

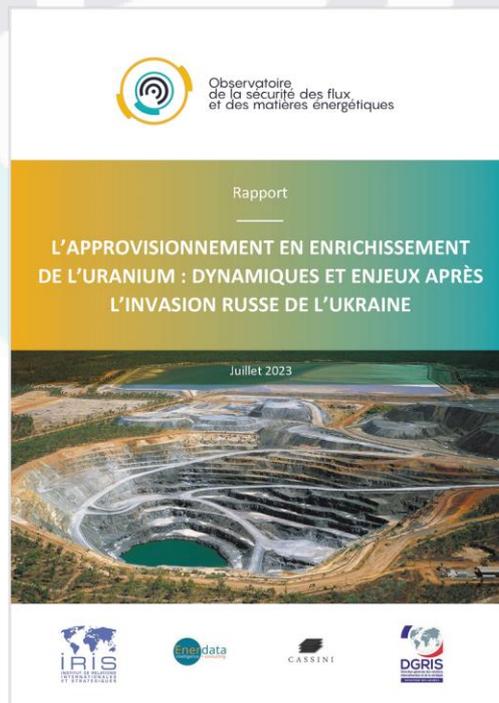


Observatoire
de la sécurité des flux
et des matières énergétiques

SYNTHÈSE

L'APPROVISIONNEMENT EN ENRICHISSEMENT DE L'URANIUM : DYNAMIQUES ET ENJEUX APRÈS L'INVASION RUSSE DE L'UKRAINE

Juillet 2023





Observatoire
de la sécurité des flux
et des matières énergétiques

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

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

www.iris-france.org

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

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

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

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

À PROPOS DE L'AUTEUR DU RAPPORT



Teva Meyer / Chercheur associé, IRIS

Teva Meyer est chercheur associé à l'IRIS et maître de conférences en géopolitique et géographie à l'Université de Haute-Alsace (Mulhouse) où il dirige la licence d'Histoire-géographie. Spécialiste de l'énergie nucléaire, ses recherches portent sur les conflictualités de l'approvisionnement en combustible et matières premières du secteur, sur les enjeux stratégiques du marché des réacteurs ainsi que sur la gestion du démantèlement et de la reconversion des sites nucléaires.

RESPONSABLE SCIENTIFIQUE ET COORDINATEUR



Emmanuel Hache / Directeur de recherche, IRIS

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



Sami Ramdani / Chercheur, IRIS

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

CARTOGRAPHES



David Amsellem / Directeur, Cassini

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



Romain Vinadia / Analyste, Cassini

Docteur de l'Institut français de Géopolitique (Paris 8), analyste au sein du cabinet CASSINI et pilote de la production cartographique de cet observatoire.

L'invasion de l'Ukraine par la Russie en février 2022 a relancé les débats en Europe comme aux États-Unis sur la dépendance des industries nucléaires aux approvisionnements russes de combustibles. Ces discussions se sont amplifiées avec l'incapacité, à Washington comme à Bruxelles, d'imposer des sanctions sur les entreprises russes de ce secteur jusqu'à présent. Simultanément, l'amplification des événements climatiques extrêmes et la hausse des prix de l'énergie ont ravivé les politiques de construction de centrales nucléaires. Alors que l'industrie russe, centralisée au sein du groupe Rosatom, tient le *leadership* dans les exportations de technologies et de services nucléaires, des inquiétudes s'élèvent quant à la capacité de Moscou à utiliser cette position et ce contexte à des fins géopolitiques.

Ce rapport se concentre sur une des étapes de fabrication des combustibles, l'enrichissement de l'uranium. D'abord, car l'enrichissement reste un passage obligatoire pour l'approvisionnement des parcs nucléaires mondiaux, et le restera jusqu'à la fin du siècle, au regard des centrales en fonction et en construction. Ensuite, car les dynamiques géopolitiques de l'enrichissement président à celles des étapes préalables (l'extraction de l'uranium naturel et sa conversion) et suivantes (assemblage du combustible). Il se structure autour de quelques questions principales :

- Quels sont les acteurs qui structurent ce marché ?
- Comment en est-on arrivé à la situation actuelle marquée par la domination de la Russie ?
- La Russie peut-elle profiter géopolitiquement de la place qu'elle a prise dans ce secteur ?
- Comment les Européens et les Américains tentent-ils de mitiger ce risque depuis le début de la guerre en Ukraine et pourquoi n'y arrivent-ils que partiellement pour le moment ?
- En dehors de la Russie, quelles sont les autres dynamiques géopolitiques qui cadrent l'approvisionnement en uranium enrichi ?
- Comment anticiper les évolutions entraînées par le développement de nouvelles technologies de réacteurs nucléaires ?

Fondamentaux de l'enrichissement

L'ensemble des 410 réacteurs nucléaires commerciaux en exploitation dans le monde en mai 2023 utilisent de l'uranium. La différence principale entre ces réacteurs tient dans le taux d' ^{235}U nécessaire pour entraîner une réaction de fission nucléaire.

