



Observatoire
de la sécurité des flux
et des matières énergétiques

Rapport

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 DES AUTEURS 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.

TABLE DES MATIÈRES

Fondamentaux de l'enrichissement	6
COMMENT EN EST-ON ARRIVÉ À LA DOMINATION DE LA RUSSIE SUR LA FILIÈRE ?	15
1. État des lieux : des surcapacités, mais pour combien de temps ?	17
2. Les facteurs internes de la domination de Rosatom sur l'enrichissement	24
3. La destruction du secteur états-unien	30
4. Urenco, Orano : quels risques pour les enrichisseurs européens ?	35
5. En Chine, des divisions internes qui limitent la conquête des marchés internationaux	38
QUELS CHANGEMENTS LA GUERRE EN UKRAINE CAUSE-T-ELLE ?	41
1. Une difficile évaluation de la capacité d'utilisation coercitive de l'uranium enrichi par la Russie	44
2. Aux États-Unis, inciter l'investissement dans de nouvelles capacités en interdisant les importations de Russie	48
3. L'Agence d'approvisionnement d'Euratom : les ratés d'une politique commune européenne	50
4. La Russie anticipe et cherche de nouveaux débouchés pour son uranium enrichi	52
5. Une nouvelle alliance au sein du marché contre la Russie ?	54
L'ARABIE SAOUDITE : FUTUR NOUVEL ENTRANT DANS LE MARCHÉ DE L'ENRICHISSEMENT ?	55
CONCLUSION.....	59
D'où partons-nous ?	60
Quels sont les risques posés par cette situation ?	61
Quelles sont les principales voies de mitigation du risque ?	61
Quels blocages persistent ?	62
GLOSSAIRE	63
ANNEXES	65

L'invasion de l'Ukraine par la Russie au printemps 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

Pourquoi faut-il enrichir l'uranium ?

L'ensemble des 410 réacteurs nucléaires commerciaux en exploitation dans le monde en mai 2023 utilisent de l'uranium, sous différentes formes, comme combustible. À l'état naturel, ce métal est constitué d'un mélange d'isotopes, dont 99,27% d'uranium 238 et 0,72% d'uranium 235. Dans un réacteur nucléaire, l'énergie est produite grâce à la fission d'un noyau cassé sous l'effet d'une collision avec un neutron, libérant de l'énergie et d'autres neutrons qui provoquent à leur tour une autre fission, constituant ainsi une réaction en chaîne. L' ^{238}U est beaucoup plus stable que l' ^{235}U qui est dit « fissile » et peut plus facilement se casser. L'électricité est produite par le réchauffement d'un fluide caloporteur (habituellement de l'eau, plus rarement du gaz) sous l'effet de ces réactions de fission.

342 des 410 réacteurs en fonction, représentant 90% de la puissance nucléaire installée dans le monde, utilisent de l'eau ordinaire, dite « légère », pressurisée ou bouillante comme caloporteur¹. L'eau légère a le défaut d'absorber les neutrons, ce qui réduit d'autant la réaction en chaîne. Ces réacteurs à eau pressurisée (PWR) ou bouillante (BWR), nécessitent alors d'augmenter, ou « enrichir », la part d' ^{235}U dans le combustible. Ces réacteurs demandent des combustibles enrichis en ^{235}U entre 3% et 5% dits « Low Enriched Uranium » (LEU). Il en va de même pour les 8 réacteurs utilisant du gaz comme caloporteur (dits AGR), tous situés au Royaume-Uni, et demandant des enrichissements légèrement plus faibles. En Russie, onze réacteurs utilisant du graphite pour modérer la réaction (LWGR) subsistent en consommant de l'uranium faiblement enrichi entre 2% et 3%.

41 réacteurs, constituant 6,5% de la puissance installée, utilisent de « l'eau lourde » (oxyde de deutérium). À l'inverse de l'eau légère, l'eau lourde facilite la fission et le maintien de la réaction en chaîne. En conséquence, **ces réacteurs, appelés PHWR, ne nécessitent pas d'enrichir la part d' ^{235}U et peuvent fonctionner avec de l'uranium naturel. Réduite à l'échelle mondiale, cette filière est centrale pour quatre pays, l'Argentine, l'Inde, le Canada et la Roumanie**, où les PHWR représentent 66% du parc nucléaire pour le premier, 95% pour le second et 100% pour les deux autres. On en retrouve également en Chine et en Corée du Sud. Les coûts d'achat ou de fabrication d'eau lourde, l'investissement initial plus important et la nature plus proliférante des PHWR que des PWR/BWR ont joué contre leur développement à l'échelle mondiale. Inversement, la possibilité de se passer d'enrichissement de l'uranium constitue leur principal intérêt. Mais pour l'Inde et le Canada, c'est surtout l'existence de

¹ IAEA, *PRIS – Status Reports – In Operation & Suspended Operation – By Country*, 2023, <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByType.aspx> (consulté le 29 juin 2023).

filières nationales, commercialisant des modèles indigènes de PHWR, qui explique l'attachement à cette technologie.

Deux cas particuliers demeurent. D'abord celui de la filière des réacteurs à haute température refroidis au gaz (HTGR), dont les deux seules unités en fonction en Chine s'alimentent avec de l'uranium enrichi à 8,5% (High-Assay Low Enriched Uranium -HALEU-). Ensuite, le réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium liquide BN-600 en Russie qui utilise du HALEU enrichi entre 17% et 26% (voir partie 5).

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

Réacteur à eau pressurisée (PWR)	• Uranium enrichi entre 3% et 5% • 301 réacteurs en fonction
Réacteur à eau bouillante (BWR)	• Uranium enrichi entre 3% et 5% • 41 réacteurs en fonction
Réacteur avancé refroidi au gaz (AGR)	• Uranium enrichi entre 2,5% et 3,5% • 8 réacteurs en fonction
Réacteur modéré au graphite refroidi à l'eau (LWGR).	• Uranium enrichi entre 2% et 3% • 11 réacteurs en fonction
Réacteur à eau lourde (PHWR)	• Uranium naturel ou très faiblement enrichi • 46 réacteurs en fonction
Réacteur à haute température refroidi au gaz (HTGR)	• Uranium enrichi à 8,5% • 1 réacteur en fonction
Réacteur à neutrons rapides (RNR)	• Uranium enrichi entre 17% et 26% • 2 réacteurs en fonction

La domination des réacteurs à uranium enrichi ne sera pas remise en cause à moyen terme.

Sur les 58 réacteurs en cours de construction, seuls trois sont des PHWR, tous en Inde, pouvant fonctionner à l'uranium naturel². Il en va de même pour les réacteurs planifiés en attente de construction. Sur la centaine de réacteurs dont la construction est envisagée, seuls 14 (12 en Inde et 2 en Roumanie) sont des PHWR.

² IAEA, *PRIS – Status Reports – Under Construction – By Country*, 2023, <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/UnderConstructionReactorsByCountry.aspx> (consulté le 29 juin 2023).

Figure 2 : Type de réacteurs actuellement en fonction



Sources : PRIS – AEIA

Figure 3 : Type de réacteurs actuellement en construction



Sources : PRIS – AEIA

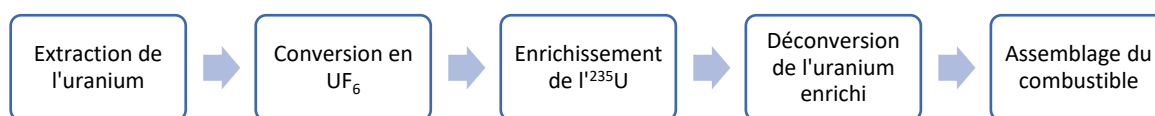
Le développement des petits réacteurs nucléaires modulaires (SMR) n'inversera pas cette tendance. Sur les 49 modèles les plus avancés, 24 devraient fonctionner avec du LEU et 16 avec du HALEU, augmentant potentiellement les besoins en enrichissement.

Comment enrichit-on l'uranium ?

Les procédés d'enrichissement profitent de la différence de masse entre l' ^{238}U et l' ^{235}U . Deux techniques ont été industrialisées, nécessitant toutes deux une étape préalable de *conversion* où l'oxyde d'uranium extrait des mines est purifié et transformé en hexafluorure d'uranium (UF_6). La *diffusion gazeuse* enrichit l'uranium en faisant passer l' UF_6 dans une série de membranes perforées. Plus léger, l' ^{235}U franchit plus rapidement les barrières ce qui enrichit le flux. La *centrifugation* sépare les deux isotopes en faisant tourner à haute vitesse un flux

d'UF₆ dans des centrifugeuses. Plus lourd, l'²³⁸U est plaqué sur l'extérieur quand l'²³⁵U reste au centre. L'UF₆ passe dans plusieurs centrifugeuses placées en cascade jusqu'à atteindre le niveau requis d'enrichissement. Nécessitant près de 50 fois moins d'électricité pour un résultat identique³, la centrifugation a rapidement remplacé la diffusion gazeuse à mesure que les progrès technologiques dans la résistance des matériaux et le développement des fibres de carbone, matières fondamentales des centrifugeuses, le permettaient. L'enrichissement de l'uranium par l'utilisation de laser permettant de sélectionner et séparer les isotopes est exploré dès les années 1970, mais abandonné au regard de la rentabilité de la centrifugation. Ce procédé, qui pourrait consommer encore moins d'énergie, est aujourd'hui redéveloppé aux États-Unis.

Figure 4 : Schéma simplifié de la chaîne d'approvisionnement en combustibles nucléaires



Qu'importe la technique, l'enrichissement de l'uranium naturel fonctionne toujours avec un flux d'UF₆ entrant contenant environ 0,7% d'²³⁵U et deux flux sortants : le premier est constitué de l'UF₆ enrichi à la teneur d'²³⁵U demandé par l'acheteur, le second est composé de matériaux appauvris en ²³⁵U (aussi appelé « *tails* »), dans lequel cet isotope est toutefois toujours présent et potentiellement valorisable. L'effort nécessaire pour séparer ces flux est quantifié en *Unité de travail de séparation* (UTS ou SWU en anglais). Les UTS permettent alors également de quantifier les capacités maximales des usines d'enrichissement.

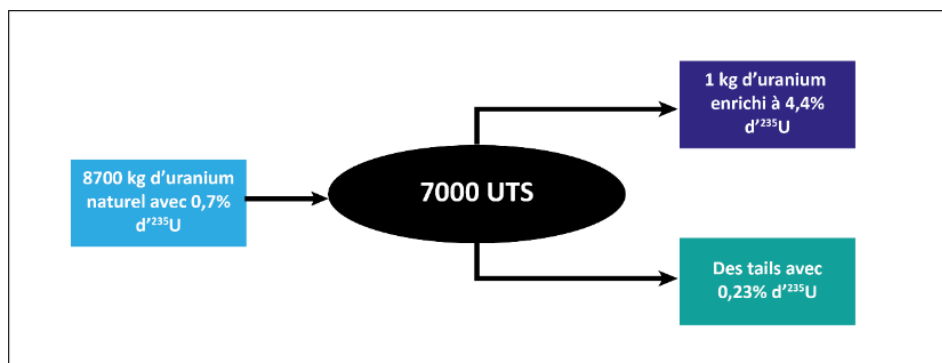
Pour produire une même quantité d'uranium enrichi, l'enrichisseur a la possibilité de jouer sur trois facteurs : le volume entrant d'UF₆ naturel, la quantité d'UTS appliquée et la teneur d'²³⁵U dans les *tails* produits. Si l'enrichisseur dispose de surcapacité d'UTS, il peut décider d'augmenter ce travail de séparation et centrifuger plus longtemps l'UF₆ fourni pour en extraire l'²³⁵U. En conséquence, il y aura moins d'²³⁵U dans les *tails* et le volume d'uranium naturel en entrée pourra être plus faible. Cette stratégie qui permet d'économiser de l'uranium naturel s'appelle l'*underfeeding*. Inversement, l'enrichisseur peut décider de baisser le temps passé par l'UF₆ naturel dans les centrifugeuses et limiter le nombre d'UTS utilisé. Cette stratégie, dite d'*overfeeding*, aura comme conséquence de produire des *tails* contenant

³ À plein régime, l'usine d'enrichissement par diffusion gazeuse George Besse du Tricastin consommait la production de trois réacteurs nucléaires.

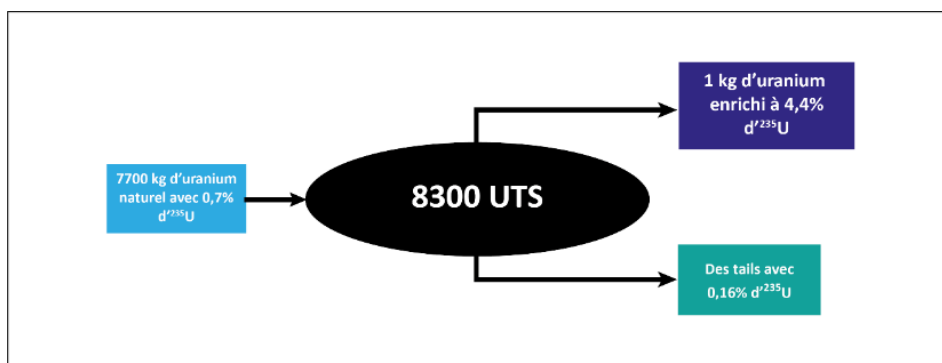
plus d' ^{235}U mais demande plus d'uranium naturel en entrée. Pour l'enrichisseur, il s'agit d'optimiser sa stratégie entre le coût de l' UF_6 et de l'UTS pour choisir le meilleur taux de *tails*.

Figure 5 : Schéma de flux pour produire 1kg d'uranium enrichi :
la capacité d'enrichissement nécessaire dépend du volume d' UF_6 en entrée
et du taux d' ^{235}U restant que l'on choisit pour les *tails* en sortie

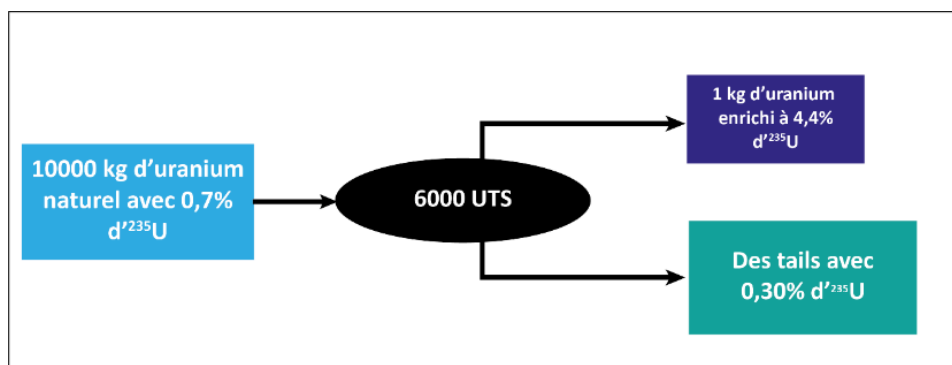
Dans une situation médiane



Dans une situation d'underfeeding



Dans une situation d'overfeeding



Comment fonctionne le marché de l'enrichissement ?

