir : L'Inflation Reduction Act comporte plusieurs dispositifs afin de maintenir le parc nucléaire en exploitation, des incitations fiscales pour faciliter le déploiement des réacteurs innovants et 700 millions de dollars pour soutenir le développement d'une chaîne nationale d'approvisionnement de combustible HALEU.

États-Unis : exploitation à long terme et projets de réacteurs innovants

Sfen



3.2. Un élan important donné aux petits réacteurs modulaires (SMR/AMR)

La politique nucléaire américaine allie un soutien financier aux centrales en difficulté économique à travers le plan Infrastructures et l'Inflation Reduction Act (IRA) et un soutien aux multiples projets de petits réacteurs modulaires. Ces derniers composent un ensemble de technologies variées aussi bien développées par des start-up que par de grands industriels. L'un des objectifs de cette politique est d'innover rapidement. Ainsi, dans le cadre de l'Advanced Reactor Demonstration Program, lancé en 2021, le Department of Energy a notamment accordé un financement de 2 milliards de dollars à TerraPower pour son réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium, et 1,2 milliard à X-energy pour son réacteur à haute température refroidi au gaz.

À noter également, en janvier 2023, le réacteur de NuScale est devenu le premier SMR certifié par l'autorité de sûreté nucléaire (NRC) et GE-Hitachi, avec son petit réacteur à eau bouillante, a signé au Canada le premier contrat commercial en Amérique du Nord pour un SMR. Ce dernier dispose également d'un site de

construction. La première unité pourrait être mise en service dès 2028 ainsi que trois unités supplémentaires entre 2034 et 2036.

3.3. Approvisionnement en combustible : des fragilités en cours de correction ?

Les États-Unis s'intéressent de nouveau à leur souveraineté pour leur approvisionnement en combustible dont une partie repose sur la Russie : le parc nucléaire américain dépend à 24 % de l'uranium enrichi russe. Plus encore, la production du combustible moyennement enrichi (Haleu), que nécessiteront certains projets novateurs, est un monopole détenu par une filiale du géant Rosatom. Plusieurs actions ont été annoncées afin de faire face à ces problématiques et notamment la création d'une réserve stratégique fédérale d'uranium en 2022, qui constitue une source d'approvisionnement de secours, et la création d'un consortium pour sécuriser l'approvisionnement en Haleu. Un appel à propositions préliminaires a été publié en juin 2023 pour la construction d'usines d'enrichissement (Haleu) sur le sol américain.

Focus géographiques Chine

4 Chine : le nouveau géant

La Chine est un géant qui s'affaire en priorité à répondre à ses besoins d'électricité toujours plus importants. En effet, le pays consommait près de 4000 TWh d'électricité²⁹

en 2010, il en consomme aujourd'hui plus du double avec 8400 TWh en 2022. En 2022, il a produit un tiers de l'électricité mondiale ! Le charbon répond en grande partie à sa demande avec une part de presque 60 % de son mix électrique en 2022. Le nucléaire représente 5 % de la production électrique, et ce, malgré un doublement de la capacité nucléaire entre 2015 et 2021 pour dépasser aujourd'hui les 57 GW. Avec plus de vingt réacteurs en construction, la Chine disposera bientôt du deuxième plus grand parc nucléaire au monde derrière les États-Unis. Enfin,

l'empire du Milieu se distingue aussi dans le domaine de la recherche et développement par sa vitalité et est sans aucun doute l'un des pays les plus entreprenants.

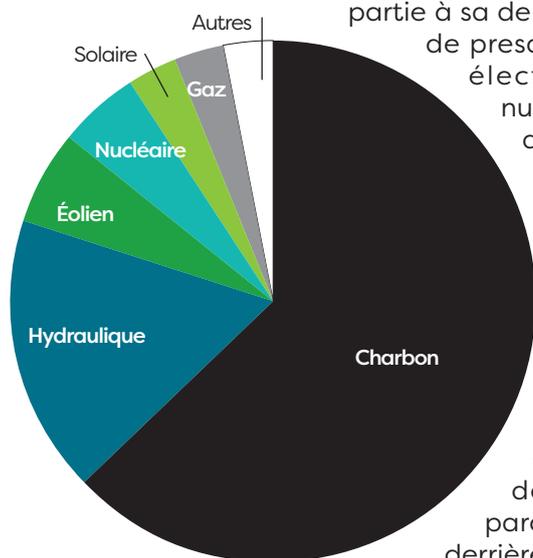
4.1. Les réacteurs 100 % chinois en cours de déploiement

Depuis la mise en service de sa première centrale nucléaire en 1991, la Chine a acquis les compétences pour développer des réacteurs de propriété intellectuelle 100 % chinoise. En première ligne, une dizaine de réacteurs Hualong-One³⁰ sont en construction. La tête de série est entrée en exploitation en octobre 2020. À l'export, deux unités sont en service au Pakistan et le chantier d'une troisième va débiter. Un réacteur est également prévu en Argentine. Les perspectives à l'étranger se sont néanmoins obscurcies depuis l'exclusion de l'industriel China General Nuclear (CGN) de plusieurs projets en Europe, au Royaume-Uni notamment.

Moins célèbre que le Dragon (*Hualong* en chinois), le CAP1400, aussi appelé Guohe-One, est un réacteur un peu plus puissant (1400 MW) dérivé de l'AP1000 de l'Américain Westinghouse. La construction des deux premières unités a débuté en 2019.