Figure 1 : Besoin en enrichissement en fonction du type de réacteur, pour les centrales actuellement en fonction

Réacteur à eau pressurisée (PWR)	<ul style="list-style-type: none"> • Uranium enrichi entre 3% et 5% • 301 réacteurs en fonction
Réacteur à eau bouillante (BWR)	<ul style="list-style-type: none"> • Uranium enrichi entre 3% et 5% • 41 réacteurs en fonction
Réacteur avancé refroidi au gaz (AGR)	<ul style="list-style-type: none"> • Uranium enrichi entre 2,5% et 3,5% • 8 réacteurs en fonction
Réacteur modéré au graphite refroidi à l'eau (LWGR)	<ul style="list-style-type: none"> • Uranium enrichi entre 2% et 3% • 11 réacteurs en fonction
Réacteur à eau lourde (PHWR)	<ul style="list-style-type: none"> • Uranium naturel ou très faiblement enrichi • 46 réacteurs en fonction
Réacteur à haute température refroidi au gaz (HTGR)	<ul style="list-style-type: none"> • Uranium enrichi à 8,5% • 1 réacteur en fonction
Réacteur à neutrons rapides (RNR)	<ul style="list-style-type: none"> • Uranium enrichi entre 17% et 26% • 2 réacteurs en fonction

Le taux d'enrichissement de l'uranium peut être divisé en quatre catégories : l'uranium très faiblement enrichi (SEU) entre 0,9% et 3%, l'uranium faiblement enrichi (LEU) entre 3% et 5%, le High-Assay Low enriched Uranium (HALEU) entre 5% et 20% et l'uranium hautement enrichi (HEU) à plus de 20%. **Le seuil de 5% s'est imposé dans la standardisation de la fabrication de combustible** pour les réacteurs à eau pressurisée, qui représente la majorité des réacteurs en service, bien « qu'il n'existe aucune justification technique pour cette limite »¹. Pour le combustible à usage militaire, l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) place la limite de 20% d'enrichissement.

L'enrichissement consiste à augmenter la part d'²³⁵U présent dans de l'uranium naturel, environ 0,7%, préalablement converti en UF₆, soit par centrifugation, soit par diffusion gazeuse. Dans le cas de la centrifugation, un flux d'UF₆ passe par plusieurs centrifugeuses qui vont diviser l'UF₆ en deux flux : le premier enrichi en ²³⁵U, le second composé de matériaux appauvris appelé *tails*. L'effort nécessaire pour séparer ces flux est quantifié en Unité de travail de séparation (UTS).

Figure 2 : Schéma simplifié de la chaîne d'approvisionnement en combustibles nucléaires



¹ IAEA, *Light Water Reactor Fuel Enrichment beyond the Five Per Cent Limit: Perspectives and Challenges*, 2020, https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TE-1918_web.pdf (consulté le 30 juin 2023).

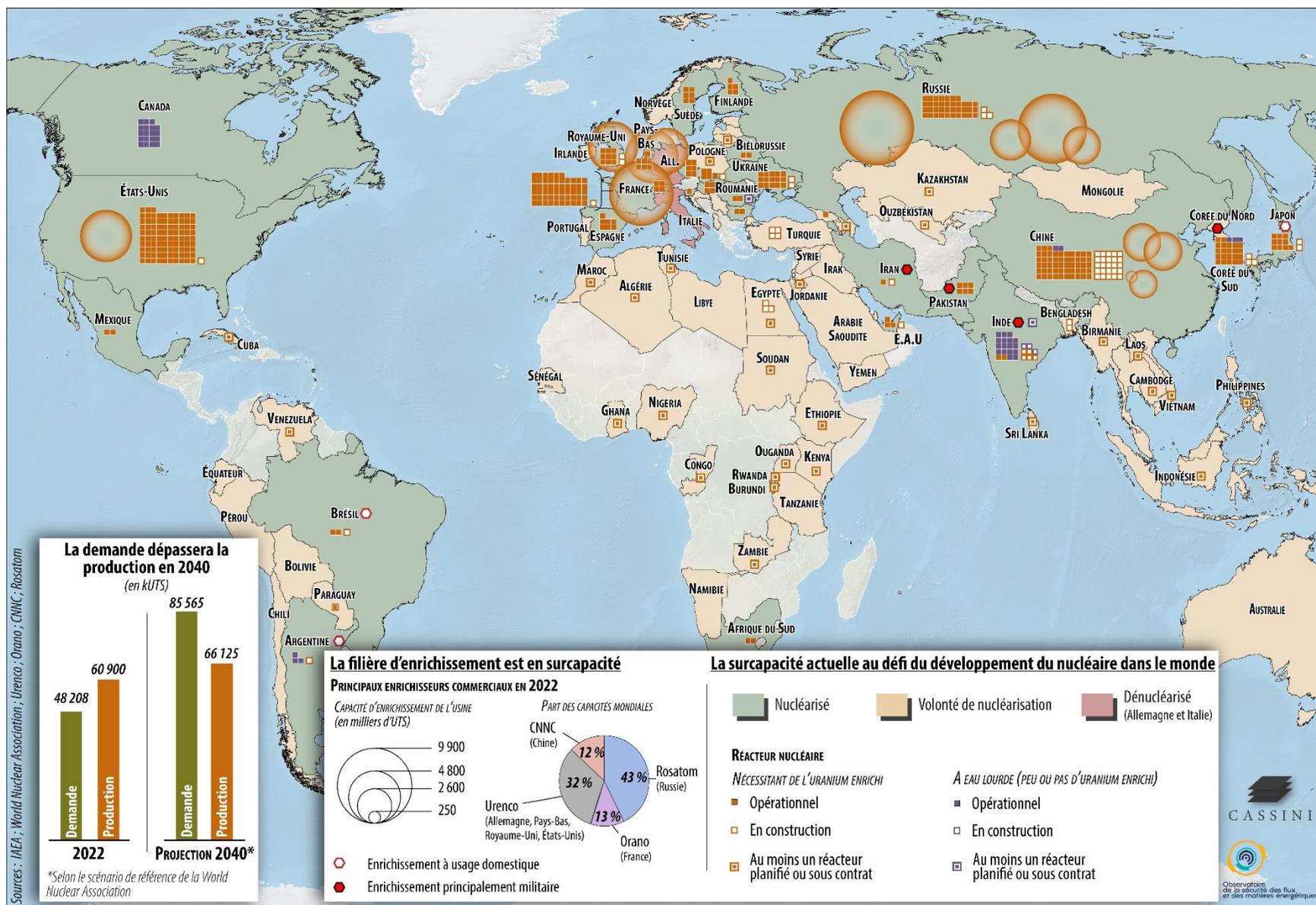
Deux stratégies permettent aux raffineurs d'uranium d'atteindre les taux de concentration attendus de manière optimale, en fonction de la disponibilité en UF₆ et en UTS.