Il existe trois solutions de fourniture en combustibles nucléaires pour un exploitant de centrale. Premièrement, l'exploitant peut acheter directement le combustible entièrement assemblé à un producteur. Deuxièmement, il peut se fournir en uranium enrichi auprès d'un producteur puis le transférer à une entreprise tierce en charge de l'assemblage. Troisièmement, l'exploitant peut obtenir l'uranium naturel, puis acheter indépendamment des services de conversion, d'enrichissement et d'assemblage à différents acteurs. Les exploitants privilégient habituellement un mix des trois stratégies pour diversifier et sécuriser leurs chemins d'approvisionnement.

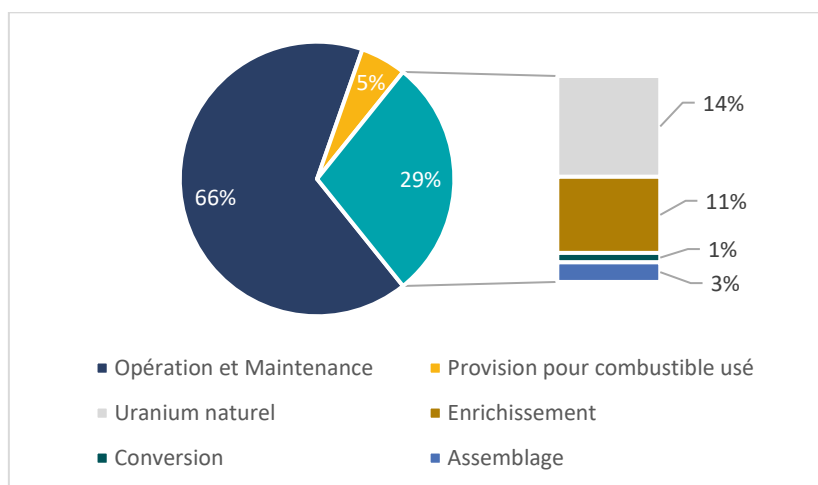
Jusqu'à l'étape d'assemblage, l'uranium est une commodité standardisée, indifférenciée et fongible. En conséquence, rien n'assure que, matériellement, l'uranium enrichi récupéré par un acheteur en sortie d'usine soit physiquement le même que l'uranium naturel qu'il a fourni à l'enrichisseur. Ce dernier peut utiliser d'autres stocks déjà disponibles chez lui. Dans le cas d'un contrat de service, l'acheteur et l'enrichisseur s'entendent sur la quantité d'UF₆ livrée en entrée, la quantité et le taux d'enrichissement en sortie, le volume d'UTS nécessaire pour y arriver ainsi qu'un taux théorique d'²³⁵U présent dans les *tails*. Toutefois, en fonction de la valeur de l'uranium naturel et de l'UTS sur le marché, l'enrichisseur peut optimiser par *underfeeding* ou *overfeeding*. Dans le premier cas, l'enrichisseur restera contractuellement propriétaire d'un volume d'uranium naturel qu'il pourra revendre. Dans les deux situations, l'enrichisseur reste propriétaire des *tails* qu'il pourra, éventuellement, réenrichir, vendre ou stocker. Cette possibilité reste toujours sujette à des limitations contractuelles permettant de faire varier, dans une proportion préalablement déterminée, le taux d'²³⁵U présent dans les *tails*. **Cette technique a permis à des acteurs ayant des problèmes structurels d'approvisionnement en uranium naturel, comme la Russie de privilégier une utilisation intensive des UTS avec de faibles taux d'²³⁵U dans les *tails* afin d'économiser de la matière.**

Le passage de l'enrichissement par diffusion gazeuse à la centrifugation a changé la structure des coûts d'opération de ces usines, diminuant fortement le poids du prix de l'énergie face à ceux de l'investissement et de la main-d'œuvre (voir annexe 1). Deux marchés coexistent pour l'achat d'UTS, un *spot* où s'effectuent des transactions avec une livraison prévue dans l'année, et un long terme caractérisé par des contrats de fourniture à plusieurs années, fréquemment au-dessus d'une décennie. Depuis le début des années 2000, les deux marchés ont suivi des évolutions très proches, le marché *spot* restant légèrement en dessous du long terme. Les prix évoluent en fonction du rapport entre la disponibilité des usines d'enrichissement et la demande réelle comme projetée, mais aussi en fonction des mesures douanières visant à limiter le poids de certains acteurs ou de l'utilisation sur le

marché de sources secondaires d'uranium ne nécessitant pas d'enrichissement, à l'image de la démilitarisation de stock d'uranium présent dans les têtes d'armes nucléaires. Ces dix dernières années, le prix de l'UTS s'est écroulé d'un maximum de 170\$/UTS à environ 50\$/UTS à la suite de l'accident de Fukushima, des perspectives négatives pour la filière nucléaire ainsi que du démantèlement d'une partie du parc de têtes nucléaires américaines alimentant le marché en HEU. Cette tendance s'inverse depuis 2019, s'accroissant en janvier 2022, sous l'effet combiné du regain d'intérêt politique pour le nucléaire, de la projection de nouvelles constructions de réacteur et de l'anticipation de potentielles sanctions sur les capacités russes dans les suites de la guerre en Ukraine. Le prix de l'UTS a presque doublé depuis début 2022, rendant à nouveau rentables les projets de construction de nouvelles capacités d'enrichissement.

Le prix du combustible nucléaire représente entre 15% et 20% du coût de production de l'électricité nucléaire, 35% en intégrant les provisions pour la gestion des déchets, bien éloigné du charbon et du gaz où le combustible constitue 78% et 87%. Cette part varie d'un pays à l'autre, plus importante aux USA (proche des 20%) qu'en France (16%), rendant les premiers plus sensibles aux variations des coûts d'approvisionnement. **L'enrichissement est le deuxième poste de coût dans l'approvisionnement en combustible**, représentant 24%, derrière l'achat d'uranium naturel (51%), mais devant l'enrichissement l'assemblage (18%) et la conversion (7%).

Figure 6 : Ventilation des coûts d'exploitation d'une centrale nucléaire



Source : World Nuclear Association

3% ? 5% ? 20% ? Que veulent dire ces limites d'enrichissement ?

S'il n'existe pas de nomenclature internationalement reconnue, 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%.

Aucune de ces catégories ne repose entièrement sur des réalités techniques, mais sont le produit de choix techniques, économiques et politiques. Elles demeurent pourtant inscrites dans les textes réglementaires à l'échelle nationale et internationale. L'autorité de sûreté nucléaire américaine fixe ainsi à 5% le maximum d'enrichissement dans les combustibles destinés aux réacteurs. Il en va de même en France où le décret régissant l'exploitation du site d'enrichissement du Tricastin stipule que « la teneur en isotope 235 de l'uranium de l'hexafluorure d'uranium présent dans l'installation sera au maximum de 5% »⁴. Apparue en 1955 aux États-Unis, ce seuil s'est imposé dans la standardisation de la fabrication de combustible pour REP, bien « qu'il n'existe aucune justification technique pour cette limite »⁵. Alors que l'augmentation du taux permettrait d'espacer les temps de rechargement des centrales en combustible et que de nouveaux modèles de réacteurs nécessitent des enrichissements plus élevés, le seuil de 5% est contesté.

Historiquement, l'HEU a d'abord été utilisé pour la propulsion navale, les réacteurs de recherches et la production d'isotopes médicaux. Dans ses protocoles additionnels, l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) place la limite de 20% d'enrichissement pour l'HEU pour faire la différence entre du matériel pouvant, ou non, être directement utilisée pour la fabrication d'arme nucléaire. Ce seuil renvoie au caractère dual des technologies d'enrichissement. S'il n'y a techniquement pas de limite matérielle, l'uranium de qualité militaire se situe en réalité au-dessus de 90%. La limite des 20% intègre l'effort déjà réalisé et le chemin qu'il reste à faire pour disposer d'assez d'uranium enrichi pour fabriquer une arme nucléaire. Toutes choses égales par ailleurs, enrichir l'uranium à 20% représente déjà 90% des UTS nécessaires pour arriver à un matériel de qualité militaire. Disposer de matériaux à 20% d'²³⁵U réduit donc considérablement le temps nécessaire pour dépasser le seuil militaire. Qui plus est, utilisé dans un réacteur de recherche, un combustible au-dessus de 20% produit beaucoup plus de plutonium potentiellement utilisable pour une arme. Depuis 1978, l'AIEA soutient en conséquence la conversion des réacteurs de recherche vers le LEU, mais une

⁴ JORF, Avis n° 2013-AV-0178 du 25 avril 2013, 2013, <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000027475637/> (consulté le 29 juin 2023).

⁵ 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).



soixantaine utilisent toujours du HEU⁶. Ainsi, s'ils s'appuient partiellement sur des réalités techniques, ces seuils restent avant tout des messages politiques. Leur dépassement devient un enjeu de communication dans les négociations pour des acteurs cherchant à annoncer ou dénoncer des velléités militaires.

⁶ Nuclear Research Reactors - World Nuclear Association » , s. d. <https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/radioisotopes-research/research-reactors.aspx> (consulté le 05 juillet 2023).



COMMENT EN EST-ON ARRIVÉ À LA DOMINATION DE LA RUSSIE SUR LA FILIÈRE ?

À RETENIR

- En 2022, les capacités d'enrichissement dépassaient la demande mondiale de près de 20%
- Dans 2 des 3 principaux scénarii d'évolution du parc nucléaire mondial de la World Nuclear Association, la demande en enrichissement dépasse les capacités de production entre 2025 et 2030.
- L'augmentation de la demande viendra d'abord d'Asie, et en particulier de Chine.
- Couplée à une stagnation de l'industrie nucléaire, la libéralisation du marché de l'enrichissement s'est concentrée autour de quatre entreprises : Rosatom, Urenco, CNNC et Orano.
- La place centrale prise par la Russie, qui contrôle 45% des capacités d'enrichissement dans le monde, relève autant d'erreurs stratégiques commises par les États-Unis que d'une politique commerciale volontariste du Kremlin à l'étranger.
- En 2021, la Russie fournissait 31% des besoins en enrichissement des pays d'Union européenne et 27% de la demande aux États-Unis
- La structure complexe de gouvernance d'Urenco, mêlant trois pays ainsi qu'intérêts gouvernementaux et commerciaux, limite sa capacité de réaction.
- Seule Orano se lance actuellement dans une augmentation importante de ses capacités d'enrichissement.
- Tout investissement des acteurs européens et états-uniens dans de nouvelles capacités sera subordonné à la signature de contrats d'approvisionnement à long terme par des exploitants de centrales nucléaires ainsi qu'à des engagements politiques fermes réduisant la place de la Russie dans les marchés occidentaux.

En Chine, les divisions internes dans le secteur nucléaire entre grands groupes publics pourraient constituer un danger pour la politique d'autonomie stratégique dans l'enrichissement.

1. État des lieux : des surcapacités, mais pour combien de temps ?

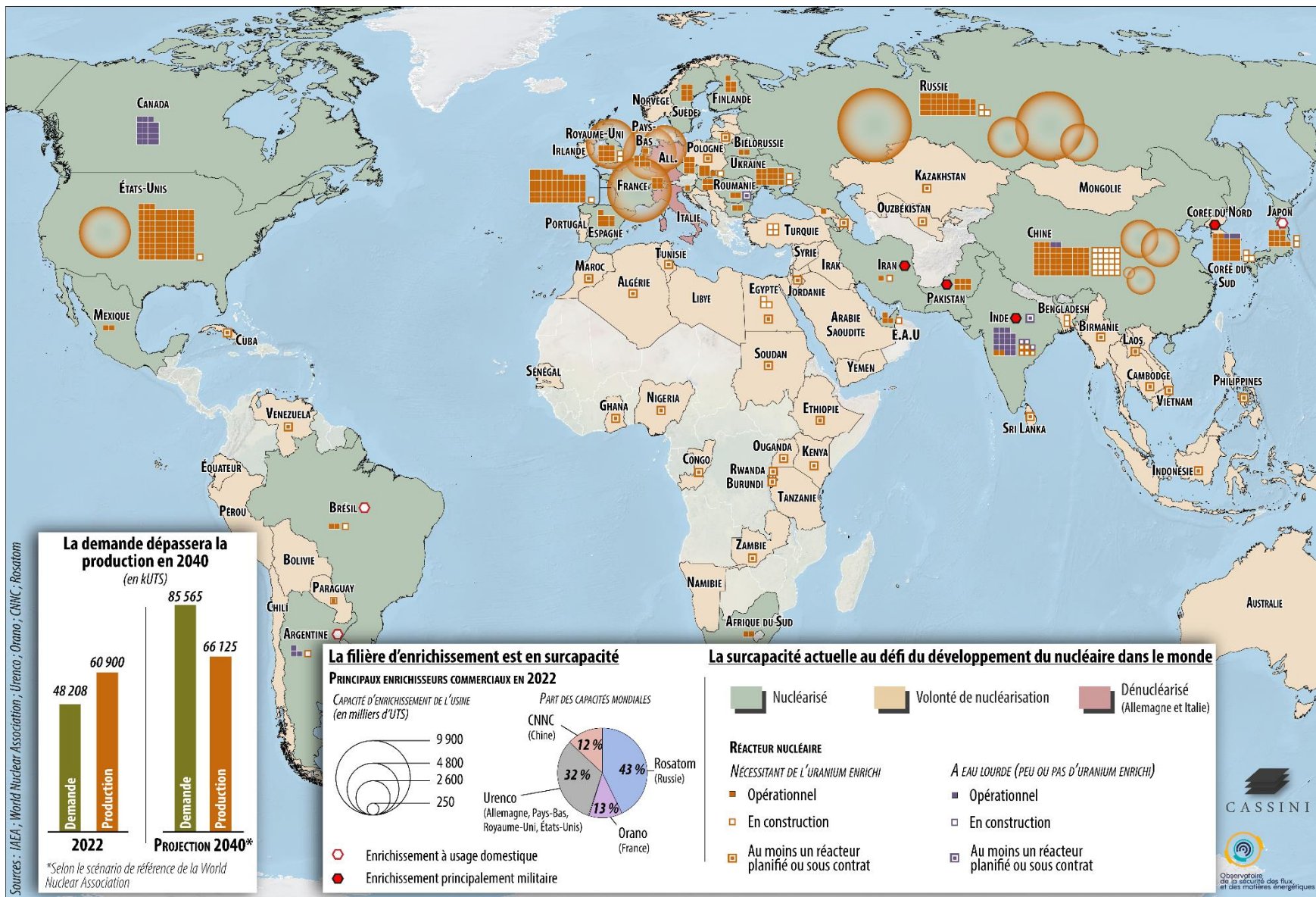
À l'échelle mondiale, la filière d'enrichissement était en surcapacité en 2022. Mais cette situation pourrait ne pas durer selon l'évolution de la demande, quantitativement (évolution de la part du nucléaire dans le monde) et qualitativement (changement de type de combustible), ainsi que l'éventuel retrait des capacités russes du marché. Attention, cette surcapacité ne signifie pas qu'une partie des usines d'enrichissement se trouve à l'arrêt. Le coût d'exploitation étant très faible, il est plus rentable pour les enrichisseurs de mobiliser entièrement leur capacité en appliquant une stratégie d'*underfeeding* (voir fondamentaux), en surutilisant les UTS pour baisser le volume d'UF₆ entrant, que de la laisser à l'arrêt. **Au cours de la décennie 2010, cette situation a pu laisser s'installer l'idée d'un marché dépourvu de tensions, retardant d'autant la prise de conscience de la place prise par Moscou.**

L'évaluation des besoins futurs est complexifiée par les incertitudes sur les modèles de réacteurs qui seront déployés à l'avenir et nécessiteront des enrichissements plus ou moins élevés. Ainsi, si un réacteur type de ceux déployés aujourd'hui consomme annuellement environ 25t d'uranium enrichi à 4,5%, les spécificités techniques des nouvelles générations de réacteurs comme l'EPR de Framatome ou l'AP1000 de Westinghouse nécessitent 17t enrichies à 5%⁷. En 2022, les contrats d'approvisionnement en uranium enrichi s'établissaient avec des taux d'²³⁵U à 0,22% en moyenne dans les *tails*⁸. Avec ces paramètres, un réacteur type nécessiterait annuellement environ 178 kUTS pour fonctionner, contre 142 kUTS pour un réacteur de type EPR (voir annexe 9).