4.2. Des acteurs innovants : SMR et réacteurs avancés

Les performances chinoises ne se limitent pas au domaine de la construction. Pékin s'est engagé dans une course



9. Mix électrique 2020

- Charbon : 63 %
- Gaz : 3 %
- Hydraulique : 17 %
- Éolien : 6 %
- Nucléaire : 5 %
- Solaire : 3 %
- Autres : 3 %

Source : AIE

À savoir : La Chine explore de nombreuses technologies. Elle possède notamment des réacteurs à haute température, et construit une paire de réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium ainsi qu'un réacteur à sels fondus.

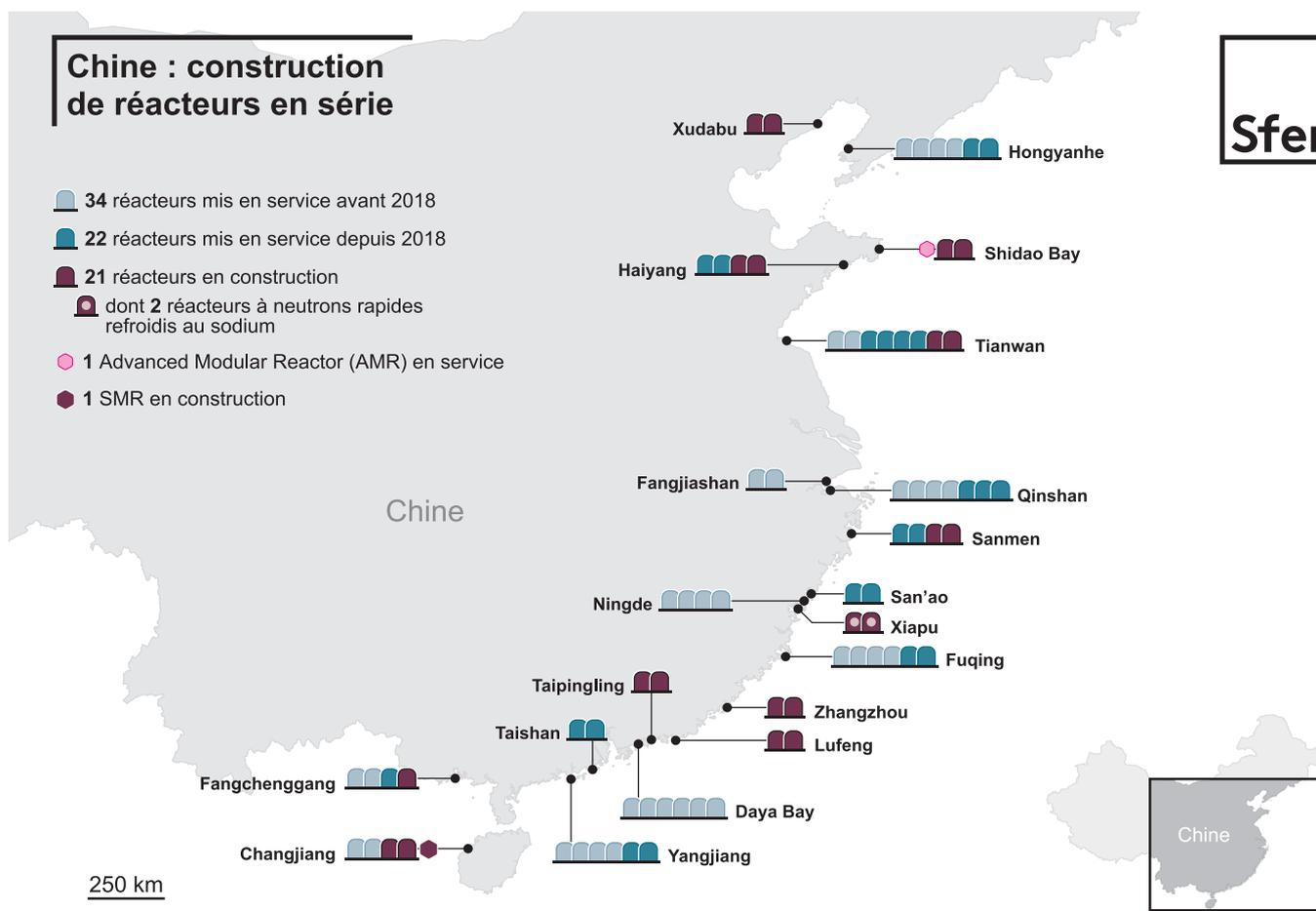
²⁹ AIE.
³⁰ En réalité, il existe deux versions du Hualong-One, l'une est portée par CNNC et l'autre par CGN.

Focus géographiques Chine



Chine : construction de réacteurs en série

- 34 réacteurs mis en service avant 2018
- 22 réacteurs mis en service depuis 2018
- 21 réacteurs en construction
 - dont 2 réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium
- 1 Advanced Modular Reactor (AMR) en service
- 1 SMR en construction



Sources : Sfen, AIEA PRIS – Août 2023

à l'innovation et s'intéresse à plusieurs technologies de réacteur, en particulier les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na) et ceux dits « à haute température » (HTR). Les premiers doivent permettre de valoriser au maximum la matière nucléaire et les seconds sont destinés à de nouveaux usages comme la production d'hydrogène ou de chaleur. Pékin réalise ainsi une véritable montée en puissance dans le domaine des réacteurs à neutrons rapides avec un premier prototype de petite puissance (20 MWe) mis en service en 2011, deux unités de 600 MW en construction depuis 2017 et 2020, et enfin le projet de connecter au