- **L'*underfeeding*** : Pour une unité donnée d'uranium enrichi, l'opérateur réduit le volume d'UF₆ naturel en entrée, mais augmente le nombre d'UTS. Réduisant au passage la concentration ²³⁵U dans les *tails*.
- **L'*overfeeding*** : Pour une même unité d'uranium enrichi, l'opérateur augmente le volume d'UF₆ naturel en entrée et réduit le nombre d'UTS, mais au prix d'une concentration d'²³⁵U plus importante dans les *tails*.

Comment en est-on arrivé à la domination de la Russie sur la filière ?

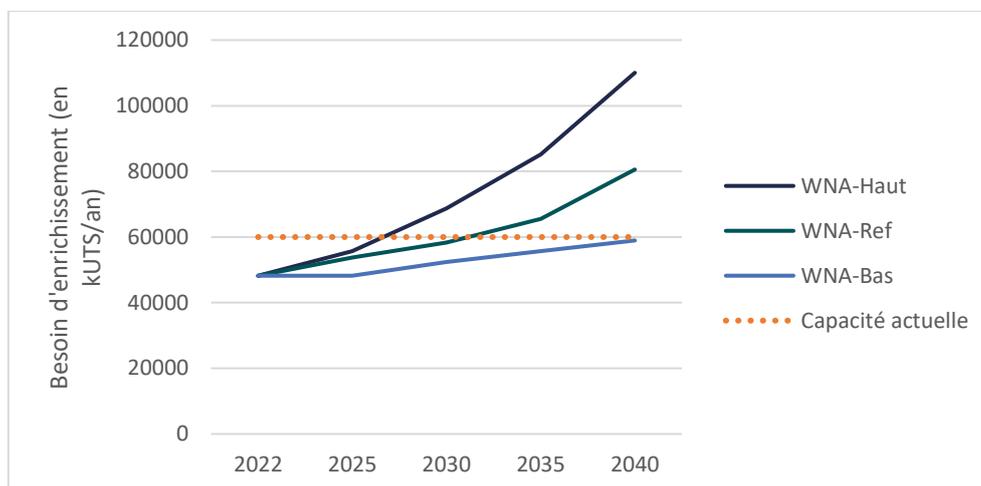
À l'échelle mondiale en 2022, **la filière d'enrichissement était en surcapacité et excédait de 20% la demande cette année**. Mais cette situation pourrait ne pas durer.

Carte 1 – L’enrichissement de l’uranium, une filière en surcapacité, mais pour combien de temps ?



Selon la majorité des scénarii **les capacités actuelles d'enrichissement ne seront pas suffisantes pour couvrir la demande d'ici 2040 au plus tard**, la faute à une croissance de la demande principalement portée par l'Asie, à commencer par la Chine.

Figure 3 : Augmentation des besoins en UTS d'ici à 2040 en fonction des principaux scénarii d'évolution du nucléaire



Sources : Orano ; World Nuclear Association

Dans la décennie 2010, **la part des capacités d'enrichissements des États-Unis est passée de 20% à seulement 7,5%**. La faute à une campagne de privatisation lancée dans les années 70 et à une progressive perte de compétitivité, accélérée par les programmes de démantèlement des armes nucléaires russes dont les têtes ont été utilisés pour produire de l'uranium enrichi à vocation civile, **le programme Megatons to Megawatts²**, qui a inondé le marché américain d'uranium enrichi à bas prix. **En Europe, le principal acteur, Urenco, a également vu ses capacités diminuées** en raison d'une gouvernance complexe et divisée sur l'avenir de la filière. **Seul le français Orano se lance actuellement dans une augmentation importante de ses capacités**, tandis qu'Urenco envisage de développer marginalement son usine d'Eunice (États-Unis).

Dans la même décennie, **Moscou se lançait avec Rosatom dans une politique commerciale volontariste, s'appuyant sur une offre intégrant toutes les activités de la filière**, profitant des prix parmi les plus bas du marché et de l'appui des services diplomatiques du Kremlin pour contourner les barrières réglementaires. Cet effort est couronné de succès, **la Russie détenant 40 % du marché de l'enrichissement en 2023 et fournissait 31% des besoins en**