⁷ World Nuclear Association, *Nuclear Fuel Cycle Overview*, 2021, <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/nuclear-fuel-cycle-overview.aspx> (consulté le 30 juin 2023).

⁸ Supply Agency of the European Atomic Energy Community, *Market Observatory*, s.d. https://euratom-supply.ec.europa.eu/activities/market-observatory_en (consulté le 30 juin 2023).

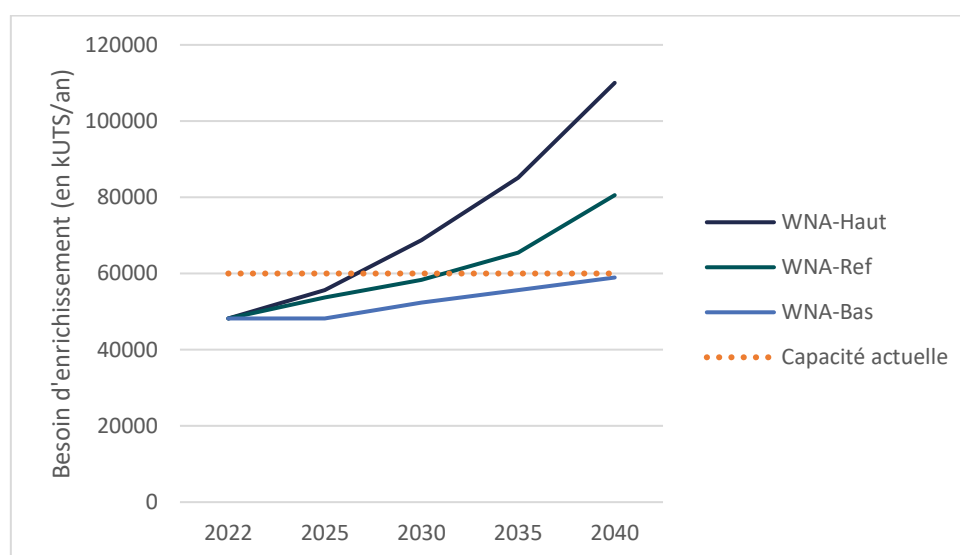
Carte 1 – L'enrichissement de l'uranium, une filière en surcapacité, mais pour combien de temps ?



Le principal moteur de la demande en enrichissement reste évidemment l'évolution de la part de l'électricité nucléaire. Si des signaux politiques forts sont donnés en ce sens depuis 2021, ils peinent encore à se matérialiser. Une dizaine de scénarii coexistent, allant du plus pessimiste de l'AIEA qui n'entrevoit pas d'augmentation de la capacité nucléaire installée d'ici à 2040, au plus optimiste qui envisage plus qu'un doublement, passant d'environ 367 GW à 839 GW. En conservant des paramètres d'enrichissement identiques à ceux en cours en 2022, le graphique ci-après présente les demandes théoriques en UTS d'ici à 2040⁹. **Dans 2 des trois scénarios du WNA (World Nuclear Association), les capacités actuelles d'enrichissement ne sont pas suffisantes.** Pour le plus haut la demande serait plus que doublée.

Pour y répondre il faudra soit construire **des capacités supplémentaires d'enrichissement**, soit exploiter les usines avec des taux de rejet d' ^{235}U plus élevés dans les *tails* et donc **consommer plus d' UF_6 en entrée ce qui augmentera les tensions sur l'approvisionnement en uranium naturel et sur l'étape de conversion.** À titre de comparaison, pour répondre au scénario le plus élevé sans surconsommer d'uranium naturel, il faudrait construire des capacités de production équivalentes à celle de l'usine d'enrichissement George Besse II du Tricastin (France) tous les 8 ans jusqu'en 2040.

Figure 7 : Augmentation des besoins en UTS d'ici à 2040 en fonction des principaux scénarii d'évolution du nucléaire

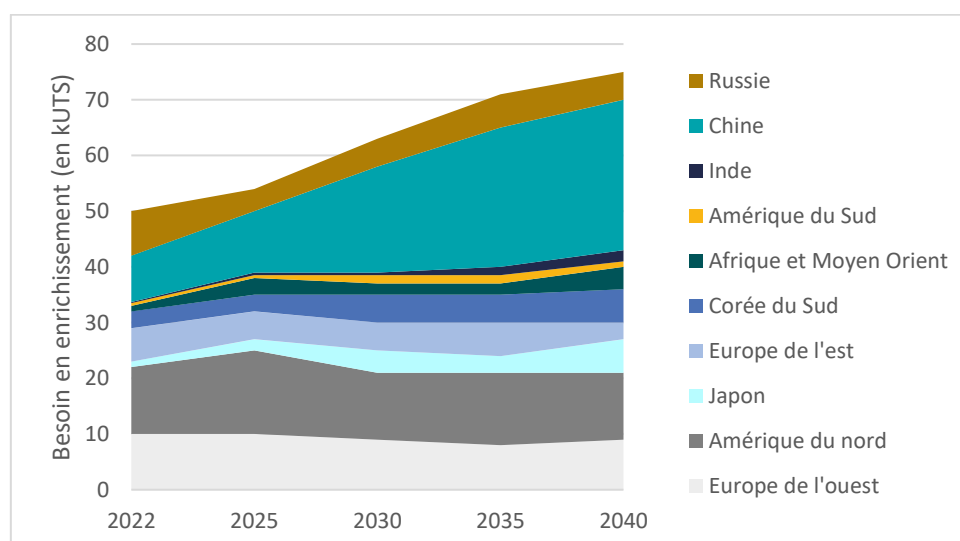


Sources : Orano ; World Nuclear Association

⁹ Pour le réaliser, nous avons pris l'évaluation de la World Nuclear Association qui établit la demande mondiale en 2022 à 50 250 kUTS pour 383GW installés, soit 131 kUTS/GW.

Enfin, qu'importe les scénarii, **cette évolution ne sera pas géographiquement homogène**. L'Europe et les États-Unis consomment en 2022 environ la moitié des UTS mondiaux avec respectivement 10 290 kUTS et 14 000 kUTS pour le fonctionnement de leurs centrales nucléaires, loin devant la Russie (3 500 kUTS) et la Chine (6 943 kUTS). **Mais les courbes se croisent, et la consommation de Pékin dépassera la demande européenne et états-unienne cumulée vers le milieu des années 2030**. Attention toutefois, ces chiffres ne prennent pas en compte pour la Russie les besoins en UTS afin d'assurer les contrats d'approvisionnement en combustible nucléaire déjà signée qui accompagne la vente de réacteur à l'étranger (voir partie 2). Si l'on s'en tient aux réacteurs en construction et à ceux déjà planifiés, l'évolution de la production d'électricité nucléaire, et donc la consommation d'UTS, devrait rester relativement stable en Europe de l'Ouest et en Amérique du Nord d'ici à 2040, tandis que la demande sera tirée en Asie par les nouvelles constructions en Chine et en Corée du Sud, le redémarrage des réacteurs japonais à l'arrêt depuis l'accident de Fukushima ainsi que, plus marginalement, le développement du nucléaire aux Émirats arabes unis ainsi qu'en Égypte. Pour Pékin, dans le scénario le plus élevé, la demande pourrait plus que doubler et passer de 6 950 kUTS/an aujourd'hui à 13 900 kUTS/an. Au Japon, la remise en route des 15 réacteurs opérables restants pourrait faire passer de 1 242 kUTS/an à 4 147 kUTS/an. À plus long terme, au-delà de 2050, la géographie du déploiement de réacteurs à besoin d'enrichissement HALEU affectera la répartition spatiale de la demande d'UTS, principalement en Europe centrale ainsi qu'en Amérique du Nord.

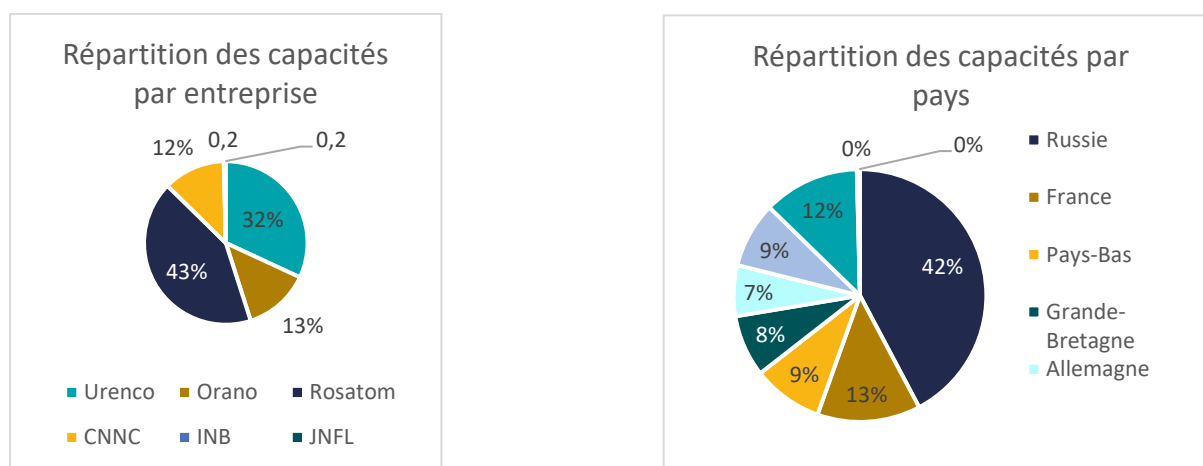
Figure 8 : Évolution du besoin en kUTS par région d'ici à 240 selon un scénario médian de développement du nucléaire



Sources : Orano ; UxC

Les capacités théoriques d'enrichissement s'élevaient en 2022 à environ 60 900 kUTS, soit 20% de plus que la demande (voir annexe 2). L'enrichissement est un secteur fortement concentré autour de 4 entreprises, Rosatom (45% des capacités installées dans le monde), Urenco (30%), China National Nuclear Corporation – *CNNC* – (12%) et Orano (12%). À l'échelle des pays, Rosatom opère uniquement en Russie, CNNC en Chine et Orano en France tandis qu'Urenco exploite quatre sites à Almelo aux Pays-Bas (8,5% du total mondial), Gronau en Allemagne (6%), Capenhurst en Angleterre (7,5%) et Eunice aux États-Unis (7,5%)¹⁰. Si l'on descend au niveau de l'usine, en dehors d'Urenco et d'Orano, l'évaluation des capacités russes et chinoises est soumise à caution sur la fiabilité des données. Rosatom exploite 4 usines à Novouralsk (environ 16% des capacités mondiales), Zelenogorsk (entre 14,5% et 20%), Seversk (5%) et Angarsk (4%)¹¹. CNNC dispose de quatre sites à Lanzhou (6%), Hanzhong (3,5%), Emeishan (1,5%) et Heping (1%)¹². S'ajoutent enfin quelques producteurs marginaux, mais présents sur le marché commercial de la vente de service d'enrichissement, au Brésil (*Industrias Nucleares do Brazil*), en Argentine (*Comisión Nacional de Energía Atómica*) ainsi qu'au Japon (*Japan Nuclear Fuel Limited*) dont les capacités cumulées dépassent difficilement 0,5% du total mondial. Restent quelques acteurs dont les activités d'enrichissement, à vocation duales militaires et civiles, ne percolent pas dans le marché, en Inde, Iran et Pakistan.

Figure 9 : Répartition des capacités d'enrichissement commercial en 2022 par entreprise et pays



Sources : OCDE-NEA ; World Nuclear Association

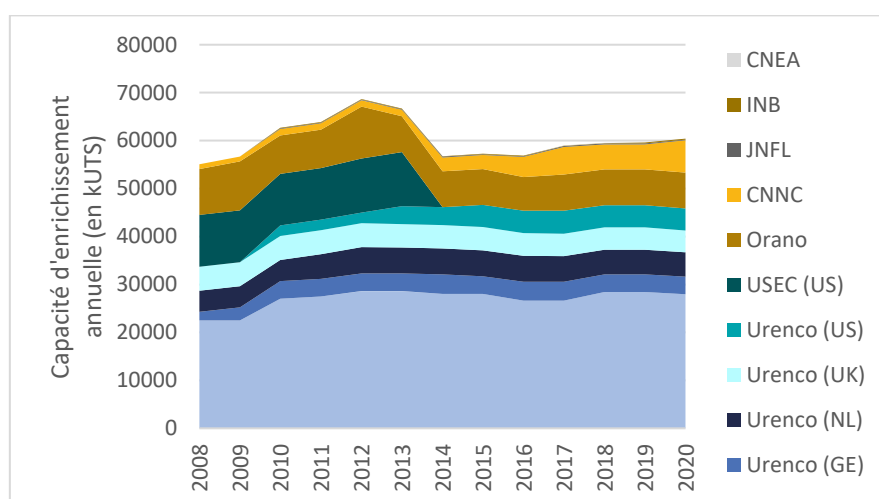
¹⁰ Urenco, *Delivering for a net zero world - Annual report and accounts 2021*, 2021, https://www.urencocom/cdn/uploads/supporting-files/Urenco_AR_2021.pdf (consulté le 30 juin 2023).

¹¹ Rosatom, *2021 Performance of the Fuel Division*, 2021, https://report.rosatom.ru/go_eng/2021/tvel_2021_eng.pdf (consulté le 30 juin 2023).

¹² 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.

La décennie 2010 a vu une reconfiguration de la géographie de l'offre en enrichissement au profit de la Chine et plus marginalement de la Russie. En 2010, les États-Unis disposaient de 20% des capacités d'enrichissement, contre 7,5% dix ans plus tard, quand sur la même période la Chine passait de 2% à 12% et de 43% à 45% en Russie. D'un point de vue comptable, la diminution des capacités états-uniennes s'explique par la fermeture de l'usine d'enrichissement par diffusion gazeuse de Paducah (Kentucky) en 2013, soutenue jusqu'alors par des subventions étatiques en raison de coûts d'exploitation élevés, qui n'a pas été entièrement compensée par l'ouverture de l'usine de centrifugation d'Urenco à Eunice (Nouveau-Mexique) en 2010. Grevés par les prix de l'UTS dépréciés sur le marché international, les enrichisseurs n'ont pas eu d'incitations à construire de nouvelles capacités. Le programme volontariste de Pékin en faveur de son industrie de l'enrichissement lui a alors permis de prendre une place centrale sur ce secteur, même si pour le moment ces capacités sont d'abord dédiées aux besoins internes.