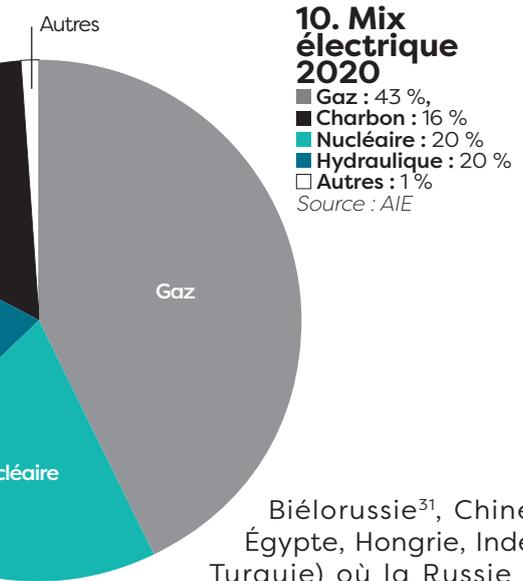
réseau en 2035 un réacteur de 1200 MW. La République populaire se distingue également dans le domaine des HTR avec la mise en service en décembre 2021 du premier HTR-PM d'une puissance de l'ordre de 200 MW. L'Institut du nucléaire et des nouvelles technologies (Inet) de l'université Tsinghua a également lancé la conception d'un réacteur de 600 MW. En juin 2023, la Chine s'est aussi illustrée par l'octroi d'une licence d'exploitation au réacteur expérimental à sels fondus (TMSR-LF1) de 2 MWth. Une technologie qui intéresse de nombreux pays pour sa capacité à accueillir différents combustibles, dont du thorium.

5 La Russie, premier exportateur mondial de réacteurs

La Russie n'est pas seulement un pionnier du nucléaire, c'est également le champion de l'export de réacteurs. Le pays peut en effet s'enorgueillir de 23 réacteurs en construction en dehors de ses frontières, ou qui devraient l'être prochainement. Les pays primo-accédants au nucléaire sont particulièrement séduits par l'offre russe qui comprend, en plus des réacteurs, le financement. Mais ce n'est pas tout : l'activité d'export bénéficie aussi d'un fort soutien de l'État pour la mettre au service de sa politique de relations internationales. Néanmoins, l'invasion de l'Ukraine a changé la donne et, en plus des sanctions, plusieurs pays souhaitent remplacer la Russie que ce soit pour la construction de nouvelles unités ou l'approvisionnement en combustible.

5.1. Vendeur, banquier et bien plus, la Russie séduit les primo-accédants

Le succès de l'offre russe auprès des primo-accédants au nucléaire repose en particulier sur sa capacité à financer les projets. Parmi les sept pays (Bangladesh,



Biélorussie³¹, Chine, Égypte, Hongrie, Inde, Turquie) où la Russie a des chantiers de réacteurs, quatre construisent leur première centrale nucléaire (Bangladesh, Biélorussie, Égypte, Turquie). Deux modèles de financement coexistent : l'octroi d'un prêt étatique conséquent et un second dit « de construction-exploitation » (BOO). Le premier s'illustre au Bangladesh, où la Russie a financé via un prêt étatique 90 % du projet de Rooppur, et en Hongrie, où un prêt interétatique de 10 milliards d'euros pour un projet estimé à 12,5 milliards a été convenu. Le second n'existe qu'en Turquie,

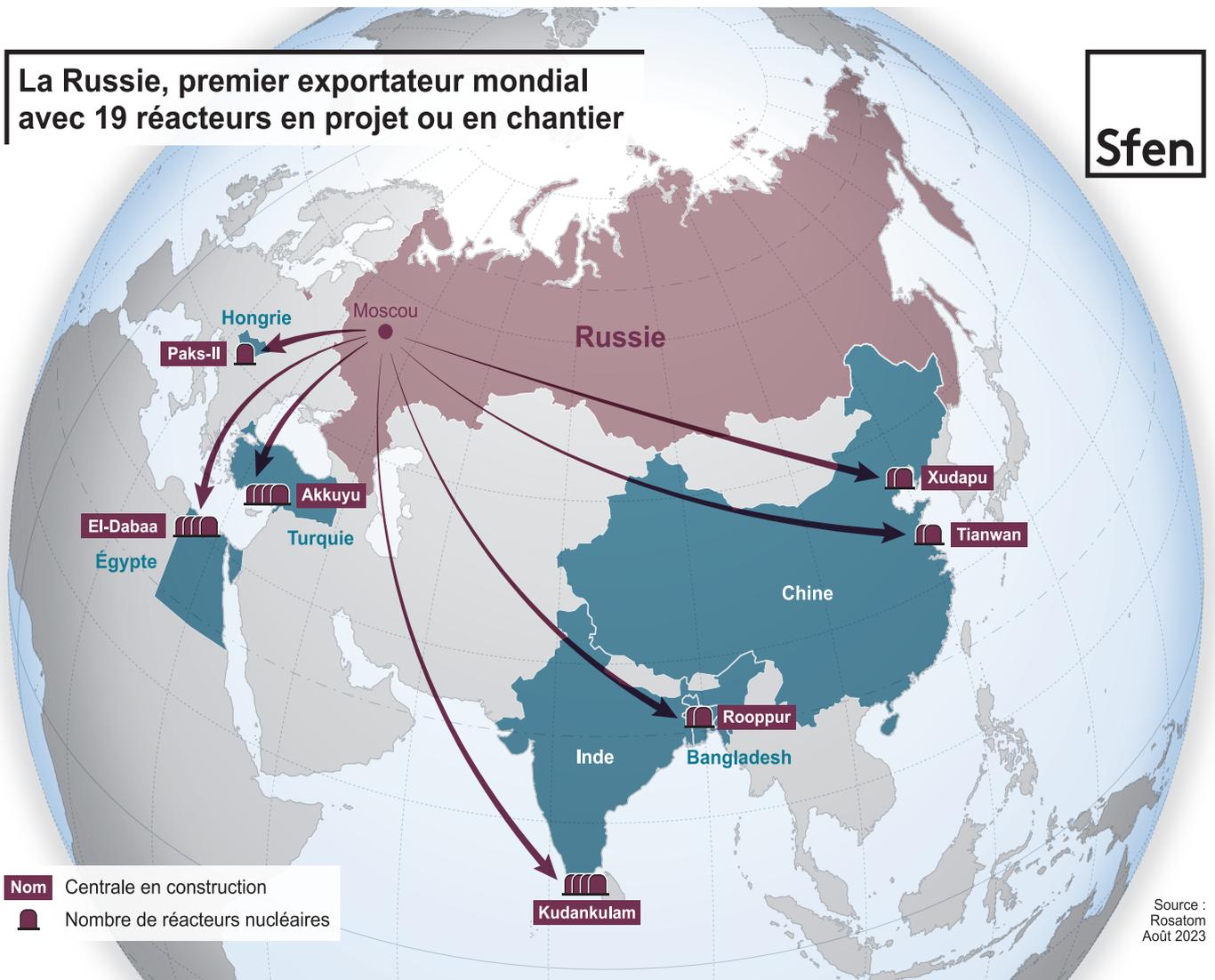
À savoir : La Russie est le seul pays qui dispose d'une barge équipée de deux petits réacteurs nucléaires. En service depuis mai 2020, la centrale fournit de l'électricité à la ville de Pevek. La construction de quatre centrales flottantes de nouvelle génération a été annoncée par Rosatom en décembre 2022.