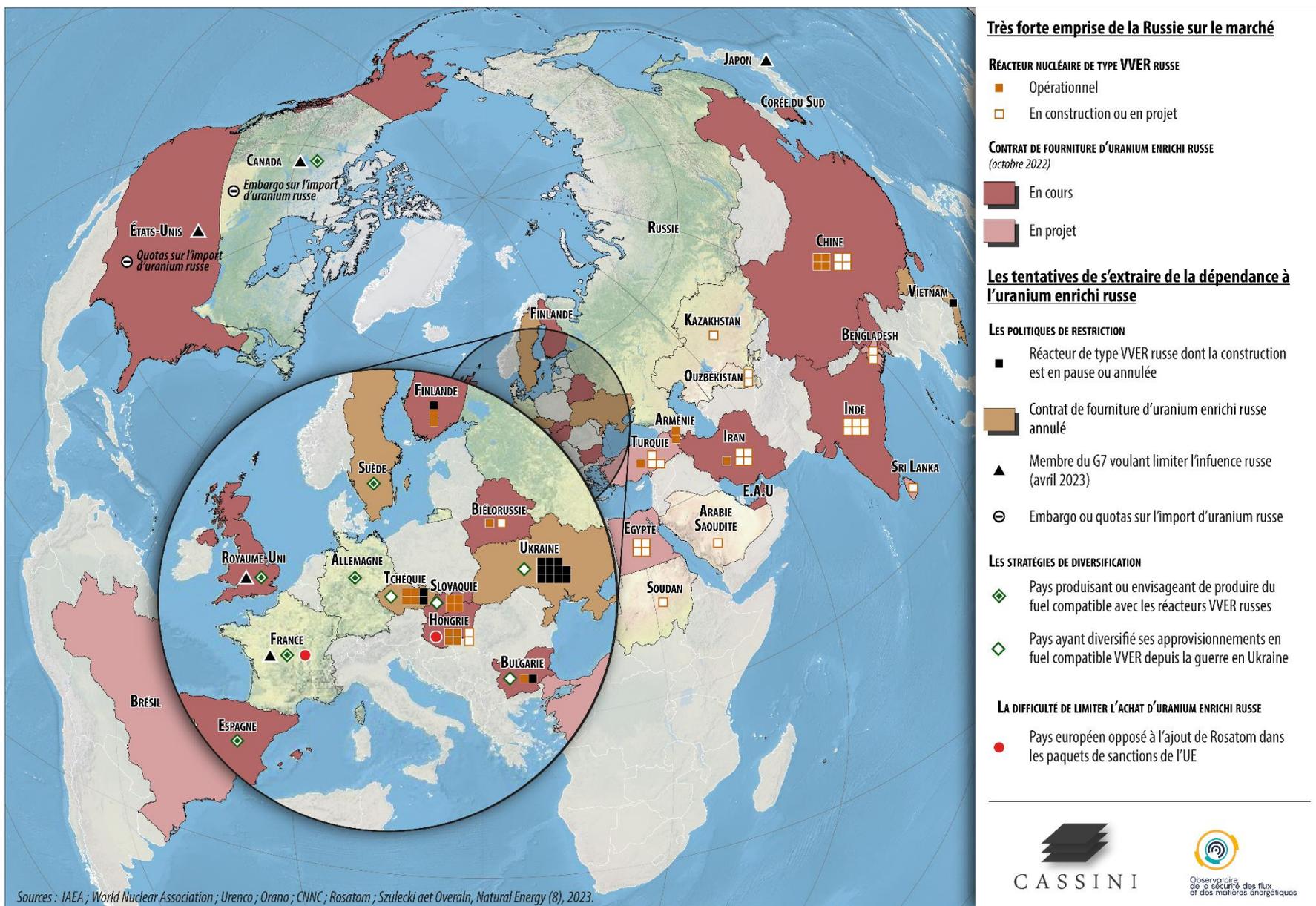
² Alexander Pavlov and Vladimir Rybachenkov, "Looking Back: The U.S.-Russian Uranium Deal: Results and Lessons," *Arms Control Association*, s. d. <https://www.armscontrol.org/act/2013-12/looking-back-us-russian-uranium-deal-results-lessons> (consulté le 30 juin 2023).

enrichissement des pays d'Union européenne et 27% de la demande aux États-Unis en 2021.

Une domination qui s'explique par un appareil de production pléthorique, hérité de l'Union soviétique, et par les retombées du programme Megatons to Megawatts, qui ont permis le maintien de ses capacités après la chute de l'URSS.

La Russie a aujourd'hui la capacité de répondre à 50% de la demande mondiale de combustible, avec la possibilité de créer une dépendance de long terme sur des pays souhaitant s'équiper de capacité nucléaire de conception russe.

Carte 3 – L'impossible indépendance de la filière d'enrichissement d'uranium vis-à-vis de la Russie ?



Quels changements la guerre en Ukraine cause-t-elle ?

La guerre en Ukraine a entraîné une forte médiatisation de la place prise par la Russie sur le marché de l'enrichissement, avec **la crainte de voir Moscou détourner sa position dominante à des fins coercitives**. Si ce risque ne peut pas être écarté, **il est cependant à modérer**³.

Premièrement, malgré le contrôle direct du Kremlin, les entreprises de **la filière russe se financent essentiellement à partir de ses contrats à l'étranger**, limitant l'emprise financière du pouvoir russe⁴. Deuxièmement, **la Russie n'a qu'une influence marginale sur les flux de matière en provenance d'Europe, d'Amérique du Nord ou d'Asie**⁵. Troisièmement, l'importante densité énergétique de l'uranium enrichi **permet aux exploitants de constituer des stocks stratégiques**⁶. Quatrièmement **la part de l'enrichissement dans le coût de production du kWh nucléaire reste faible**. Cinquièmement, l'exportation de combustible est un outil de **soft power** pour le Kremlin, et une rupture de fourniture mettrait fortement à mal l'image de Rosatom⁷. Malgré cela, le Kremlin garde un contrôle sur les décisions stratégiques de Rosatom et **une augmentation, même marginale, des coûts de production sur un marché de l'énergie déjà tendu reste risquée**.

Aux États-Unis, **le congrès s'attèle à définir le cadre d'un abandon progressif des importations d'U russe** et de la relance les capacités nationales d'extractions, de raffinage et d'enrichissement du combustible nucléaire, sur le sol étasunien^{8 9 10}. **En Europe, les divisions limitent l'action de l'Union européenne**. Pour l'instant, la stratégie européenne reste centrée sur la recherche d'alternatives au combustible de Rosatom dans les centrales VVER de conception russe^{11 12}.

³ Kacper Szulecki et Indra Overland, "Russian nuclear energy diplomacy and its implications for energy security in the context of the war in Ukraine," *Nature Energy*, 8 (2023): 413.