Figure 10 : Évolution des capacités d'enrichissement depuis 2008, en kUTS



Sources : Euratom Supply Agency

Ces changements ont été accentués par la réduction concomitante des programmes de *downblending* d'uranium hautement enrichi issu du démantèlement de stocks militaires qui constituaient la principale source secondaire d'uranium enrichi¹³. Réalisé en mélangeant du HEU avec de l'uranium avec de l'UF₆ beaucoup moins enrichi, le *downblending* permet

¹³ American Nuclear Society, "The U.S. nuclear fuel Gordian knot: From global supplier to vulnerable customer," *Nuclear Newswire*, 19 mai 2023, <https://www.ans.org/news/article-5030/the-nuclear-fuel-gordian-knot-part-2/> (consulté le 30 juin 2023).

d'économiser des besoins en enrichissement. Le programme *Megatons to Megawatts*¹⁴ signé en 1993 prévoyant le démantèlement d'armes nucléaires russes et le *downblending* de l'HEU résultant en LEU a fourni environ 50% des besoins des exploitants américains de centrales nucléaires jusqu'à son expiration en 2013. L'administration américaine reste discrète sur le démantèlement de ses propres stocks d'HEU, même si l'existence de contrats entre le département de l'énergie (DOE), des entreprises spécialisées dans le downblending et des opérateurs de centrales nucléaires témoigne de la continuité de ces opérations. La déclassification de certains documents en 2016 relevait la disponibilité de 41 tonnes d'HEU utilisables pour downblending dans les inventaires du DOE¹⁵.

À l'heure actuelle, **ces projections ne déclenchent pas d'investissements massifs dans de nouvelles capacités concurrentes à la Russie et la Chine**, bien que la remontée des cours de l'UTS sur le marché puisse les rendre à nouveau rentables. Le principal obstacle reste l'incertitude quant à la stabilité des prix de l'UTS sur un horizon assez lointain pour assurer l'amortissement du projet. **De l'avis des enrichisseurs, l'engagement à long terme des consommateurs d'UTS reste le premier levier pour déclencher la construction de nouvelles capacités.** Il y a ici une différence fondamentale introduite par le passage de la diffusion gazeuse à la centrifugation. Si dans la première, il pouvait être rentable d'ajuster le fonctionnement des usines à la demande, dans la seconde, les coûts d'investissements sont si élevés que ce n'est pas possible. Il est donc fondamental, avant tout investissement, d'avoir une visibilité contractuelle stable sur plusieurs décennies. D'un point de vue politique, cet engagement peut se traduire par **la constitution de stocks stratégiques d'uranium enrichi alimentés en continu par les filières nationales** et par la fixation de **quota maximum d'importation**, comme proposé par Washington (voir partie 2) ou, plus directement, par **la fermeture du marché intérieur** aux acteurs étrangers, comme le font la Chine et la Russie. Seul Orano a lancé les premiers travaux de consultation publique pour l'ajout de 7 500 kUTS pour son site du Tricastin, doublant ses capacités, un projet qui ne pourrait être opérationnel avant 2030 compte tenu des délais réglementaires¹⁶. Dans une moindre mesure, Urenco a déposé une demande d'autorisation pour augmenter de 1 000 kUTS les capacités de son usine d'Eunice d'ici à 2028.

¹⁴ 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).

¹⁵ Office of Nuclear Energy, Department of Energy, *Excess Uranium Management: Effects of Potential DOE Transfers of Excess Uranium on Domestic Uranium Mining, Conversion, and Enrichment Industries; Notice of Issues for Public Comment*, 2017, <https://www.federalregister.gov/documents/2017/03/09/2017-04668/excess-uranium-management-effects-of-potential-doe-transfers-of-excess-uranium-on-domestic-uranium> (consulté le 30 juin 2023).

¹⁶ Orano, *Projet Extension GB2 - Le maître d'ouvrage*, s. d. <https://www.orano.group/projetextensiongb2/fr/le-projet> (consulté le 30 juin 2023).

Dans cette situation, il est probable qu'une croissance de la demande mondiale en enrichissement d'ici à 2030 sera absorbée par des stratégies d'*overfeeding*, accentuant les tensions sur l'approvisionnement en uranium naturel et en service de conversion en UF⁶.

2. Les facteurs internes de la domination de Rosatom sur l'enrichissement

Si la domination de Rosatom sur le marché mondial de l'enrichissement est incontestable, la capacité de l'ingénieur russe à implémenter sa stratégie de conquête à l'international dépend tout autant de ce secteur.

Depuis la loi fédérale 317-FZ de décembre 2007, Rosatom est l'unique entreprise en charge de l'enrichissement de l'uranium en Russie, par le biais de sa filiale TVEL qui concentre 45% des capacités mondiales (entre 24 300 et 27 600 kUTS). Les opérations sont réalisées sur quatre sites, opérés par quatre sous-filiales : *Ural Electrochemical Combine* à Novouralsk dans l'Oural (41% des capacités russes), *Zelenogorsk Electrochemical Plant* dans le kraï de Krasnoïarsk en Sibérie (35,5%), *Siberian Chemical Combine* à Seversk dans la région de Tomsk en Sibérie (12,5%) et *Angarsk Electrochemical Combine* dans l'oblast d'Irkoutsk en Sibérie (11%)¹⁷. Rosatom a consolidé son contrôle en rachetant les parts du kazakh *Kazatomprom* qui contrôlait 50% de l'*Uranium Enrichment Center* de Novouralsk¹⁸. Les améliorations en cours à Krasnoïarsk devraient en faire le premier site d'enrichissement dans les prochaines années, passant de 8 700 kUTS à 12 000 kUTS de capacité. En face, la demande annuelle générée par l'exploitation du parc nucléaire russe est évaluée à 5 100 kUTS. **La Russie dispose donc théoriquement d'entre 19 000 kUTS et 22 500 kUTS en excès pour l'exportation, ce qui représente 50% des besoins mondiaux hors Russie, et 60% en soustrayant la demande chinoise dont le marché intérieur est fermé.**

Malgré l'existence de barrières douanières et de quotas d'importations ciblant spécifiquement la Russie en Union européenne (UE) et aux USA (voir partie 2), les deux régions consommaient en 2021 respectivement 3 190 kUTS¹⁹ et 3 953 kUTS²⁰ d'enrichissement russe, soit **environ 36% des capacités de Rosatom théoriquement disponibles pour l'exportation**. Dans l'UE, la Russie fournissait 31% des besoins en UTS en 2021, une part en nette baisse

¹⁷ Rosatom, *2021 Performance of the Fuel Division*, 2021, https://report.rosatom.ru/go_eng/2021/tvel_2021_eng.pdf (consulté le 30 juin 2023).

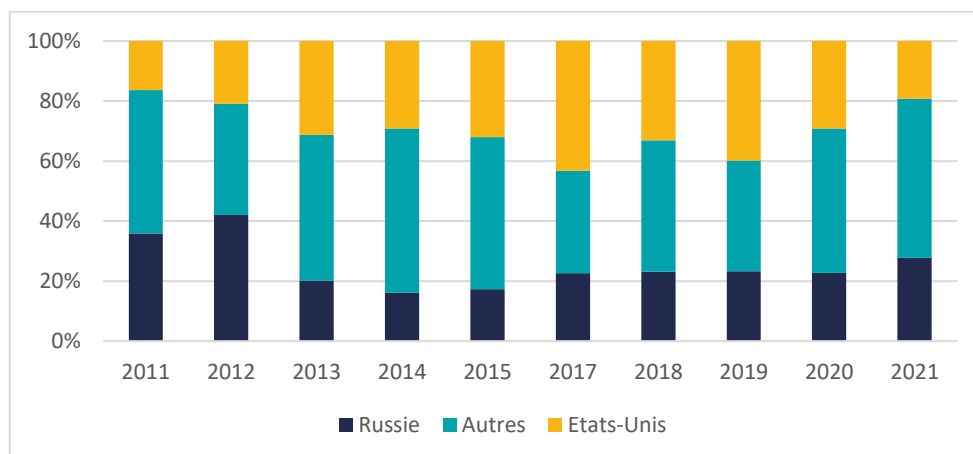
¹⁸ World Nuclear News, *Kazatomprom to sell stake in enrichment JV*, 31 janvier 2020, <https://world-nuclear-news.org/Articles/Kazatomprom-sells-stake-in-enrichment-JV> (consulté le 30 juin 2023).

¹⁹ Supply Agency of the European Atomic Energy Community, *Market Observatory*, s.d. https://euratom-supply.ec.europa.eu/activities/market-observatory_en (consulté le 30 juin 2023).

²⁰ U. S. Energy Information Administration, *Uranium Marketing Annual Report*, s. d. <https://www.eia.gov/uranium/marketing/table16.php> (consulté le 30 juin 2023).

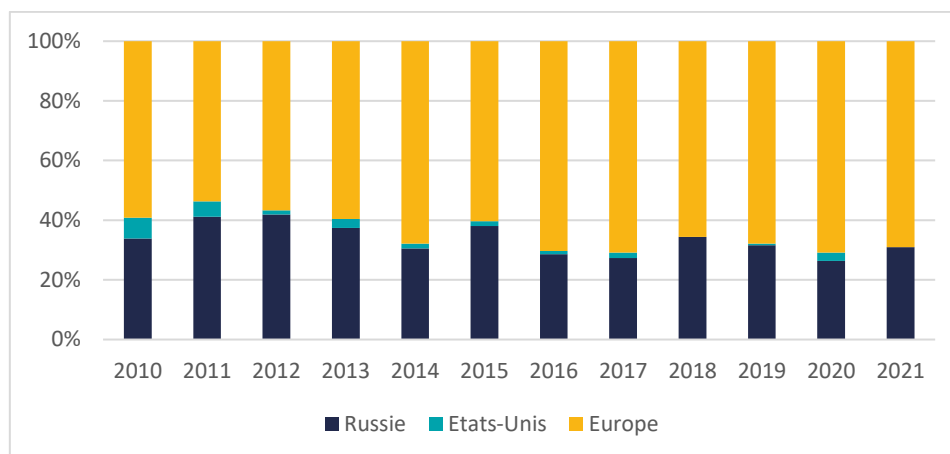
depuis le début des années 2010 où elle s'établissait autour de 40%. Outre-Atlantique, Rosatom répondait la même année à près de 27% des besoins en UTS, une part en augmentation par rapport à la moitié de la décennie, mais en baisse comparée à 2010

Figure 11 : Évolution de la part de la Russie dans l'achat de services d'enrichissement par des exploitants états-uniens de centrales nucléaires²¹



Sources : Uranium Marketing Annual Report - Energy Information Administration

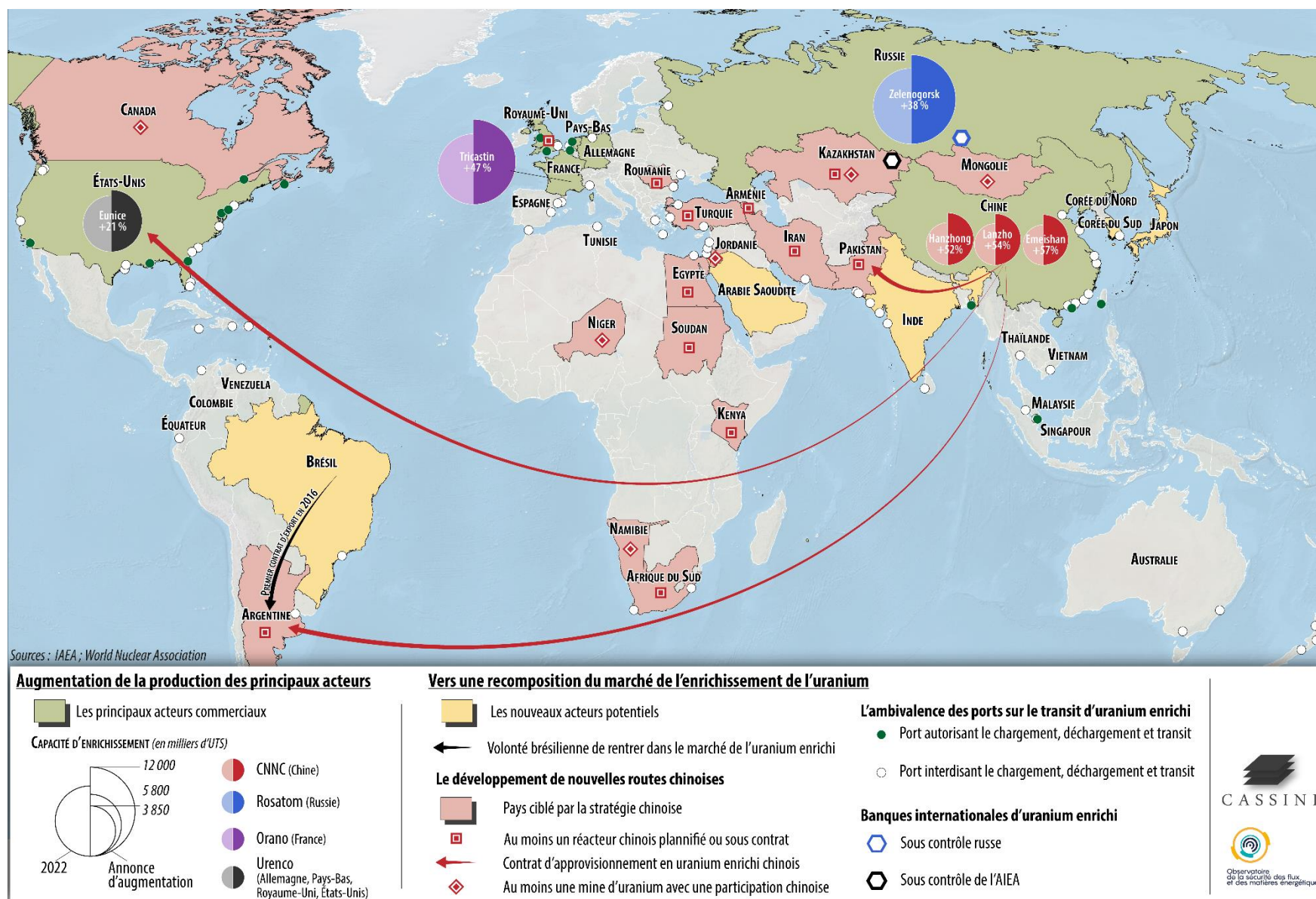
Figure 12 : Évolution de la part de la Russie dans l'achat de services d'enrichissement par des exploitants européens de centrales nucléaires



Sources : Euratom Market Observatory

²¹ Absence de données pour 2016.