31. La centrale biélorusse s'est achevée avec la connexion au réseau de l'unité 2 en mai 2023.

Focus géographiques Russie

La Russie, premier exportateur mondial avec 19 réacteurs en projet ou en chantier

Sfen



où le conglomérat Rosatom construit la centrale d'Akkuyu et se rembourse en vendant l'électricité en tant que propriétaire majoritaire. La mise en service de la première unité est prévue fin 2023.

5.2. Un leader fragilisé ?

La filière nucléaire russe est-elle fragilisée par les sanctions internationales depuis l'invasion de l'Ukraine le 24 février 2022 ? Bien qu'il soit difficile aujourd'hui de répondre clairement à cette question, elle semble légitime.

Premièrement, car les opportunités semblent se réduire. Le géant n'a plus de projets en Europe (hormis Paks-2 en Hongrie) et, plus largement, les États-Unis, qui

impulsent un véritable retour en force à l'export, s'opposent autant que possible au Kremlin.

Deuxièmement, deux acteurs, le Français Framatome et l'Américain Westinghouse, contribuent à la diversification du marché et au développement d'une solution alternative européenne souveraine de combustible en réponse notamment aux besoins des opérateurs européens de VVER d'assurer la sécurité et la continuité de leurs opérations tout en leur permettant de réduire leur dépendance vis-à-vis de la Russie. Enfin, bien que l'impact économique des sanctions soit difficile à évaluer, le futur de la capacité de financement russe peut-être questionné.

6 L'Inde, un futur acteur global du nucléaire

Si le parc nucléaire actuel, 23 réacteurs pour une capacité installée de 7,48 GW, ne contribue qu'à 3 % (43 TWh) de la production d'électricité nationale, la stratégie gouvernementale annoncée fin 2022 confirme la nécessaire augmentation de la capacité électronucléaire. L'Inde va devoir répondre à une forte augmentation de la demande en électricité (+150 % d'ici à 2040 par rapport à 2019) tout en visant la neutralité carbone en 2070.

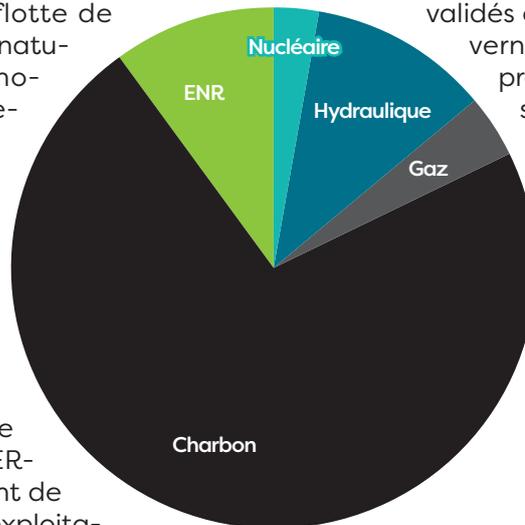
Pour atteindre l'ambitieux objectif de 22,48 GW de capacité nucléaire d'ici à 2032, le gouvernement a lancé la construction d'une flotte de réacteurs à uranium naturel (IPWHR), la technologie nationale développée à partir de modèles canadiens dans les années 1960, d'une puissance de 700 MWe. La première unité de cette série est entrée en exploitation en juin 2023. La construction de quatre réacteurs russes (VVER-1000), en complément de deux unités déjà en exploitation, se poursuit également. L'Inde étudie aussi le déploiement de technologies indiennes ou étrangères, de petite et de forte puissance.

L'Inde dispose par ailleurs de grandes compétences dans de multiples domaines du nucléaire et travaille sur de nombreuses filières technologiques (eau pressurisée, RNR, fusion, haute température...). Ces programmes s'appuient sur de grands centres de recherche et sur une filière

industrielle expérimentée. L'Inde contribue de manière significative à toutes les enceintes et tous les projets internationaux dans le domaine du nucléaire (projet Iter, consortium international pour le RJH...).