⁴ Nikita Minin et Tomáš Vlček, "Determinants and considerations of Rosatom's external strategy," *Energy Strategy Reviews*, 17 (2017): 37.

⁵ À l'inverse des flux d'uranium naturel d'Asie centrale, dont une partie transit par la Russie grâce à des entreprises russes.

⁶ Euratom Supply Agency, *Annual Report 2021*, 2021, <https://euratom-supply.ec.europa.eu/system/files/2022-12/Euratom%20Supply%20Agency%20-%20Annual%20report%202021%20-%20Corrected%20edition.pdf> (consulté le 30 juin 2023).

⁷ Tass, *Rosatom continues supplies of nuclear fuel, enriched uranium to Europe, U.S.*, 23 novembre 2022, <https://tass.com/economy/1540573> (consulté le 30 juin 2023).

⁸ U.S. Congress, *Nuclear Fuel Security Act of 2023*. Porté par Sen. Joe Manchin, S.452, 118th Cong., 1st sess. 17 mai 2023. <https://www.congress.gov/bill/118th-congress/senate-bill/452/text> (consulté le 30 juin 2023).

⁹ Grid Employment Office, *Civil Nuclear Credit Program*, s. d. <https://www.energy.gov/gdo/civil-nuclear-credit-program> (consulté le 30 juin 2023).

¹⁰ U.S. Congress, *International Nuclear Energy Act of 2023*. Porté par Sen. Joe Manchin, S.826, 118th Cong., 1st sess. 15 mars 2023. <https://www.congress.gov/bill/118th-congress/senate-bill/826/text> (consulté le 30 juin 2023).

¹¹ TVP World, *Lithuania proposes carve-outs to EU skeptics over Russia nuclear sanctions*, 4 avril 2023, <https://tvpworld.com/68965498/lithuania-proposes-carveouts-to-eu-skeptics-over-russia-nuclear-sanctions> (consulté le 30 juin 2023).

¹² Commission européenne, *REPowerEU- Une énergie abordable, sûre et durable pour l'Europe*, s. d. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_fr (consulté le 30 juin 2023).

Des risques croissants qui pèsent sur le transport

Le transport de matières radioactives est **bien plus flexible que celui des hydrocarbures**, sous réserve d'être muni d'un *packaging* dédié. La principale contrainte repose sur le respect des normes internationales spécifiques aux matières radioactives, dites de **classe 7**.

En 2021, un quart des cent plus grands ports dans le monde refusait le chargement/déchargement ainsi que le transit de matières classe 7 et seulement trois armateurs prenant en charge une partie des matières radioactives (CMA-CGM, Hapag-Loys et Zim)^{13 14}. Ces restrictions s'expliquent par la soumission des infrastructures portuaires aux décisions politiques de leur exploitant public et par les contraintes logistiques et financières de la gestion de faible quantité de matières sensibles. S'ajoute la multiplication des rachats d'exploitants et d'armateurs par des acteurs refusant la gestion des matières classes 7, avec la crainte de désengagement des compagnies d'assurance, limitant d'autant plus les marges de manœuvre. Pour autant, **ces éléments ne constituent pas un risque de rupture sèche de l'approvisionnement en combustible nucléaire**. Toutefois, ils pourraient contraindre les acteurs de la *supply chain* à s'orienter vers des alternatives par charter beaucoup plus coûteuses.

La guerre en Ukraine n'a pas eu d'influence fondamentale sur le transport de matières enrichi hors Russie, Moscou n'ayant aucun contrôle sur le transit entre l'Europe ou l'Amérique du Nord et des fournisseurs alternatifs de combustibles. **La question se pose toutefois sur l'uranium naturel d'Asie centrale et enrichie en Russie**.

Historiquement, l'uranium kazakh et ouzbek rejoint les marchés internationaux en traversant la Russie. Mais face aux risques, la priorité est mise sur le développement de voies alternatives. **La route transcaspienne** reliant le port d'Aktau au Kazakhstan jusqu'au détroit du Bosphore par l'Azerbaïdjan et la Géorgie semble être l'option privilégiée. Malgré des limitations logistiques et réglementaires, **elle est en passe de désenclaver l'Asie centrale**^{15 16}.

¹³ World Nuclear Association, *IAEA Technical Meeting on Denials of Shipment*, 23-26 mars 2021, https://na.eventscloud.com/file_uploads/38e8d983b3084137605856b7e1e0d914_CharacterofDoSSolutionsGorlinIAEATMD_OS_final_.pdf (consulté le 30 juin 2023).

¹⁴ Energy Intelligence, *Transport: Shipping Mergers Threaten Nuclear Fuel*, 25 octobre 2017, <https://www.energyintel.com/0000017b-a7d3-de4c-a17b-e7d330f00000> (consulté le 30 juin 2023).

¹⁵ Mining Newswire, *Kazatomprom Plans to Increase Uranium Quota on Trans-Caspian Route*, 7 novembre 2022, <https://www.miningnewswire.com/kazatomprom-plans-to-increase-uranium-quota-on-trans-caspian-route/> (consulté le 30 juin 2023).

¹⁶ Andrea Jennetta et William Freebairn, "Kazatomprom experiences delays in alternate uranium export route," *S&P Global – Commodity Insights*, 28 octobre 2022, <https://www.spglobal.com/commodityinsights/pt/market-insights/latest-news/electric-power/102822-kazatomprom-experiences-delays-in-alternate-uranium-export-route> (consulté le 30 juin 2023).

La Chine développe également des routes alternatives depuis le Kazakhstan vers la gare ferroviaire Alashankou (Xinjiang), qui **se verra dotée en 2030 d'un hangar d'une capacité équivalent à la production annuelle kazakh.**

L'Arabie saoudite : futur nouvel entrant dans le marché de l'enrichissement ?