Carte 2 – La Chine au cœur de la recomposition du marché de l'enrichissement de l'uranium



La domination de la Russie s'est construite dans les années 2010, sous l'effet combiné de facteurs économiques et technologiques ainsi que de stratégies diplomatiques et commerciales de Moscou, alors que la filière était au bord de l'effondrement. Les surcapacités actuelles de la Russie sont les héritières de l'investissement soviétique dans un appareil de production pléthorique d'uranium hautement enrichi pour la production d'armements nucléaires, ces derniers ayant perdu leur vocation à la fin de la guerre froide. Jusqu'en 1987, la majorité des capacités de Novouralsk, Seversk et Zelenogorsk était dédiée à l'HEU, ce qui n'empêche pas Moscou de signer son premier accord d'enrichissement avec la France dès 1971. Dans les années 2010, ces surcapacités sont bien moins chères à exploiter que les usines européennes ou américaines. Outre le coût de la main-d'œuvre, ce sont les choix technologiques qui donnent un avantage à la Russie. L'URSS investit dans la R&D autour de la centrifugation dès les années 1950, ce qui lui permet de remplacer entièrement son enrichissement à diffusion gazeuse, particulièrement gourmand en énergie, par des centrifugeuses dès la fin des années 1980. En France et aux États-Unis, cette transition n'arrivera qu'en 2010. **Au milieu des années 2010, le coût production estimé est alors entre 40\$ et 60\$/UTS en Russie, contre plus de 100\$ aux États-Unis, alors que le marché plonge sous les 100\$/UTS dès 2014²² (voir annexe 8).**

Ces avantages sont mis à profit par **une politique volontariste portée par le Kremlin qui vise à mettre en pratique l'objectif de contrôler 40% du marché de l'enrichissement d'ici à 2030**, un but déjà atteint en 2023. Moscou mobilise d'abord ses services diplomatiques pour résoudre les blocages qui limitaient l'utilisation complète de ses capacités. En 2010, la Russie signe ainsi avec Camberra un accord qui lui permet d'utiliser de l'uranium australien pour l'enrichir et le vendre sans condition quant à l'acheteur, alors que les accords en place limitaient la vente uniquement à la Finlande et la Suède²³. L'année suivante, la Russie signe un accord identique avec le Canada. Parallèlement, TENEX, la filière en charge des exportations de combustibles nucléaires, ouvre des filiales de commercialisation en Corée du Sud, en Allemagne et Suisse pour l'Europe (Internexco), au Japon, en Grande-Bretagne (Tradewil Limited) ainsi qu'aux États-Unis (Tenam). Simultanément, Rosatom s'est alliée avec un groupe d'exploitants de centrales nucléaires états-uniens, l'*Ad Hoc Utilities Group*, afin de limiter les mesures politiques et juridiques freinant sa pénétration du marché (voir partie 2). La stratégie fonctionne : au début des années 2020, la totalité des 30 pays nucléarisés avait acheté de l'uranium enrichi à la Russie au moins une fois depuis la mise en exploitation de leurs centrales. L'annexion de la Crimée en 2014 n'a entraîné aucune sanction contre les

²² Pavel Podvig, "History of Highly Enriched Uranium Production in Russia," *Science and Global Security*, 19, no. 1 (2011): 46.

²³ Anton Khlopkov et Valeriya Chekina, "Governing Uranium in Russia", *DIIS Report*, 2014, <https://www.files.ethz.ch/isn/185558/diisreport2014-19.pdf> (consulté le 30 juin 2023).

entreprises responsables de l'enrichissement et de sa commercialisation. Toutefois, comme pour d'autres exportations énergétiques, elle a motivé la redirection stratégique vers de nouveaux pays non européens.

Enfin, le poids de Rosatom dans le secteur de l'enrichissement est une conséquence de la stratégie plus globale de la Russie sur le marché de la vente de combustibles nucléaires et, surtout, de réacteurs. Rassemblant toutes les activités de la filière, l'entreprise peut fournir des contrats dits « *Package Supply* » où elle s'occupe de l'achat de l'uranium naturel, de sa conversion, de son enrichissement et de la fabrication du fuel, en offrant des rabais aux exploitants. Plus encore, Rosatom est le seul fournisseur proposant des contrats « *Pay and Forget* » intégrant en sus la reprise des combustibles usés, grâce au droit russe autorisant le stockage de déchets nucléaires étrangers. Si ces offres étaient auparavant limitées aux réacteurs de types russes, les VVER, Rosatom est capable depuis 2015 de produire des combustibles (appelés TVS-K) pour l'ensemble des réacteurs REP de technologie occidentale sans aucune contrainte ou restriction de propriété intellectuelle. L'ingénieur a augmenté ses capacités d'assemblage de TVS-K fin 2021 avec l'ouverture d'une nouvelle ligne à Novossibirsk²⁴. Inversement, le monopole de Rosatom sur la fabrication de combustibles VVER utilisés par les réacteurs en Finlande, République tchèque, Hongrie, Slovaquie, Bulgarie, Inde, Chine, Bélarus, Iran et Ukraine n'est plus entièrement effectif depuis l'entrée de Westinghouse sur ce marché, même si les capacités concrètes d'assemblage de la filière américaine restent limitées pour le moment. **Toutefois, les récentes exportations de réacteurs par Moscou devraient continuer d'asseoir son hégémonie sur le marché de l'enrichissement.** Les contrats de vente des centrales d'Astraviets (Bélarus), Rooppur (Bangladesh), Akkuyu (Turquie) et El-Dabaa (Égypte) intègrent la fourniture du combustible pour la totalité de la durée de vie des réacteurs. Les futures exportations devraient suivre le même schéma.

En conséquence, **le maintien de capacités d'enrichissement mobilisables pour l'exportation est un élément crucial de la stratégie de conquête des marchés étrangers pour Rosatom.** C'est particulièrement le cas pour les pays non nucléarisés auxquels ces contrats sont destinés. Financièrement, ces contrats sont tout aussi fondamentaux. Depuis le milieu des années 2010, l'exportation de services combustibles (conversion, enrichissement et assemblage) représente environ 70% des exportations constituant un portefeuille de plus de 25 milliards de dollars²⁵. Mais plus stratégiquement, ces contrats courent sur le long terme, assurant une

²⁴ World Nuclear News, *TVEL starts PWR fuel fabrication at Novosibirsk*, 29 décembre 2021, <https://world-nuclear-news.org/Articles/TVEL-starts-PWR-fuel-fabrication-at-Novosibirsk> (consulté le 30 juin 2023).

²⁵ Rosatom, *2021 Performance of the Fuel Division*, 2021, https://report.rosatom.ru/go_eng/2021/tvel_2021_eng.pdf (consulté le 30 juin 2023).

stabilité des revenus sur plusieurs décennies et permettant ainsi de compenser des carnets de commandes de réacteurs qui fluctuent.

Toutefois, plus que les intérêts financiers, **le caractère stratégique des surcapacités d'enrichissement pour la Russie relève de leur mobilisation pour sauvegarder et produire de l'uranium naturel**. Si la Russie dispose théoriquement d'importants gisements d'uranium, équivalent à 8% des ressources conventionnelles identifiées, leur accès est complexe et leur coût de production élevé. En conséquence, la Russie ne produisait en 2021 que 2 635 tonnes d'uranium naturel, moins de la moitié de la consommation de son propre parc de centrales et moins d'un cinquième des besoins nécessaires pour honorer les contrats d'exportation de combustibles à l'étranger²⁶. En conséquence, depuis les années 1990, Rosatom a consacré une partie de ses capacités d'enrichissement pour « fabriquer » de l'uranium naturel de deux manières, soit en ré-enrichissant des *tails* à un niveau de concentration en ²³⁵U équivalent à de l'uranium naturel soit en opérant ses usines avec des taux de rejets d'²³⁵U très faibles, de l'ordre de 0,1% contre 0,22% en moyenne (*underfeeding*). Dans le premier cas, les *tails* peuvent provenir des opérations d'enrichissement de Rosatom directement ou bien être achetés auprès d'enrichisseurs étrangers, comme cela a été le cas avec Urenco ou Orano. **Si des chiffres fiables sont difficiles à obtenir, on peut estimer que cette stratégie permettait à Rosatom d'économiser environ 5 000 tonnes d'uranium naturel par an.**

Le contexte est alors complexe pour Rosatom. L'augmentation des prix de l'UTS sur les marchés devrait inciter l'entreprise à ralentir cette stratégie. Mais parallèlement, les cours de l'uranium naturel augmentent également, en s'accroissant depuis juillet 2021, ce qui renforce encore l'intérêt du réenrichissement et de l'*underfeeding*. **En conséquence, Rosatom cherche à augmenter son portefeuille d'extraction d'uranium à l'étranger.** En interne, la mise en exploitation du gisement d'Elkon en Yakutie (357 000t d'uranium) reste suspendue faute de rentabilité²⁷. Parallèlement, Rosatom accélère le développement de la mine de Dobrovolnoye (Oural) dont l'ouverture en 2025 ajoutera 200t à la production annuelle d'uranium²⁸. Au Kazakhstan, Rosatom a acheté en mai 2023 au fonds souverain kazakh une partie des tranches 6 et 7 de la mine de Budenovskoye, dont la mise en production prévue en 2024 devrait en faire la première mine au monde²⁹. En Afrique, l'ingénieur a réactivé en novembre 2022 le projet de mine de Mjuku River en Tanzanie à l'arrêt depuis 2015, aux réserves estimées de

²⁶ Nuclear Energy Agency, *Uranium Resources, Production and Demand (Red Book)*, 2022, https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_28569/uranium-resources-production-and-demand-red-book (consulté le 30 juin 2023).

²⁷ Interfax, *Elkon Mining Co starts pilot gold production at Severnoye field*, 15 septembre 2022, <https://interfax.com/newsroom/top-stories/83124/> (consulté le 30 juin 2023).

²⁸ World Nuclear News, *Development of Dobrovolnoye uranium mine begins*, 12 novembre 2021, <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Development-of-Dobrovolnoye-uranium-mine-begins> (consulté le 30 juin 2023).

²⁹ Phil Chaffee, "Uranium: Kazatomprom to Proceed With Budenovskoye-6 and -7", *Energy Intelligence*, 29 avril 2022, <https://www.energyintel.com/00000180-703b-dcd6-afe5-773f47720000> (consulté le 30 juin 2023).

26 000t d'uranium, et espère lancer la phase pilote d'extraction d'ici à juillet 2023³⁰. Les projets en Namibie dans la région d'Omaheke sont à l'arrêt après le refus début 2023 de Windhoek d'octroyer un permis d'utilisation d'eau³¹. Si cette décision est motivée par des craintes environnementales, plusieurs analystes y voient également l'influence de la Chine dont l'industrie nucléaire contrôle aujourd'hui l'ensemble du secteur uranifère namibien.

3. La destruction du secteur états-unien

La Russie s'est engouffrée dans le vide creusé par les erreurs stratégiques des États-Unis. En 2022, le parc nucléaire américain nécessitait 12 000 kUTS par an pour fonctionner, les exploitants de centrales ayant acheté 14 000 kUTS, témoignant de stratégies de constitution de stocks et d'*overfeeding*³². Cet écart n'est pas neuf : depuis 2010 les achats d'UTS ont augmenté aux États-Unis alors que le parc nucléaire perdait douze réacteurs. **Les capacités installées dans l'usine d'Urenco à Eunice, seule en fonction aux USA, sont de 4 800 kUTS, ne pouvant couvrir que moins de 40% de la demande minimale.** Les signaux de soutien envoyés par l'administration fédérale américaine ainsi que par celles des États³³ laissent présager une augmentation des besoins, *a minima* par la prolongation des centrales en fonction. Seule une tranche est actuellement en construction à Vogtle en Géorgie pour une ouverture prévue début 2024. En face, Urenco n'a engagé pour le moment qu'une augmentation de 1 000 kUTS de ses capacités à Eunice. **Les États-Unis resteront donc fortement déficitaires en capacité d'enrichissement au moins pour les 10 prochaines années.**

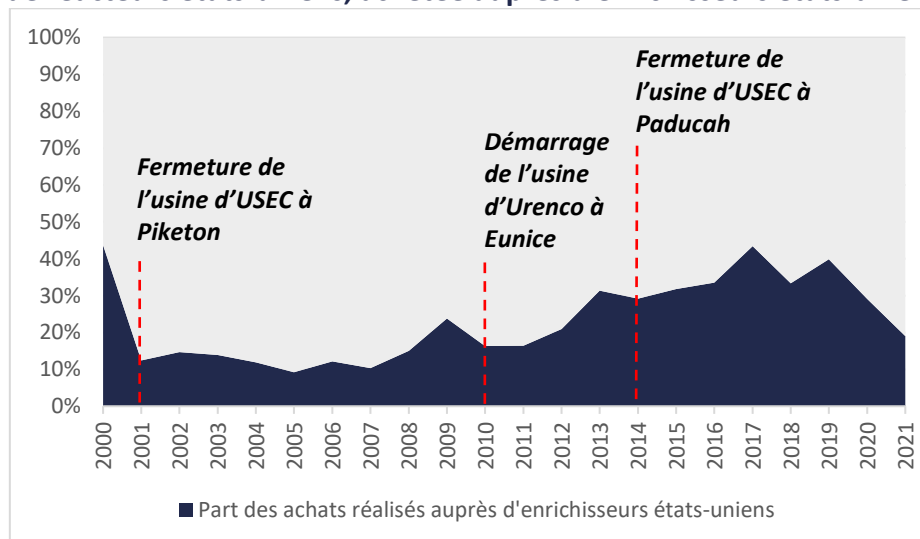
³⁰ Interfax, *Rosatom plans to start commercial mining of uranium in Tanzania in several years*, 22 novembre 2022, <https://interfax.com/newsroom/top-stories/85232/> (consulté le 30 juin 2023).

³¹ The North African Post, *Namibia orders Russian uranium exploration to stop due to environmental concerns*, 2 janvier 2023, <https://northafricapost.com/64030-namibia-orders-russian-uranium-exploration-to-stop-due-to-environmental-concerns.html> (consulté le 30 juin 2023).

³² U. S. Energy Information Administration, *Uranium Marketing Annual Report*, s. d. <https://www.eia.gov/uranium/marketing/table16.php> (consulté le 30 juin 2023).

³³ Le Sénat de l'Illinois a révoqué en avril 2023 le moratoire sur la construction de centrale nucléaire dans l'État en vigueur depuis 1987. Autre exemple, la Commission de l'énergie de Californie a donné l'autorisation de prolongation de la centrale de Diablo Canyon en mars 2023 jusqu'en 2030 alors qu'une fermeture en 2024 était prévue.

Figure 13 : Part de la consommation d'uranium enrichi des exploitants de réacteurs états-uniens, achetée auprès d'enrichisseurs états-uniens



Sources : *Uranium Marketing Annual Report* - Energy Information Administration

Dans les faits, les capacités d'Urenco USA ne sont pas entièrement dédiées au marché intérieur. Ces dix dernières années, la production nationale a représenté entre 16% (en 2010) et 40% (en 2017) des achats d'UTS opérés par les exploitants états-uniens de centrales³⁴. **En 2021, cette proportion s'établissait à 19%, en baisse par rapport aux années précédentes³⁵.** Sur le volet domestique, s'ajoute également le démantèlement de stocks militaires d'HEU américain depuis 2013, pour une valeur d'environ 900 kUTS par an (7,5% des besoins nationaux). Toutefois, ce *downblending* d'HEU devrait s'arrêter en 2025, et aucun autre contrat ne semble avoir été signé depuis.