6.1. La montée en puissance du parc nucléaire

En termes de nombre de réacteurs en construction, le programme de l'Inde est le deuxième plus important au monde avec dix réacteurs en construction (capacité totale de 8 GW) et dix autres réacteurs (capacité totale de 7 GW) déjà validés et financés par le gouvernement. En plus de ces projets, des négociations sont en cours avec des fournisseurs étrangers pour des réacteurs



11. Mix électrique 2020

■ Charbon : 72 %
■ Gaz : 4 %
■ Hydraulique : 11 %
■ ENR : 10 %
■ Nucléaire : 3 %
Source : AIE

de grande puissance, dont EDF pour la fourniture de six EPR (à Jaitapur), Rosatom pour six VVER-1200 et Westinghouse pour six AP1000.

La centrale de Jaitapur sera la plus puissante du monde, avec une capacité installée de près de 10 GWe. Pour ce projet, EDF propose la technologie EPR, les études d'ingénierie et les équipements. L'électricien nucléaire indien, NPCIL, serait quant à lui responsable de la construction, de la mise en service et de l'obtention de l'ensemble des autorisations et certifications requises.

Afin d'accélérer le rythme de développement de l'atome, l'Inde cherche à attirer de nouveaux acteurs publics, voire privés, pour participer ou financer les futurs projets. Dans ce cadre, le plus grand électricien indien (NTPC) et l'électricien nucléaire (NPCIL) ont monté une coentreprise pour des projets de nouveaux réacteurs PHWR.

Mais l'Inde est aussi attentive au potentiel des SMR et des réacteurs avancés (AMR) en évoquant une capacité installée pouvant atteindre quelques dizaines de gigawatts avant 2040. Parmi les applications envisagées, on notera le remplacement des centrales thermiques actuellement en exploitation ou encore la production d'hydrogène décarboné. Dans le cadre du G20, actuellement sous présidence indienne, un séminaire international a ainsi été organisé sur les conditions du déploiement à grande échelle des SMR ainsi que des discussions sur les modalités de coopération.

L'Inde souhaite valoriser sa filière industrielle, forte d'une solide expérience nationale, et se positionner pour la fourniture d'équipements pour des projets menés dans d'autres pays.

6.2. L'Inde s'apprête à inaugurer un réacteur à neutrons rapides

Dans le cadre de sa politique à long terme de fermeture du cycle du combustible, l'Inde poursuit le développement des réacteurs à neutrons rapides. Outre le petit réacteur de recherche basé sur le modèle du réacteur français Rapsodie, le pays construit un démonstrateur industriel refroidi au sodium de 500 MW depuis 2004 et dont la mise en service, maintes fois repoussée, est aujourd'hui prévue pour 2024. Sur la base de ce démonstrateur, l'Inde prévoit la construction d'une flotte de six réacteurs électrogènes.

À savoir : La France et l'Inde ont annoncé en juillet 2023 la mise en place d'un partenariat sur le sujet des petits réacteurs modulaires (SMR) et des réacteurs avancés (AMR).

Focus géographiques Japon

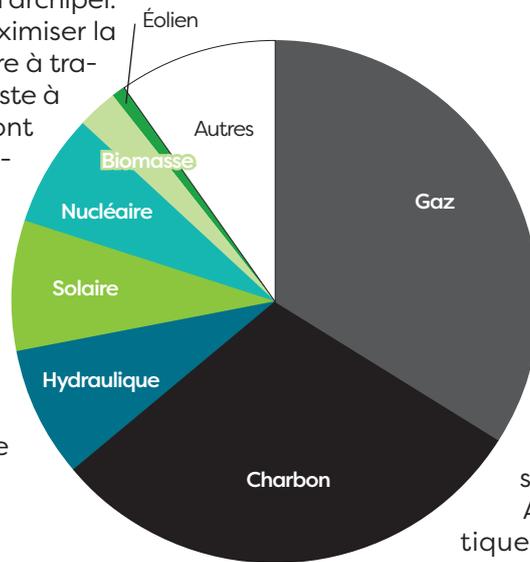
7 Japon : la relance nucléaire se confirme

Plus de dix ans après l'accident nucléaire à la centrale de Fukushima Daiichi, en mars 2011, le soutien du gouvernement à l'atome se réaffirme sur l'archipel.

Le pouvoir souhaite en effet maximiser la production électrique du nucléaire à travers deux volets. Le premier consiste à redémarrer le parc nucléaire, dont une partie importante est toujours à l'arrêt, et à l'exploiter à long terme. Le second, qui reste à préciser, concerne le renouvellement partiel du parc avec de nouveaux réacteurs. L'objectif affiché dans le plan pluriannuel de l'énergie (2021-2024) est d'atteindre 20 % à 22 % de nucléaire dans le mix électrique en 2030, contre 7 % aujourd'hui.

7.1. Un redémarrage au compte-gouttes

À la suite de l'accident du 11 mars 2011, tous les réacteurs ont été mis à l'arrêt et 24 réacteurs sont aujourd'hui définitivement fermés. D'autres redémarrent sous l'œil de la nouvelle autorité de sûreté, la NRA, mise en place en 2012. Pour les exploitants, le défi consiste à répondre aux attentes de la nouvelle autorité, mais aussi à convaincre la population et les élus



12. Mix électrique 2021

■ Gaz	: 34 %
■ Charbon	: 30 %
■ Hydraulique	: 8 %
■ Solaire	: 8 %
■ Nucléaire	: 7 %
■ Biomasse	: 2,5 %
■ Éolien	: 1 %
□ Autres	: 9,5 %

Source : AIE

locaux. En septembre 2023, sur les 33 réacteurs opérables, seulement 11 ont redémarré, 6 sont en attente de redémarrer après avoir obtenu le feu vert de l'autorité de sûreté et 8 dossiers sont en cours d'instruction.

Afin de poursuivre cette politique de redémarrage et alors que le fonctionnement des réacteurs était plafonné à 60 ans, depuis mai 2023, ces derniers peuvent être exploités pendant 60 années non calendaires. C'est-à-dire que la décennie d'arrêt après l'accident de Fukushima ne sera pas décomptée de la durée d'exploitation.