En janvier 2023, le ministre saoudien de l'Énergie réitérait **l'intention du Royaume de s'équiper de moyens d'enrichissement d'uranium pour s'assurer son indépendance complète dans la production du combustible nucléaire**¹⁷. En mai 2022, Riyad a lancé son premier appel d'offres pour la construction de deux réacteurs dans la baie de Khor Duweihin¹⁸.

L'enrichissement s'inscrit dans **la stratégie d'indigénisation de la filière nucléaire saoudienne**, mettant à profit les gisements d'uranium identifiés dans le pays avec l'aide d'industriels chinois. Ce choix se fait également au regard de la situation iranienne, ce qui laisse planer le doute sur la nature civile du programme.

Le développement à court terme de capacité d'enrichissement saoudienne devra passer soit par l'importation de centrifugeuses à l'étranger, soit par des partenariats de transferts de technologie¹⁹. Au vu des conditions imposées par les États-Unis en matière de non-prolifération, le royaume saoudien pourrait privilégier **des partenariats avec des partenaires moins regardants, au premier titre la Chine**²⁰.

Les enjeux de l'évolution des technologies d'enrichissement

À moyen terme, **la centrifugation restera la technologie dominante d'enrichissement**. Six acteurs sont capables de fabriquer et assembler des centrifugeuses à un niveau commercial : Enrichment Technology Company (ETC), un consortium entre Orano et Urenco, l'États-Unien Centrus, le chinois CNNC, Rosatom, le japonais JNFL et le brésilien INB²¹.

¹⁷ Edward Wong, Vivian Nereim et Kate Kelly, "Inside Saudi Arabia's Global Push for Nuclear Power," *The New York Times*, 1 avril 2023, <https://www.nytimes.com/2023/04/01/us/politics/saudi-arabia-nuclear-biden-administration.html> (consulté le 30 juin 2023).

¹⁸ Congressional Research Service, *Prospects for U.S.-Saudi Nuclear Energy Cooperation*, 9 juin 2023, <https://sgp.fas.org/crs/mideast/IF10799.pdf> (consulté le 30 juin 2023).

¹⁹ Mark Hibbs, "Riyadh's Uranium Enrichment Option," *Carnegie Endowment for International Peace*, 4 février 2018, <https://carnegieendowment.org/2018/02/04/riyadh-s-uranium-enrichment-option-pub-75444> (consulté le 30 janvier 2023).

²⁰ Makiko Tazaki et Yusuke Kuno, "The Contribution of Multilateral Nuclear Approaches (MNAs) to the Sustainability of Nuclear Energy," *Sustainability*, 4, no. 8 (2012): 1755.

²¹ Au Brésil, le développement de capacité d'enrichissement doit beaucoup aux investissements de la Marine Militaire qui espère s'équiper de navires à propulsion nucléaire

Du côté des **États-Unis**, la maîtrise de la technologie s'était progressivement restreinte au **secteur militaire**²². Mais depuis 2019, un accord entre le Department of Energy (DoE) américain et Centrus prévoit l'allocation de centrifugeuse AC-100M d'usage militaire pour le développement d'Uranium enrichi pour des usages civils²³. **En Europe, les capacités de réactions de l'industrie des centrifugeuses sont moins rapides**²⁴. Les moyens d'ETC ont diminué depuis 2003 et les projets de modernisation des équipements risquent d'être freinés par **la perte de main-d'œuvre qualifiée**.

À l'inverse des acteurs européens et états-uniens, **Rosatom a continuellement alimenté en commandes son industrie de production de centrifugeuses**. Toutefois, des doutes persistent sur la capacité russe à sourcer nationalement la totalité des matières nécessaires au maintien de son programme de modernisation. **En Chine**, l'entreprise CNNC développe sa capacité à exporter des services d'enrichissement par centrifugeuses²⁵. En 2018, elle a annoncé l'essai d'une nouvelle génération de **centrifugeuse aux caractéristiques supposées proches des standards internationaux**.