La base de données des douanes américaines donne un autre aperçu de la provenance de l'uranium enrichi matériellement importé aux États-Unis³⁶. **En 2022, 25,5% de l'uranium enrichi arrivant aux États-Unis provenaient de Russie, 24,5% des Pays-Bas, 23,5% d'Allemagne, 17,5% de Grande-Bretagne et 9% de France³⁷.** La part de la Russie était en baisse par rapport à l'année précédente et relativement dans la fourchette basse des moyennes annuelles de la dernière décennie. Les chiffres encore incomplets de 2023 ne permettent pas d'analyser correctement les tendances. **Toutefois, ils montrent des importations d'uranium enrichi en provenance de Chine, une première depuis 2018.** Ceci est confirmé par la présence de la *China Nuclear Energy Industry Corporation* (CNEIC), filiale d'exportation de CNNC, dans la liste des fournisseurs d'uranium enrichi de l'*US Energy*

³⁴ *Ibid.*

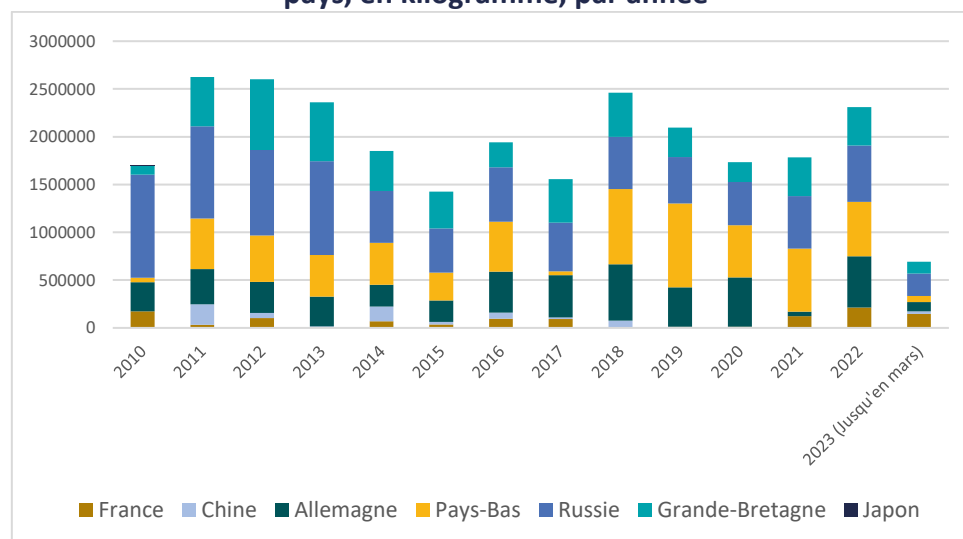
³⁵ Les données de 2022 n'étaient pas encore disponibles au moment de la rédaction du rapport.

³⁶ On a ici utilisé le code HS 284420 du système harmonisé de l'Organisation mondiale des Douanes comprenant l'uranium enrichi en ²³⁵U. D'autres matériaux y sont également regroupés, mais dans des proportions marginales.

³⁷ USITC Dataweb, *U.S. merchandise trade and tariff data*, s. d. <https://dataweb.usitc.gov/> (consulté le 30 juin 2023).

*Information Administration*³⁸. **Attention**, il serait risqué de lier directement ce retour à la guerre en Ukraine. D'abord, car la Russie est toujours est fournisseur important d'uranium enrichi début 2023 pour les États-Unis. Ensuite, car ces livraisons de Chine peuvent traduire des contrats passés avant le déclenchement de la guerre.

Figure 14 : Provenance des importations d'uranium enrichi entrées aux États-Unis par pays, en kilogramme, par année



Source : United States International Trade Commission

La situation états-unienne est la conséquence de la privatisation du secteur de l'enrichissement, de l'évolution contextuelle du marché de l'énergie et de stratégies de lobbying des consommateurs. Dès le début des années 1970, l'administration Nixon envisage la privatisation de l'industrie d'enrichissement issu des programmes d'armement nucléaire, principalement par antiétatisme. Le projet revient au début des années 1990, où il trouve un consensus bipartisan, chez les Républicains comme les Démocrates, alors que la filière nucléaire états-unienne est déjà en difficulté financière. En 1992, l'enrichissement est intégré au sein d'une entreprise, l'*US Enrichment Corp* (USEC) en vue de sa privatisation, qui sera réalisée en 1998. **L'acte inclus alors une provision interdisant le gouvernement états-unien de rentrer comme producteur dans le marché de l'enrichissement, obligeant toute future construction à être opérée par le secteur privé.** Pour rationaliser ses activités, l'USEC ferme en 2001 l'usine de Piketon, représentant 8 300 kUTS, pour se concentrer sur celle de Paducah (11 300 kUTS)³⁹. Mais cette dernière, exploitant la diffusion gazeuse, peine face à la dépréciation des prix sur le marché des UTS et à la concurrence des usines à centrifugation en Europe et en Russie. Les projets de remplacements de l'usine de Paducah par des

³⁸ U. S. Energy Information Administration, *Uranium Marketing Annual Report*, s. d. <https://www.eia.gov/uranium/marketing/table25.php> (consulté le 30 juin 2023).

³⁹ Lance N. Larson, "The Front End of the Nuclear Fuel Cycle: Current Issues," *Congressional Research Service*, 2019, <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R45753> (consulté le 30 juin 2023).

centrifugeuses achoppent face aux manques de liquidité et aux refus de Washington d'accorder des prêts garantis. L'administration donne pourtant ce prêt au français AREVA, dont le carnet de commandes apparaît plus fourni, pour un projet dans l'Idaho qui ne sera finalement pas réalisé faute de rentabilité après la catastrophe de Fukushima. Entre temps, URENCO ouvre son site d'Eunice en 2010. L'USEC survit grâce à des subventions étatiques en nature (fourniture gratuite de *tails*) ou par des commandes pour le secteur militaire. **Malgré cela, elle ferme en mai 2013 son usine de Paducah et fait faillite en 2014.** Les activités sont rassemblées dans une entreprise, *Centrus*, en charge de la commercialisation des UTS achetés en Russie. En 2015, les projets d'usine à centrifugation de *Centrus* sont entièrement abandonnés.

La privatisation n'est pas la seule responsable de cette situation. **Les conséquences commerciales du programme *Megatons to Megawatts* sont mal anticipées.** Il permet l'entrée sur le marché états-unien de volumes conséquents d'UTS russe à très bas prix de 1993 à 2013, constituant en moyenne 50% de la consommation d'enrichissement des exploitants de centrales et creusant le sillon de Rosatom dans le pays.

Les outils réglementaires visant à contrôler la place de la Russie dans le marché américain émergent du lobbying de l'industrie minière uranifère états-unienne. En 1991, l'*Uranium Producers of America*, association rassemblant les producteurs d'uranium naturel du pays, dépose une requête auprès du Département du Commerce afin d'obliger l'instauration de quota d'importation de matières en provenance de Russie au titre des lois antidumping, soutenue par les administrations des principaux états miniers (Utah, Arizona, Nouveau-Mexique, Wyoming). Ce travail mène à l'instauration du ***Russian Suspension Agreement (RSA)* en 1992, amendé et prolongé depuis, qui place des quotas d'importation d'uranium pouvant entrer le marché états-unien.** Le dernier accord, signé en 2020 pour une durée de 20 ans, prévoit de limiter plus fortement la part de la Russie dans l'achat de service d'enrichissement, passant de 24% en 2021 à 15% en 2028, ainsi que des achats d'uranium enrichi, passant de 596t de LEU en 2021 à 332t en 2030⁴⁰.

Au contraire, les exploitants de réacteurs nucléaires américains se sont opposés aux quotas sur les importations de Russie, faisant parfois alliance avec Rosatom. Il en va d'abord de l'*Ad Hoc Utilities Group* (AHUG) qui rassemble 9 des 25 exploitants de centrales aux États-Unis, opérant 50% des réacteurs du pays. **Outre son travail de lobbying politique, l'AHUG a tenté de faire tomber les quotas d'importation de Russie par des voies légales.** Dès 2007, le groupe

⁴⁰ Enforcement and Compliance, International Trade Administration, Department of Commerce, *Uranium From the Russian Federation: Continuation of Suspension of Antidumping Investigation*, 2023, <https://www.federalregister.gov/documents/2023/04/12/2023-07625/uranium-from-the-russian-federation-continuation-of-suspension-of-antidumping-investigation> (consulté le 30 juin 2023).

tente de s'engouffrer dans une faille juridique pour obliger l'administration à n'imposer de quotas que sur les achats effectifs de LEU en Russie et non sur l'achat de service d'enrichissement, considérant que ces derniers ne pouvaient être sujets aux lois antidumping⁴¹. Cette plainte, également portée par Rosatom, sera rejetée par la Cour Suprême en 2009. **Depuis l'organisation centre sa communication sur un discours visant à décrédibiliser l'existence d'une menace russe sur le marché américain de l'uranium.**

L'engagement de l'AHUG doit être interprété au regard de la situation des exploitants de centrales sur le marché de l'énergie aux États-Unis. L'explosion de l'extraction des gaz non conventionnels a provoqué une baisse considérable des cours sur les marchés dérégulés de l'électricité, tirés vers le bas par les opérateurs de centrales à gaz. **Cette situation, responsable partiellement de la fermeture d'une dizaine de réacteurs nucléaires depuis 2010, a rendu leur exploitant plus vulnérable aux variations des coûts de production** et donc aux augmentations du prix de l'enrichissement qui en constituent 5%.

Les travaux de l'administration américaine sur une reconsolidation de sa filière d'enrichissement précèdent la guerre en Ukraine. À nouveau, l'initiative vient des producteurs d'uranium naturel. En 2018, *Energy Fuel Resources* et *UR-Energy*, exploitants des mines en Utah et au Wyoming pétitionne le Département du Commerce (DOC) pour demander l'imposition de nouvelles restrictions sur les importations, et la mise en place d'un quota minimum de 25% d'uranium naturel produit aux États-Unis, au titre du risque posé pour la sécurité nationale⁴². **L'enquête du DOC aboutit dans le sens des deux exploitants, mais le Président Donald Trump rejette ses conclusions.** L'administration organise toutefois un groupe de travail visant à repenser la politique américaine d'approvisionnement en combustibles nucléaires. Cette approche plus large intègre l'enrichissement. Publiée à l'été 2020, la *Strategy to Restore American Nuclear Energy Leadership* priorise toutefois le secteur minier et celui de la conversion avant l'enrichissement⁴³. La principale proposition consiste en l'augmentation de l'*American Assured Fuel Supply* (AAFS), une réserve de LEU pour passer de l'équivalent de 6 recharges de réacteurs à 24 recharges avec une obligation de provenance des États-Unis. **La constitution puis le maintien de ces stocks stratégiques permettraient d'assurer des commandes aux enrichisseurs américains et de leur permettre**

⁴¹ International Trade Administration, *Techsnabexport v. United States*, Cons. Court No. 06-00228, Slip Op. 07-143, 2007, <https://access.trade.gov/Resources/remands/07-143.pdf> (consulté le 30 juin 2023).

⁴² Bureau of Industry and Security, Commerce, *Publication of a Report on the Effect of Imports of Uranium on the National Security: An Investigation Conducted Under Section 232 of the Trade Expansion Act of 1962, as Amended*, 2021, <https://www.federalregister.gov/documents/2021/08/02/2021-16113/publication-of-a-report-on-the-effect-of-imports-of-uranium-on-the-national-security-an> (consulté le 30 juin 2023).

⁴³ Department of Energy, *Strategy to Restore American Nuclear Energy Leadership*, 2020, <https://www.energy.gov/strategy-restore-american-nuclear-energy-leadership> (consulté le 30 juin 2023).

d'envisager des investissements pour augmenter leur capacité. Si le projet ne survit pas à la défaite de Donald Trump en 2020, il est réactivé en 2023 (voir partie 2).

Le renouvellement de l'industrie américaine d'enrichissement pourrait venir de la demande du Département de la Défense (DoD). En dehors de la production d'HEU pour alimenter la propulsion de ses bâtiments, l'armée américaine a besoin de tritium, utilisé dans ses armes nucléaires pour accélérer la fission du plutonium et remplacé tous les cinq ans. Le tritium est produit par l'irradiation de LEU dans le réacteur de Watts Bar opéré par la Tennessee Valley Authority. Les normes de lutte contre la prolifération obligent à ce que le LEU utilisé pour fabriquer du tritium à vocation militaire provienne d'un enrichisseur américain dont l'usine a été entièrement fabriquée par des entreprises américaines. Urenco, n'appartenant pas à un acteur états-unien et utilisant une technologie européenne, ne répond pas à ces critères. Les stocks d'uranium enrichi détenus par le DoD permettent une production de tritium jusqu'en 2041. Cette date pourrait être prolongée à la marge si l'armée américaine décidait de récupérer une partie des inventaires vendus à l'industrie civile. En tout état de cause, **avant cette date, et sauf changement des règles de non-prolifération, une usine d'enrichissement détenue par un acteur américain devra être construite.** Compte tenu des délais d'autorisation et de construction, une décision devra être prise avant 2030. **Centrus, qui possède un laboratoire test à Oak Ridge (Tennessee) s'est déjà positionné et construit actuellement une chaîne d'approvisionnement entièrement états-unienne pour la fabrication de centrifugeuses (voir partie 5).**

4. Urenco, Orano : quels risques pour les enrichisseurs européens ?

Pour Urenco, le principal risque repose sur la structure de son actionnariat et la complexité de sa gouvernance bicéphale. En Europe, Urenco dispose de 13 300 kUTS répartis sur trois sites à Gronau en Allemagne (3 700 kUTS/an), Almelo aux Pays-Bas (5 100 kUTS) et Capenhurst en Grande-Bretagne (4 500 kUTS). Considérant l'état du marché, les capacités ont été coupées de 8% sur les trois sites depuis 2015, en ne remplaçant pas les centrifugeuses hors d'usage. **Depuis le début de la guerre en Ukraine, Urenco revient sur ces baisses et réinstalle des centrifugeuses pour les rattraper⁴⁴.** Toutefois, aucun investissement de capacités supplémentaires n'est envisagé en absence de certitude sur l'évolution du marché.

Toute décision d'augmentation de capacités sera dépendante de la complexe gouvernance d'URENCO. L'entreprise est créée en 1971 par la signature du traité d'Almelo entre les gouvernements néerlandais, ouest-allemand et anglais qui visent à centraliser et

⁴⁴ Urenco, *Annual Report and Accounts 2022*, <https://www.urengo.com/AR/2/> (consulté le 30 juin 2023).

commercialiser le développement de l'enrichissement par centrifugation en Europe tout en limitant le risque de prolifération. Pour ce faire, il introduit une double gouvernance du groupe. À côté d'une structure entrepreneuriale habituelle, l'article II du traité d'Almelo introduit un *Joint Committee* (JC) composé de trois représentants des gouvernements signataires. **La division des responsabilités entre ces deux organes est sujette à interprétation, entraînant des conflits de compétences.** Théoriquement, le JC a la décision finale sur toutes les évolutions stratégiques de l'entreprise, les grands investissements, et en particulier les éventuels agrandissements de capacités, mais aussi sur la nature des clients, au titre de la lutte contre la prolifération. **Mais, les décisions du JC doivent être prises à l'unanimité des trois membres, or l'engagement de la partie allemande est chargé d'incertitude.** Les lois de sortie du nucléaire de 2000 et de 2011 n'intègrent pas l'usine d'enrichissement allemande de Gronau qui dispose d'une licence d'exploitation sans date de fin. Mais dans sa feuille de route en 12 points pour achever la sortie du nucléaire publié en 2021, le ministère allemand de l'Environnement (BMU) annonce « qu'il est de son opinion que la sortie du nucléaire n'est pas compatible avec la production de combustible » et qu'il est « en conséquence en train de travailler pour la fermeture de ces usines, qu'il souhaite implémenter dans la prochaine législature »⁴⁵. Depuis, l'usine de Gronau est au cœur de débats et de tractations politiques dont l'issue reste incertaine⁴⁶.