7.2. La question du renouvellement du parc s'impose

Concernant le renouvellement du parc nucléaire, en août 2022, le Premier ministre japonais a mentionné pour la première fois l'idée de construire de nouveaux réacteurs sur fond de crise énergétique. Dans le même temps, l'industriel Mitsubishi Heavy Industries a présenté un réacteur de nouvelle génération de 1200 MW (SRZ-1200). De plus, il faut noter que les industriels japonais sont impliqués dans plusieurs projets de petit réacteur modulaire (SMR) en partenariat avec les États-Unis, que ce soit le petit réacteur à eau bouillante de GE-Hitachi (BWRX-300) ou le réacteur à eau pressurisée de NuScale.

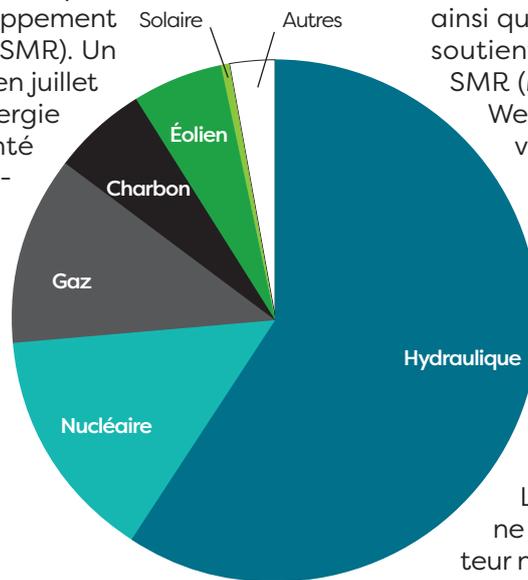
À savoir : En août 2022, le Premier ministre japonais a mentionné pour la première fois depuis l'accident de Fukushima l'idée de construire de nouveaux réacteurs.

8 | Le renouveau du nucléaire canadien

La politique nucléaire canadienne repose majoritairement sur deux axes : le prolongement de son parc historique via la réalisation d'importants travaux et le développement de petits réacteurs modulaires (SMR). Un troisième axe est venu s'ajouter en juillet 2023 lorsque le ministre de l'Énergie de l'Ontario a annoncé la volonté de construire de nouveaux réacteurs de puissance pour 4,8 GW supplémentaires. Il s'agit pour la province de l'Ontario, qui concentre 18 des 19 réacteurs canadiens, de répondre à la demande d'électricité « en croissance pour la première fois depuis 2005 », ont fait savoir les autorités.

8.1. Exploiter le parc nucléaire jusqu'à 60 ans

Le premier axe consiste à maintenir en exploitation les 19 réacteurs canadiens à uranium naturel (Candu) qui fournissent environ 15 % de l'électricité du pays via une remise à neuf lancée en 2016. Ces opérations interviennent aux alentours du trentième anniversaire des unités et vont permettre de les exploiter pendant 30 années supplémentaires.



13. Mix électrique 2021

■ Hydraulique : 59,2 %
 ■ Nucléaire : 14,4 %
 ■ Gaz : 11,8 %
 ■ Charbon : 5,7 %
 ■ Éolien : 5,5 %
 ■ Solaire : 0,8 %
 □ Autres : 2,5 %
 Source : AIE

8.2. La petite puissance à l'honneur

Le deuxième axe met à l'honneur les petits réacteurs modulaires (SMR) dans le cadre du Plan d'action canadien des petits réacteurs modulaires publié en 2018. Pour leur développement, le gouvernement renforce son ministère en charge de l'Énergie ainsi que l'Autorité de sûreté nucléaire et soutient les industriels développant des SMR (Moltex Energy, Terrestrial Energy, Westinghouse Canada). Enfin, le gouvernement a décidé fin 2022 d'inclure les SMR parmi les technologies d'énergie propre éligibles à un nouveau crédit d'impôt à l'investissement égal à 30 % du coût en capital. La province de l'Ontario a d'ores et déjà sélectionné un site pour la construction de quatre SMR de 300 MW (GE-Hitachi). La tête de série pourrait démarrer dès 2028. La province de la Saskatchewan, ne disposant pas jusqu'alors de réacteur nucléaire, est également intéressée par les SMR : le gouvernement fédéral a approuvé en août 2023 un financement de 74 millions de dollars canadiens (environ 55 millions de dollars US) pour des études préliminaires à ce sujet.

À savoir : Le ministre de l'Énergie de l'Ontario a annoncé, d'une part, vouloir construire quatre SMR BWRX-300, soit trois de plus que ce qui était prévu, et d'autre part, que l'exploitant Bruce Power allait étudier l'impact environnemental d'un projet pouvant aller jusqu'à ajouter 4,8 GW à la centrale du même nom.