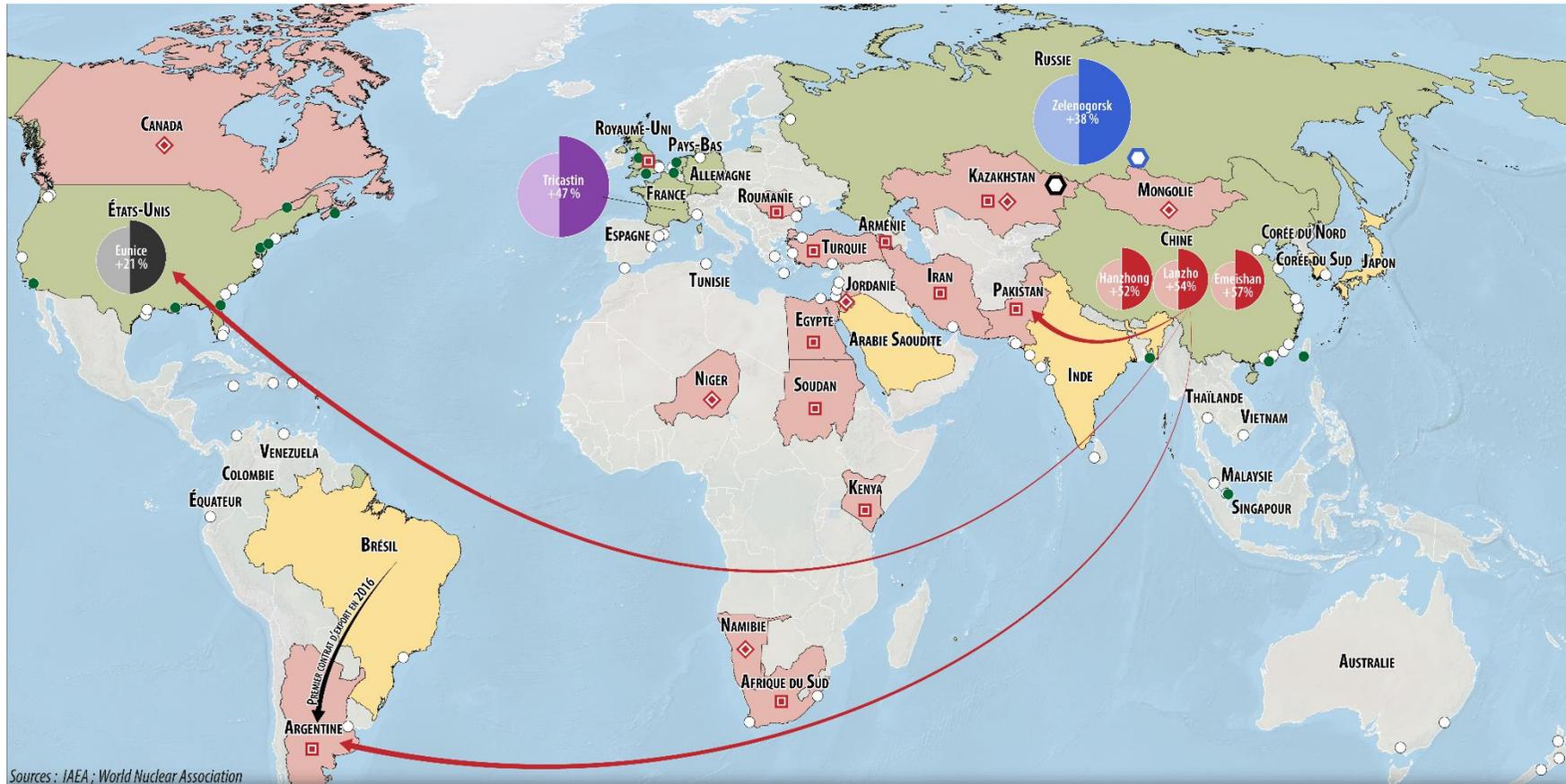
²² World Nuclear News, *American Centrifuge demonstration plant completes operations*, 22 février 2016, <https://www.world-nuclear-news.org/c-american-centrifuge-demonstration-plant-completes-operations-2202167.html> (consulté le 30 juin 2023).

²³ Dan Leone, "Decision On Next U.S. Uranium Enrichment Tech Pushed To 'End Of Year' To Give Oak Ridge 'Fair Shot' Against Centrus," *Defense Daily*, 12 février 2020, <https://www.defensedaily.com/decision-next-u-s-uranium-enrichment-tech-pushed-end-year-give-oak-ridge-fair-shot-centrus/nuclear-modernization/> (consulté le 30 juin 2023).

²⁴ Phil Chaffee, "Nuclear Fuel: Western Suppliers Prepare for Sudden Bull Market," *Energy Intelligence*, 25 mars 2022, <https://www.energyintel.com/0000017f-9d96-db3b-a9ff-bdfe14e90000> (consulté le 30 juin 2023).

²⁵ Hui Zhang, "China's uranium enrichment and plutonium recycling 2020-2040: current practices and projected capacities", dans *China's Civil Nuclear Sector: Plowshares to Swords?*, dir. Henry D. Sokolski (Arlington: Nonproliferation Policy Education Center, 2021), p. 25.

Carte 3 – La Chine au cœur de la recomposition du marché de l'enrichissement de l'uranium

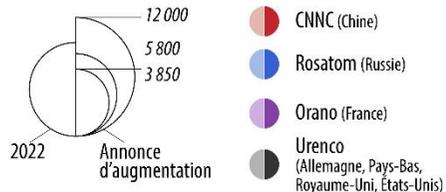


Sources : IAEA ; World Nuclear Association

Augmentation de la production des principaux acteurs

Les principaux acteurs commerciaux

CAPACITÉ D'ENRICHISSEMENT (en milliers d'UTS)



Vers une recomposition du marché de l'enrichissement de l'uranium

Les nouveaux acteurs potentiels

Volonté brésilienne de rentrer dans le marché de l'uranium enrichi

Le développement de nouvelles routes chinoises

- Pays ciblé par la stratégie chinoise
- Au moins un réacteur chinois planifié ou sous contrat
- Contrat d'approvisionnement en uranium enrichi chinois
- Au moins une mine d'uranium avec une participation chinoise

L'ambivalence des ports sur le transit d'uranium enrichi

- Port autorisant le chargement, déchargement et transit
- Port interdisant le chargement, déchargement et transit

Banques internationales d'uranium enrichi

- Sous contrôle russe
- Sous contrôle de l'AIEA

L'entrée d'un nouvel enrichisseur sur le marché des centrifugeuses demanderait qu'un de ces acteurs exporte ses technologies. Une éventualité qui n'est pas à exclure au vu des transferts technologiques de Rosatom et des lacunes du régime international de non-prolifération²⁶.

Se préparer aux besoins des prochaines générations de réacteurs nucléaires

Les nouveaux modèles de réacteurs nécessitant des combustibles plus enrichis sont un des principaux enjeux de l'évolution du marché de l'enrichissement. Sur les 78 modèles de réacteurs avancés recensés dans la base de données ARIS de l'AEIA, 23 nécessiteront **des taux d'enrichissement supérieurs à 5%, dont 16 seront entre 10% et 20% (High-Assay Low Enriched Uranium – HALEU)**²⁷. Du côté du DoE états-unien 22 des designs sélectionnés pour le Advanced Reactor Program nécessitent du HALEU²⁸. Le principal avantage comparé au LEU est de permettre l'utilisation de réacteurs nucléaires moins volumineux ainsi que l'allongement de la durée entre deux rechargements.