Les incertitudes pèsent également sur l'actionnariat de l'entreprise. Urenco est détenu à parts égales entre le gouvernement britannique, le gouvernement néerlandais et une structure allemande rassemblant les énergéticiens RWE et E.On. Après la décision de sortie du nucléaire en 2011 à Berlin, les deux groupes allemands, qui opéraient des réacteurs, annoncent vouloir se désengager et vendre leur part dans Urenco. Les Anglais, qui avaient déjà envisagé une vente pour dégager des liquidités, leur emboîtent le pas. Ce sont les conditions posées par le gouvernement hollandais qui stoppent ces projets. La Haye demande que ces parts ne soient pas vendues en bourse afin de garder une visibilité et un contrôle sur l'actionnariat, invoquant des enjeux de prolifération. Il insistera également pour que la vente des parts soit réservée à des acheteurs publics et européens. Car outre les capacités d'enrichissement, la vente d'Urenco inclut sa participation de 50% dans l'entreprise ETC de fabrication et d'assemblage de centrifugeuses (voir partie 5). Le traité d'Almelo nécessitant un consensus entre les trois gouvernements membre du JC, la vente n'a pas été conclue. RWE

⁴⁵ Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, *12-point plan to complete the nuclear phase-out – the position of the Federal Environment Ministry*, 2021, https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Nukleare_Sicherheit/12_punkte_atomausstieg_en_bf.pdf (consulté le 30 juin 2023).

⁴⁶ Westfälische Nachrichten, *Urananreicherungsanlage erneut Thema in Landtagsausschuss*, 17 mars 2021, <https://www.wn.de/muensterland/kreis-borken/gronau/urananreicherungsanlage-erneut-thema-in-landtagsausschuss-1012665> (consulté le 30 juin 2023).

et E.On envisagent toutefois toujours de se séparer de leurs actions. Les deux groupes considèrent que le nucléaire ne constitue plus leur cœur de métier.

Orano est le seul enrichisseur à envisager une augmentation conséquente de ses capacités.

L'usine Georges-Besse II du Tricastin a une capacité de 7500 kUTS/an. 5% de l'usine appartiennent à deux consortiums d'électriciens japonais et sud-coréens, à parts égales. En comptant les sites d'URENCO, **la capacité européenne est donc de 20 800 kUTS/an, soit près du double de ce que les pays d'Union européenne ont utilisé en 2021 pour leur parc nucléaire (10 290 kUTS)**, et 75% des besoins des pays de l'OCDE. Considérant une consommation annuelle d'entre 5 500 et 6 200 kUTS du parc nucléaire français, Georges-Besse II est déjà capable de couvrir 120% des besoins du pays. Dans les faits, la stratégie de diversification d'EDF l'amène à multiplier les chemins d'approvisionnement pour son combustible, et donc les enrichisseurs. La France ne représente que 37% des ventes, contre environ 27% pour les États-Unis, 26% pour le Japon et la Corée du Sud et 10% pour l'Europe, avec une part marginale pour les Émirats arabes unis.

Orano a commencé en 2023 les travaux préparatoires pour étudier la faisabilité économique d'une augmentation de 30% de ses capacités au Tricastin, passant à 11 000 kUTS par an. Cette hausse couvrirait largement les possibles futures constructions de 6 EPR en France (+1 000 kUTS/an) ou de 14 (+2 300 kUTS/an) envisagées par le plan de relance du nucléaire d'ici 2050. Ces investissements sont motivés par l'augmentation des cours de l'UTS au-dessus de 60\$, un niveau permettant d'envisager des investissements, ainsi que par les projections de nouvelles constructions de réacteurs. Il l'est aussi, selon Orano, par des signaux provenant d'électriciens états-uniens qui souhaiteraient se désengager des importations d'UTS russe⁴⁷. L'entreprise évalue entre 5 000 et 8 000 kUTS/an de demandes supplémentaires entraînées par une éventuelle stratégie de substitution des importations russes dans les pays de l'OCDE ainsi que par une redirection des exportations russes vers la Chine. **Au plus tôt, Orano prendra sa décision à l'été 2023 sur la faisabilité du projet estimé à une fourchette située entre 1,3 et 1,7 milliard d'euros.** Premièrement, le groupe considère que les stocks d'uranium enrichi présents chez les électriciens, évalués entre 1,5 et 4 ans de leur consommation, laissent du temps pour la réflexion. Deuxièmement, **Orano attend d'avoir une visibilité à long terme sur son carnet de commandes avant d'investir.** Considérant sa stratégie de diversification, EDF seule ne peut absorber ces nouvelles capacités. Autre problème, le carnet d'achat des exploitants européens de réacteur nucléaire est déjà bien rempli. Le taux de couverture, c'est-à-dire le pourcentage de la demande en UTS d'une année déjà couverte pour un contrat d'approvisionnement, est d'au minimum 71% pour les pays de l'UE en 2030⁴⁸. Orano attend (soit ?) l'institution de quotas en UE sur le modèle du RSA états-unien, soit la signature de commandes fermes à long terme avec des électriciens, dont certains pourraient prendre la forme de contrat avec acompte pour financer la construction. Dans la situation

⁴⁷ Orano, Projet extension GB2 », <https://www.orano.group/projetextensiongb2/fr/le-projet>.

⁴⁸ Euratom Supply Agency, « Annual Report 2021 », <https://euratom-supply.ec.europa.eu/system/files/2022-12/Euratom%20Supply%20Agency%20-%20Annual%20report%202021%20-%20Corrected%20edition.pdf>

la plus optimiste, cette nouvelle tranche n'entrerait en fonction qu'en 2028 pour atteindre une pleine puissance en 2030 (voir annexe 10).

5. En Chine, des divisions internes qui limitent la conquête des marchés internationaux

La stratégie du gouvernement chinois vise d'abord à l'autonomie pour satisfaire ses propres besoins en enrichissement. L'évaluation des capacités est limitée par la faible fiabilité des informations de Pékin et la difficulté à qualifier la nature militaire ou civile des usines. L'enrichissement chinois repose sur l'indigénisation de technologies russes importées en 1993. **On estime les capacités chinoises en 2020 à approximativement 7 800 kUTS/an**, réparties principalement sur trois sites dans le centre du pays à Lanzhou dans le Gansu (2 600 kUTS), Hanzhong dans le Shaanxi (2 710 kUTS), Emeishan dans le Sichuan (2 450 kUTS)⁴⁹. Une dernière usine à diffusion gazeuse à Heping dans le Sichuan (250kUTS) est probablement à l'arrêt depuis 2019. **Ces capacités permettent déjà de couvrir les besoins actuels du parc nucléaire chinois, évalués à environ 7 500 kUTS**, laissant un surplus possible pour l'export. Ces derniers sont augmentés par les contrats d'approvisionnement en combustibles signés avec l'achat de réacteurs étrangers qui viennent libérer des capacités pour les marchés extérieurs. Framatome fournira 17 recharges pour les deux EPR de Taishan entrés en fonction en 2019, soit une quinzaine d'années de consommation. Rosatom est responsable jusqu'en 2025 du LEU des réacteurs 3 et 4 de Tianwan. Enfin, Urenco fournit un tiers des besoins des deux réacteurs de Daya Bay.

Des doutes persistent sur la capacité de la Chine à maintenir cette autonomie selon les scénarii d'extension du parc nucléaire. En juin 2023, 21 réacteurs étaient en construction, **portant les besoins à 11 200 kUTS/an en 2030**. De nouvelles capacités devraient être nécessaires dès 2025. La suite est plus spéculative, dépendant du nombre de réacteurs mis en construction dans les prochaines dix années, et fluctuent entre un scénario haut à 29 000 kUTS/an en 2040, un médian à 24 000 kUTS/an et un bas à 17 000 kUTS/an. **Quoi qu'il arrive, les capacités actuelles ne répondront ni aux besoins des réacteurs actuellement en construction ni aux scénarios conservateurs d'extension sur vingt ans.**

⁴⁹ 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.

De plus, **les projets d'extensions sont limités**⁵⁰. Techniquement, l'industrie chinoise est capable de fabriquer assez de centrifugeuses pour ajouter 1 000 à 1 500 kUTS chaque année aux capacités. Mais les lieux pour les implanter manquent. L'effort est actuellement porté sur l'augmentation de 1 400 kUTS sur chacun des trois sites existants, soit un total de 4 200 kUTS d'ici à 2025. La construction d'un nouveau site de fabrication du combustible, dont une usine d'enrichissement de 7000 kUTS à Heshan dans le Guangdong a été annulée en 2013 suite à des manifestations environnementales. Dans l'attente, le projet a été déplacé dans le nord du pays, à Cangzhou dans la province du Hebei. Mais si des travaux préparatoires ont été entamés en 2017, il ne semble pas avoir été menés à bout. Deux explications sont possibles. Premièrement, Pékin privilégie un site côtier au sud du pays pour diminuer les coûts de transports de l'uranium provenant de Namibie. Deuxièmement, le gouvernement chinois pourrait anticiper des changements dans la gouvernance du nucléaire qui laisserait plus de latitude aux exploitants de réacteurs pour se fournir à l'étranger.

En effet, **les divisions internes de l'industrie nucléaire chinoise fragilisent la stratégie d'autonomie**⁵¹. CNNC détient le monopole sur l'enrichissement de l'uranium en Chine et sa commercialisation auprès des exploitants de réacteurs. Or, cette situation est contestée par la *China General Nuclear Power Corporation* (CGN), deuxième groupe nucléaire chinois, qui exploite 27 des 55 réacteurs du pays. Premièrement, **CGN souhaite rompre le monopole et s'alimenter en uranium enrichi en dehors du pays**, d'autant qu'elle opère déjà des réacteurs de technologies étrangères dont les combustibles sont partiellement importés. Ces velléités sont accentuées par les termes des contrats signés par CGN avec les deux filiales de CNNC pour l'enrichissement et la commercialisation de l'enrichissement (*China Nuclear Fuel Corporation* -CNFC- et *China Nuclear Energy Industry Corporation* -CNEIC) en 2011 avec des prix plus élevés que ceux du marché actuel. Deuxièmement, en 2021, le groupe a inauguré une usine d'assemblage de combustibles à Ulba au Kazakhstan, en *joint-venture* avec Kazatomprom, pour lesquelles il pourra s'approvisionner en uranium enrichi en dehors de la Chine. Alors que CGN augmente ses participations dans des mines d'uranium en Namibie et au Kazakhstan, le **groupe souhaite être actif sur l'ensemble de la chaîne de fabrication du combustible**. Pour résoudre ces tensions, le gouvernement chinois souhaitait joindre CGN et CNNC au projet de construction de l'usine du Guangdong. CNNC a toutefois profité de l'arrêt de ce projet pour s'éloigner de CGN. Pékin envisage toujours une réforme de CNFC pour

⁵⁰ Energy Intelligence, *China: CNNC Faces Fuel Cycles Challenges*, 8 août 2017, <https://www.energyintel.com/0000017b-a7d2-de4c-a17b-e7d28cbd0000> (consulté le 30 juin 2023).

⁵¹ Nuclear Engineering International, *CNNC and CGN sign fuel contracts and pledge greater co-operation*, 25 février 2021, <https://www.neimagazine.com/news/newscnnc-and-cgn-sign-fuel-contracts-and-pledge-greater-co-operation-8547818> (consulté le 30 juin 2023).

l'ouvrir aux autres industriels de la filière nucléaire, dont CGN et son troisième concurrent, State Power Investment (SPIC).

En conséquence, **si le gouvernement chinois encourage depuis 2013 ces entreprises à conquérir des marchés internationaux, cette politique sera contrainte par la diminution des surplus de production** en absence d'installation de nouvelles capacités. En 2014, CNNC s'attache les services d'un *broker* new-yorkais pour entrer dans le marché états-unien. Ces ventes permettent à Pékin de construire son image de partenaire fiable et de s'adapter aux normes et demandes des acteurs américains. L'entreprise a suivi la même stratégie dans l'UE ainsi qu'en Corée du Sud. Comme pour la Russie, la Chine fait de la fourniture de combustible un des éléments de la vente de ces réacteurs nucléaires à l'étranger. Pour le moment, son seul client est le Pakistan pour lequel CNNC fournit l'enrichissement des quatre réacteurs de Chashma et des deux de Karachi. Si Pékin espérait s'appuyer sur sa stratégie des nouvelles routes de la Soie (*One Belt, One Road*) pour exporter des centrales, principalement en Afrique, cette politique ne se concrétise pas. La vente d'un réacteur Hualong One à l'Argentine, signé début 2022, achoppe d'ailleurs actuellement sur le sujet du combustible, Buenos Aires souhaitant pouvoir les assembler sur place pour développer sa propre industrie nucléaire⁵². Enfin, **dans le cas où les pays de l'OCDE décideraient de diminuer l'achat d'enrichissement russe, la Chine pourrait acheter le LEU russe à tarif plus bas pour ensuite revendre une partie de sa production sur les marchés internationaux.**

Si la Chine, les États-Unis et l'Europe, avec Urenco et Orano, dominent les dynamiques de marché, d'autres acteurs, quoique limités, occupent une place non négligeable dans la redéfinition des capacités d'enrichissement dans le monde (voir annexe 12).

⁵² Jonathan Tirone, "Argentina Pauses Nuclear Deal with China over Fuel Sourcing for Power Plant," *Bloomberg Línea*, 19 septembre 2022, <https://www.bloomberglinea.com/english/argentina-pauses-nuclear-deal-with-china-over-fuel-sourcing-for-power-plant/> (consulté le 30 juin 2023).

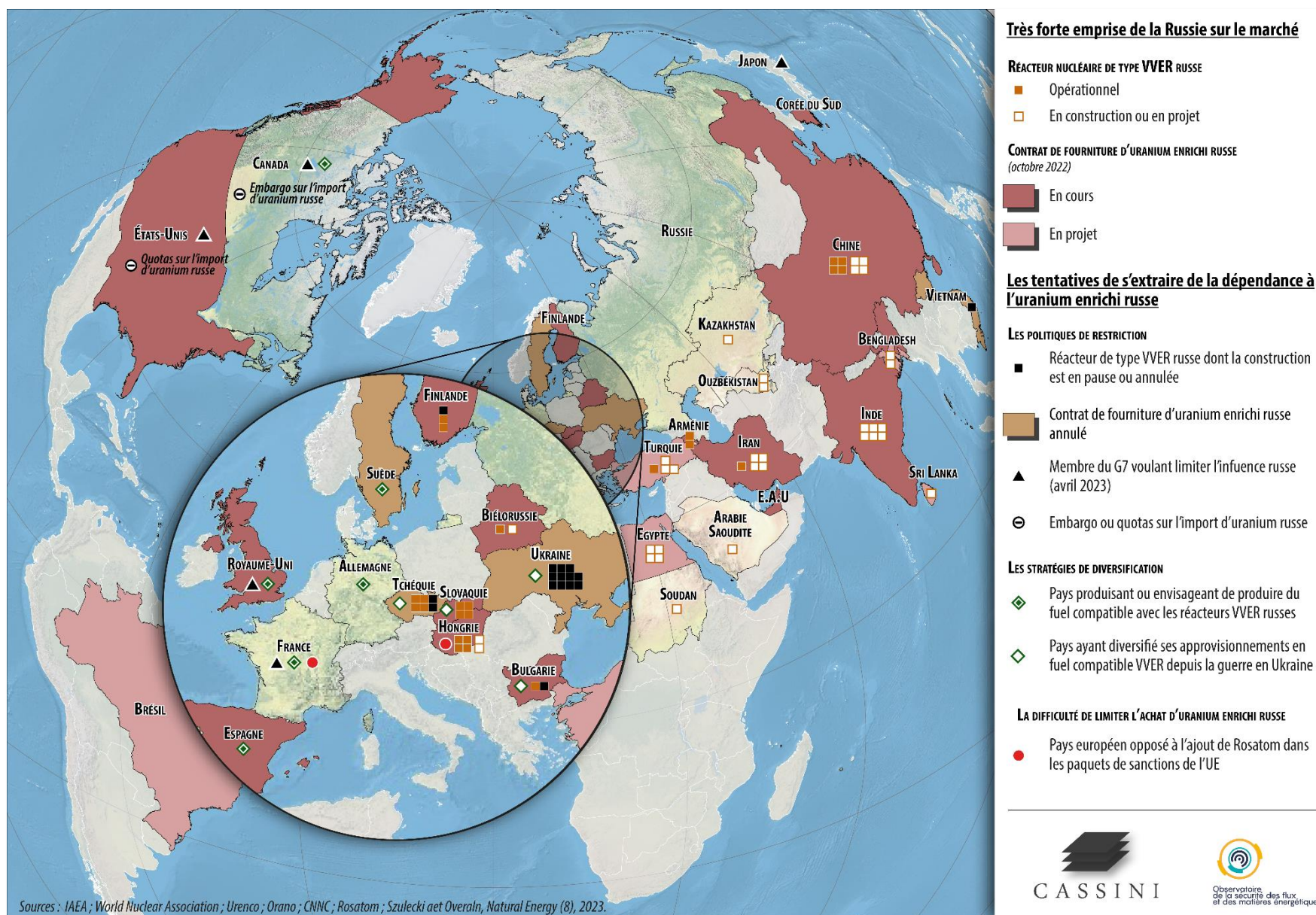


QUELS CHANGEMENTS LA GUERRE EN UKRAINE CAUSE-T-ELLE ?