9

La Corée du Sud révisé sa politique nucléaire avec des ambitions à l'export

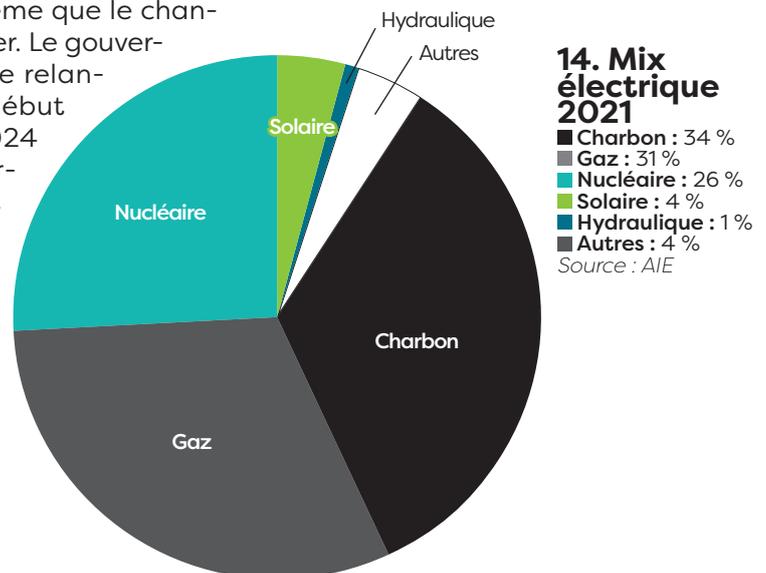
La Corée du Sud a la volonté de relancer le nucléaire. En effet, le nouveau gouvernement, issu de l'élection du 9 mars 2022, abandonne l'objectif de sortie du nucléaire souhaité par le précédent mandat et vise une part minimum du nucléaire de 30 % dans le mix électrique de 2030. Le pays veut également faire un véritable retour à l'export avec son réacteur Gen III+ de 1400 MW, l'APR1400, mais aussi dans le domaine de la petite puissance.

9.1. La reprise des chantiers nationaux

En 2017, le président Moon Jae-In décidait la réduction puis la sortie du nucléaire à long terme de la République de Corée. Plus précisément, il s'agissait de démanteler tous les réacteurs après quarante années d'exploitation. Dans cette perspective, la réduction à zéro de la part du nucléaire dans le mix électrique coréen était attendue dans les années 2060. Le projet de construction de deux réacteurs à Shin-Hanul avait, quant à lui, été suspendu avant même que le chantier ne puisse commencer. Le gouvernement actuel souhaite relancer ce projet pour un début de construction dès 2024 et ainsi mettre en service l'unité 2 en 2032 et l'unité 3 en 2033. Les deux unités sont des réacteurs coréens de 1400 MW (APR1400).

9.2 Des objectifs à l'export ambitieux

Du côté de l'export, le ministère du Commerce, de l'Industrie et de l'Énergie (Motie) a exprimé l'ambition « d'exporter dix centrales nucléaires d'ici à 2030 » et de développer un petit réacteur modulaire innovant (SMR). Pour séduire, la Corée du Sud dispose d'un atout : la centrale nucléaire de Barakah. En 2009, les Émirats arabes unis sélectionnaient la technologie coréenne, l'APR1400, pour leur première centrale nucléaire. Depuis le premier béton coulé en 2012, trois des quatre unités ont été connectées au réseau entre 2020 et 2022 et le quatrième attend le chargement de son combustible. Un succès à l'export qui n'a néanmoins pas été réitéré depuis. La Corée du Sud est aujourd'hui en discussion avec plusieurs pays, notamment la Pologne, la République tchèque et les Pays-Bas.



10 Ailleurs dans le monde

10.1. Une première centrale nucléaire en construction

Aux **Émirats arabes unis**, les trois premiers réacteurs du pays ont démarré en 2020, 2021 et 2022. La quatrième unité, qui a terminé ses essais à chaud en juillet 2022, devrait diverger prochainement. Pour leur première centrale nucléaire, les Émirats arabes unis ont choisi les réacteurs coréens APR1400 (1400 MW). Les quatre unités fourniront l'équivalent de 25 % des besoins en électricité des 9,3 millions d'habitants des sept émirats de l'État. Le pays s'intéresse également aux petits réacteurs modulaires (SMR) pour des opérations de désalinisation ou la production d'hydrogène. Les unités 5 et 6 de Barakah font l'objet de discussions avec l'industrie coréenne.

La **Turquie** a commandé quatre unités de 1200 MW à la Russie. Le premier béton de la première unité a été coulé en 2018 et le pouvoir turc souhaite mettre en service l'unité 1 avant le 100^e anniversaire de la République turque, le 29 octobre 2023.

L'**Égypte** construit une centrale nucléaire, financée à 85 % par un prêt étatique russe, à El-Dabaa. Elle doit accueillir quatre réacteurs VVER-1200, dont deux sont entrés en construction en 2022 et un troisième en mai 2023. L'installation a deux finalités : la production d'électricité et la désalinisation de l'eau de mer.

Depuis 2017, la Russie construit également les deux premiers réacteurs du **Bangladesh** et une centrale de deux unités en **Biélorussie**, dont la première est entrée en service commercial en 2021 et la deuxième a été connectée au réseau en mai 2023.

10.2. Vers le nucléaire

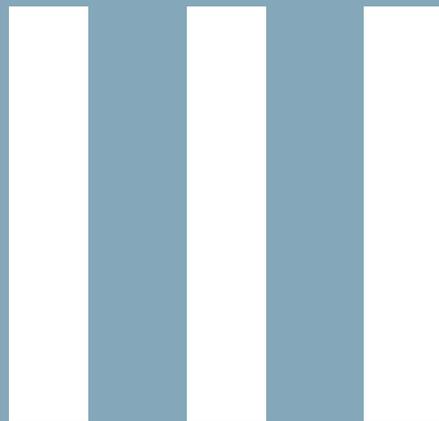
En 2020, le gouvernement des **Philippines** a chargé le Nuclear Energy Program Inter-Agency Committee (NEP-IAC) d'étudier le lancement d'un programme nucléaire. Le pays n'a pas de centrale nucléaire hormis celle de Bataan qui n'a jamais été mise en service, bien qu'achevée en 1984. L'archipel envisage de construire des petits réacteurs modulaires (SMR) en lien avec différents partenaires (Russie, Corée du Sud, États-Unis).