L'estimation de la demande future en HALEU est particulièrement incertaine, mais les estimations de **la Nuclear Energy Institute (NEI) prévoient une multiplication par 150 de la demande annuelle d'ici à 2035**²⁹. Or, il n'y a actuellement **aucun enrichisseur européen ou états-unien capable de répondre à cette demande**. L'approvisionnement provient soit du déclassement d'uranium militaire états-unien enrichi à plus de 20%, soit d'achat auprès de TENEX, l'enrichisseur russe de Rosatom.

Aux États-Unis, aucune infrastructure n'a la capacité de soutenir une demande industrielle de HALEU par **manque d'habilitation**, en Europe, **aucune réglementation** n'autorise l'enrichissement en HALEU³⁰. D'autre part, les taux d'enrichissement demandés changent d'un modèle de réacteurs à l'autre, tout comme la forme de l'uranium enrichi, avec des fabricants de réacteurs qui souhaitent produire leurs propres combustibles. **Une non-**

²⁶ International Panel on Fissile Materials Blog, *Russia may supply uranium enrichment technology to India*, 19 octobre 2016, https://fissilematerials.org/blog/2016/10/russia_may_supply_uranium.html (consulté le 30 juin 2023).

²⁷ IAEA, *Advanced Reactors Information System*, s. d., <https://aris.iaea.org/> (consulté le 30 juin 2023).

²⁸ U. S. Department of Energy, "Advanced Reactor Demonstration Program," *Office of Nuclear Energy*, s. d., <https://www.energy.gov/ne/advanced-reactor-demonstration-program> (consulté le 30 juin 2023).

²⁹ Maria Korsnick, "Updated Need for High-Assay Low Enriched Uranium," *Nuclear Energy Institute*, 23 juillet 2020, <https://www.nei.org/CorporateSite/media/filefolder/resources/letters-filings-comments/NEI-Letter-to-the-Secretary-of-Energy-HALEU-Update.pdf> (consulté le 30 juin 2023).

³⁰ American Nuclear Society, "Got Fuel? Prospective HALEU enrichers and buyers talk goals and timelines," *Nuclear Newswire*, 2 décembre 2022, <https://www.ans.org/news/article-4547/got-fuel-prospective-haleu-enrichers-and-buyers-talk-goals-and-timelines/> (consulté le 30 juin 2023).

standardisation qui complique considérablement la maîtrise du processus et augmente les coûts d'exploitations³¹.

Depuis 2020, Washington a « supporté la disponibilité d'uranium enrichi au-dessus de 5% et en dessous de 20% pour l'utilisation commerciale ». Les mesures d'accompagnement apportées en 2022 prévoient la création d'un consortium HALEU³², une stimulation de la demande³³, des financements publics et l'adaptation de la réglementation.

L'Union européenne n'a, à ce jour, aucune stratégie pour le développement d'une filière HALEU commerciale. Seule la Grande-Bretagne finance le développement de capacités de production, de transport et de déconversion d'HALEU³⁴.

Rationaliser l'utilisation des capacités d'enrichissement : des possibilités limitées

Devant l'impossibilité d'augmenter rapidement les capacités d'enrichissement, une solution temporaire pourrait être le passage rapide d'une situation d'*underfeeding* à un *overfeeding*. Mais cela obligerait à consommer plus d'uranium naturel alors même que ce marché est déjà touché par une hausse des cours reportant les tensions existantes dans l'enrichissement vers l'extraction minière de l'uranium.

Le principal blocage viendrait des capacités de conversion de l'uranium naturel en UF₆ nécessaires avant l'enrichissement. L'*underfeeding* qui a dominé le marché depuis les années 2010 ainsi que la dilution des stocks militaires ont mené à une destruction des capacités de conversion. Si de nouvelles capacités de conversion sont en cours de (ré)ouverture, elles se destinent d'abord à répondre à l'augmentation des besoins causés par la construction de nouveaux réacteurs nucléaires et non pour l'*overfeeding*.

La substitution de l'uranium enrichi par des combustibles MOX utilisant du plutonium et de l'uranium appauvri n'est pas envisageable rapidement, considérant le manque d'usine de fabrication et le faible nombre de réacteurs autorisés à les utiliser. De même, l'utilisation d'uranium de retraitement au lieu d'uranium naturel comme ressource en entrée ne permettra de sauvegarder que de très faibles volumes d'enrichissement.

³¹ Nuclear Innovation Alliance, *Catalyzing a Domestic Commercial Market for High-Assay, Low-Enriched Uranium (HALEU)*, avril 2022, <https://nuclearinnovationalliance.org/sites/default/files/2022-10/Catalyzing%20a%20Domestic%20Commercial%20HALEU%20Market%20%282%29.pdf> (consulté le 30 juin 2023).

³² American Nuclear Society, "DOE-NE opens HALEU Consortium with focus on information exchange," *Nuclear Newswire*, 8 décembre 2022, <https://www.ans.org/news/article-4563/doene-opens-haleu-consortium-with-focus-on-information-exchange/> (consulté le 30 juin 2023).

³³ World Nuclear News, *DOE begins scoping for HALEU supply*, 6 juin 2023, <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/DOE-begins-scoping-for-HALEU-supply> (consulté le 30 juin 2023).

³⁴ Department for Energy Security and Net Zero, *Nuclear Fuel Fund*, 2 janvier 2023, <https://www.gov.uk/government/publications/nuclear-fuel-fund> (consulté le 30 juin 2023).

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

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



www.iris-france.org