L'**Ouzbékistan** a signé un accord avec la Russie pour deux unités de 1200 MW.

L'**Arabie saoudite** vise la construction d'une première centrale nucléaire avec deux unités d'une puissance située entre 1000 et 1600 MW. Le fournisseur de la centrale pourrait être sélectionné en 2024 pour la mise en service d'une première tranche en 2036. Le pays s'intéresse également aux SMR pour la production d'hydrogène.

Le **Kazakhstan** est à la recherche d'un partenaire pour développer sa première centrale nucléaire – si l'on exclut le petit réacteur à neutrons rapides (BN-350) hérité de l'URSS et opéré jusqu'en 1999. Sur la table des négociations se trouvent des industriels chinois, coréens, français et russes.

Data



Data

Les réacteurs nucléaires dans le monde en 2023 (Source : AIEA – PRIS, septembre 2023)

Réacteurs en opération	411
Réacteurs en opération suspendue	26
Réacteurs en construction	58

Le nucléaire dans le monde en 2023 (Source : AIEA – PRIS, septembre 2023)

Pays	Capacité nucléaire (GW)	En construction (GW)	Nombre de réacteurs en opération
États-Unis	96	1	93
France	61	1,6	56
Chine	53	21,6	55
Russie	27,7	2,7	37
République de Corée	24,5	4	25
Canada	13,6	0	19
Ukraine	13	2*	15
Japon	9,5	2,6*	11
Espagne	7	0	7
Suède	7	0	6
Inde	6	6	19
Royaume-Uni	6	3,26	9
Finlande	4,4	0	5
Émirats arabes unis	4	1,3	3
Tchéquie	4	0	6
Belgique	4	0	5
Pakistan	3,2	0	6
Suisse	3	0	4
Slovaquie	2,3	0	5
Biélorussie	2,2	0	2
Bulgarie	2	0	2
Hongrie	2	0	4
Brésil	2	1,3	2
Afrique du Sud	2	0	2
Taiwan	1,9	0	2
Argentine	1,6	0	3
Mexique	1,5	0	2
Roumanie	1,3	0	2
Iran	1	1	1
Slovénie	0,7	0	1
Pays-Bas	0,4	0	1
Arménie	0,4	0	1
Turquie	0	4,5	0
Égypte	0	3,3	0
Bangladesh	0	2	0

* Chantier interrompu avec date de reprise inconnue.

Data

L'évolution du parc nucléaire mondial (2005-2022) (Source : AIEA - PRIS)

Année	Capacité nucléaire (GW)	Nombre de réacteurs en exploitation
2005	368	442
2010	372	438
2015	364	423
2020	375	422
2022	374	416

Durée de construction des réacteurs de troisième génération

Réacteurs coréens (APR1400)

Réacteur	Début de la construction	Connexion au réseau	Durée de construction (mois)
Saeul-1	2008	2016	85
Saeul-2	2009	2019	116
Barakah-1	2012	2020	97
Shin-Hanul 1	2012	2022	125
Barakah-2	2013	2021	101
Barakah-3	2014	2022	97

Réacteurs chinois (HPR1000)

Réacteur	Début de la construction	Connexion au réseau	Durée de construction (mois)
Fangchenggang-3	2015	2023	98
Fuqing-6	2015	2022	86
Hongyanhe-5	2015	2021	75
Fuqing-5	2015	2020	66
Hongyanhe-6	2015	2022	94
Karachi-2	2015	2021	67
Karachi-3	2016	2022	70

Réacteurs russes (VVER-1200)

Réacteur	Début de la construction	Connexion au réseau	Durée de construction (mois)
Novovoronezh 2-1	2008	2016	98
Leningrad 2-1	2008	2018	113
Novovoronezh 2-2	2009	2019	118
Leningrad 2-2	2010	2020	126
Astravets-1	2013	2020	84
Astravets-2	2014	2023	109

Data

Réacteurs français (EPR)

Réacteur	Début de la construction	Connexion au réseau	Durée de construction (mois)
Taishan-1	2009	2018	103
Taishan-2	2010	2019	108
Olkiluoto-3	2005	2022	199

Réacteurs américains (AP1000)

Réacteur	Début de la construction	Connexion au réseau	Durée de construction (mois)
Sanmen-1	2009	2018	110
Sanmen-2	2009	2018	106
Haiyang-1	2009	2018	107
Haiyang-2	2010	2018	112
Vogtle-3	2013	2023	120

Lexique

AIE : Agence internationale de l'énergie.

AIEA : Agence internationale de l'énergie atomique.

AMR : Advance Modular Reactor – Réacteur modulaire de technologie avancée.

AP1000 : réacteur américain de troisième génération (1100 MW).

APR1400 : réacteur coréen de troisième génération (1400 MW).

ASN : Autorité de sûreté nucléaire

Durée de construction : le chantier d'un réacteur démarre au premier béton coulé et se termine lors de la connexion au réseau.

EPR : réacteur français de troisième génération (1650 MW).

EPR2 : version optimisée de l'EPR (1650 MW).

Gen III+ : désigne la troisième génération de réacteurs.

Haleu : High-Assay Low-Enriched Uranium.

HTR : réacteur à haute température.

Hualong-One : réacteur chinois de troisième génération (1000 MW).

MW : mégawatt.

MWe : mégawatt électrique.

MWth : mégawatt thermique.

Na : sodium.

RNR : réacteur à neutrons rapides.

SMR : Small Modular Reactor – Petit réacteur modulaire à eau légère.

VVER-1200 : réacteur russe de troisième génération (1200 MW).

WNA : World Nuclear Association.



[sfen.org](https://www.sfen.org)

Contact presse :
ludovic.dupin@sfen.org
06.47.43.93.48