À RETENIR

- En raison de la structure du marché de l'enrichissement, le Kremlin n'est pas en position d'utiliser ses exportations d'uranium enrichi de manière coercitive.
- Au 1^{er} juillet 2023, aucune sanction ne ciblait les filiales de production et d'exportation de combustibles nucléaires de Rosatom.
- Washington dispose depuis le début des années 1990 d'un appareil législatif limitant les importations d'uranium enrichi russe à environ ¼ des besoins du pays.
- Les tentatives d'embargo complet aux États-Unis sur les importations russes sont freinées par des divisions entre Démocrates et Républicains, mais aussi par le manque d'investissement de certains exploitants de réacteurs nucléaires craignant pour leur rentabilité.
- Washington essaie de relancer son industrie d'enrichissement en finançant la constitution de réserves stratégiques d'uranium enrichi ainsi qu'en reconstituant une diplomatie nucléaire devant dynamiser les exportations de combustibles.
- Avec l'Agence d'approvisionnement du traité d'Euratom, l'Union européenne dispose déjà des outils réglementaires permettant de contenir la place de la Russie dans son marché interne. Mais les divisions entre pays membres ont toujours limité son emploi.
- Parmi les pays européens qui exploitent des réacteurs de types soviétiques, seule la Hongrie n'a pas engagé de stratégie de diversification de ses approvisionnements pour s'éloigner de la Russie depuis le début de la guerre en Ukraine.
- La Russie a anticipé depuis 2014 les conséquences d'éventuelles sanctions et assuré d'autres débouchés pour son uranium enrichi.

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



1. Une difficile évaluation de la capacité d'utilisation coercitive de l'uranium enrichi par la Russie

La guerre en Ukraine entraîne une médiatisation forte de la place prise par la Russie dans le marché de l'énergie nucléaire et, *a fortiori*, de l'enrichissement de l'uranium. Celle-ci n'est pourtant pas plus importante qu'en 2014 au moment de l'annexion de la Crimée par Moscou. Dans la sphère médiatique comme politique, on craint une utilisation coercitive par le Kremlin de ce poids, transposant au nucléaire les expériences passées du gaz. L'incapacité pour le moment à appliquer des sanctions à la production de combustibles de Rosatom ou de décider d'un embargo est brandie comme le témoignage d'une dépendance. **Concrètement, la capacité de la Russie à utiliser de manière coercitive sa domination dans l'enrichissement reste limitée.**

Les travaux de Karen Smith Stegen identifient 5 conditions pour qu'un flux de matières énergétiques puisse être utilisé de manière coercitive par un État producteur⁵³ : (1) la réalité du contrôle exercé par le secteur politique sur les entreprises afin de les utiliser pour atteindre son but ; (2) le contrôle par l'État des moyens de transit et de transport pour couper l'approvisionnement et empêcher sa redirection ; (3) la vulnérabilité des pays ciblés face à la rupture de l'approvisionnement ; (4) la capacité de manipulation des prix du marché ; (5) la dépendance du pays producteur aux exportations.

Contrôle du secteur politique : risque fort

Si l'utilisation politique des exportations nucléaires par la Russie comme outil de projection de pouvoir fait consensus chez les chercheurs⁵⁴, ce n'est pas le cas de la nature concrète des déterminants de la stratégie de Rosatom et de ses relations avec le Kremlin. Pour Minin et Vlcek⁵⁵, Rosatom dispose de marges de manœuvre vis-à-vis du pouvoir politique qui lui permettent de prioriser des objectifs commerciaux. D'un côté, le groupe a **un degré d'autonomie plus important** que les autres entreprises d'État, au titre du droit fédéral qui empêche les gouvernements locaux, mais aussi les ministères et agences gouvernementales d'interférer avec ses activités. Les décisions stratégiques restent toutefois du ressort direct du Kremlin. De l'autre, **l'entreprise gagne en autonomie financière** grâce aux revenus de ses contrats à l'étranger qui réduisent fortement le poids des subventions étatiques, diminuant la

⁵³ Karen Smith Stegen, "Deconstructing the "energy weapon": Russia's threat to Europe as case study," *Energy Policy*, 39, no. 10 (2011): 6505.

⁵⁴ 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.

⁵⁵ Nikita Minin et Tomáš Vlček, "Determinants and considerations of Rosatom's external strategy," *Energy Strategy Reviews*, 17 (2017): 37.

dépendance structurelle. Concrètement, Rosatom est de plus en plus capable d'orienter sa stratégie selon ses propres intérêts commerciaux, mais reste sujette aux orientations du Kremlin et organiquement liée à lui.

Contrôle des moyens de transit : risque faible

Pour Smith Stegen⁵⁶, l'utilisation coercitive d'une ressource par un pays dépend de la fluidité intrinsèque du marché, le contrôle concret des moyens de transport et la capacité à empêcher la redirection des flux. L'UF₆ enrichi en ²³⁵U est une commodité standardisée et fongible. Rien n'empêche techniquement un fabricant de combustible nucléaire de se fournir chez un autre enrichisseur. De plus, l'UF₆ ne s'échange pas par des infrastructures fixes – comme un gazoduc –, mais via voie ferrée ou maritime. Bien qu'ils doivent passer par des transporteurs et des ports homologués pour la manutention de matières radioactives (voir partie 3), **cette fluidité permet de rediriger les flux**. Concrètement, **la Russie n'a aucune capacité de blocage des flux d'UF₆ en provenance d'enrichisseurs européens, nord-américains ou chinois vers des exploitants de réacteurs nucléaires**, car aucun de ces flux ne passe par son territoire⁵⁷. Enfin, **la Russie n'a aucune capacité d'influence sur les entreprises du transport d'UF₆ qui lui permettrait de couper ces flux**, considérant la standardisation de la chaîne logistique pour l'uranium enrichi et la multitude des transporteurs disponibles.

Vulnérabilité des pays ciblés face à la rupture d'approvisionnement : risque faible

La capacité de coercition d'un exportateur d'UF₆ enrichi est facteur de la vulnérabilité du pays ciblé à la disruption des flux. Celle-ci repose sur la part de l'exportateur dans la consommation d'UF₆, la part du nucléaire dans le mix énergétique du pays, l'existence de stock permettant d'amortir l'arrêt des approvisionnements et l'existence d'alternative à la fourniture.

L'importante densité énergétique de l'uranium enrichi permet aux exploitants de réacteurs de constituer des stocks stratégiques amortissant toutes ruptures d'approvisionnement. **En moyenne, les énergéticiens européens disposent d'entre 2 à 3 ans d'inventaire de combustibles assemblés pour leur propre consommation**⁵⁸. Si les pratiques changent d'un pays à l'autre, tous les exploitants disposent d'au moins une recharge de réacteurs. Depuis 2017, ces stocks ont eu tendance à décroître, passant d'environ 49 000 tonnes d'équivalent d'uranium naturel à 42 000 en 2020. La répartition de ces inventaires entre uranium naturel

⁵⁶ Karen Smith Stegen, "Deconstructing the "energy weapon": Russia's threat to Europe as case study," *Energy Policy*, 39, no. 10 (2011): 6505.

⁵⁷ À l'inverse des flux d'uranium naturel d'Asie centrale, dont une partie transit par la Russie grâce à des entreprises russes.

⁵⁸ 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).

et uranium enrichi reste toutefois confidentielle en Europe. Cette tendance s'est inversée au début de la guerre. Côté américain, les exploitants ont historiquement conservé des inventaires plus restreints qu'en Europe. En 2022, chacun d'entre eux disposait en moyenne de 16 mois de consommation en stock⁵⁹. Parallèlement, l'administration a constitué depuis 2011 une réserve, l'*American Assured Fuel Supply*, comprenant 290 tonnes de LEU disponibles pour ses énergéticiens en cas de rupture d'approvisionnement, l'équivalent de six recharges complètes d'un réacteur (voir annexe 11). **À court terme, la sensibilité des exploitants à une décision unilatérale de la Russie d'interrompre ses apports en uranium enrichi est faible**, sauf si cette rupture devait durer plus d'un an. En dernier recourt, ce délai pourrait être allongé en baissant la puissance des réacteurs pour moins consommer de combustible.

La vulnérabilité d'un pays dépend de la part de l'approvisionnement en uranium enrichi en provenance de la Russie et du poids du nucléaire dans son mix électrique. Pour la première variable, il n'existe pas de données désagrégées à l'échelle de tous les pays. Pour les États-Unis, on sait que Rosatom fournit environ un quart des besoins (voir partie 1). En Corée du Sud, un tiers des besoins des 10 réacteurs de conception américaine provient de Russie, soit environ 10% de la demande en enrichissement. En Suisse, c'est plus de 44% des besoins qui proviennent de Rosatom⁶⁰. Dans l'UE, ce chiffre est porté à environ 31%, mais le secret des affaires empêche de connaître la part exacte par pays. L'ensemble des pays nucléarisés de l'UE ont eu recours à de l'enrichissement russe durant les cinq années précédant la guerre en Ukraine. Individuellement, les pays européens sont dans trois situations.

- Un premier groupe, rassemblant la France, l'Espagne, les Pays-Bas, la Slovénie, la Suède et la Belgique, profite de stratégies de diversification des approvisionnements implémentées de longue date qui les mettent en sécurité face à la Russie.
- Un deuxième groupe, en Europe centrale, constituée de la République tchèque, de la Bulgarie et de la Slovaquie, s'est historiquement approvisionné en Russie pour alimenter ses réacteurs de technologie soviétique (VVER), mais s'est engagé dans la diversification après le début de la guerre en Ukraine. Pour ces pays, la vulnérabilité dépendra de la faisabilité à court terme de la diversification. Celle-ci repose sur la capacité des ingénieristes européens à fournir des combustibles pour VVER en volume nécessaire. Si les chaînes de production pour les modèles VVER-1000 sont robustes, celle des VVER-440 présents en Slovaquie, Bulgarie et République tchèque est moins certaines de pouvoir absorber rapidement une hausse de la demande.

⁵⁹ U. S. Energy Information Administration, *Uranium Marketing Annual Report*, s. d. <https://www.eia.gov/uranium/marketing/table22.php> (consulté le 30 juin 2023).

⁶⁰ Swissinfo.ch, *Use of Russian uranium for Swiss nuclear power under scrutiny*, 31 mars 2022, <https://www.swissinfo.ch/eng/business/use-of-russian-uranium-for-swiss-nuclear-power-under-scrutiny/47479722> (consulté le 30 juin 2023).

- Finalement, deux pays sont plus problématiques. D'un côté la Hongrie, dont l'approvisionnement repose entièrement sur la Russie et qui ne montre pas de volonté de diversification. De l'autre la Finlande dont les deux réacteurs de Loviisa sont encore alimentés entièrement par la Russie. Pour les deux derniers groupes, la vulnérabilité est d'autant plus forte que le nucléaire constitue une part non négligeable du mix énergétique : 60% en Slovaquie, 47% en Hongrie, 36% en République tchèque et 32% en Bulgarie (32%). Pour la Finlande, la centrale de Loviisa représente moins de 8% du mix, diminuant fortement la vulnérabilité du pays.

Capacité d'action sur le prix des marchés : Risque modéré

L'utilisation coercitive des exportations de matières énergétiques est fonction de la capacité de l'exportateur à jouer sur le prix de la commodité pour sanctionner ou récompenser un pays et orienter sa politique. Ici, à nouveau, difficile d'avoir une visibilité précise sur ces données protégées par le secret des affaires. Globalement, Rosatom n'a pas besoin de jouer artificiellement sur le prix de vente de ses UTS puisqu'elle bénéficie déjà du coût de production le plus faible de tous les enrichisseurs et que ses surcapacités ont participé à tirer vers le bas les cours du marché global. Qui plus est, la part de l'enrichissement reste faible dans le coût de production du kWh nucléaire. Toutefois, comme discuté pour les États-Unis, la vulnérabilité est d'autant plus forte que le marché de l'électricité dans lequel évoluent les exploitants de réacteurs nucléaires est tendu et qu'une augmentation même marginale des coûts de production est perçue comme dangereuse pour ces derniers.

Dépendance du pays producteur aux exportations : Risque fort

Selon Smith Stegen, l'utilisation coercitive d'une exportation est d'autant moins probable que le producteur est dépendant de ces dernières. Ici, on perçoit une des limites fondamentales des capacités de Rosatom. Premièrement, Rosatom est financièrement dépendante des exportations, alors que les projets en interne sont limités. L'entreprise envisage d'atteindre 70% de ses revenus provenant de l'étranger d'ici à 2030. Le total des contrats de Rosatom en dehors de la Russie sur les 10 prochaines années s'élève à 139,9 milliards de dollars, dont un quart provient de contrats d'approvisionnement en service de combustible. Deuxièmement, Rosatom mobilise ses exportations de combustible comme outil de *Soft Power*. Depuis le début de la guerre en Ukraine, la communication de l'entreprise a continuellement appuyé un discours présentant Rosatom comme un acteur mu uniquement par des intérêts commerciaux et détachées de la politique, à l'inverse des Européens et des Nord-Américains. À ce titre, Rosatom a mis en scène et médiatisé les envois de combustibles nucléaires par avion vers

l'Europe centrale depuis début 2022⁶¹. Ce narratif vise à construire l'image d'un partenaire fiable et est d'abord destiné aux pays d'Afrique, du Moyen-Orient et d'Asie qui envisageaient de se nucléariser afin de les assurer d'un découplage entre approvisionnement et décision politique. **Une décision unilatérale de rompre la fourniture en uranium enrichi des clients actuels mettrait fortement à mal cette stratégie.**

2. Aux États-Unis, inciter l'investissement dans de nouvelles capacités en interdisant les importations de Russie

Au 1^{er} juin 2023, les entités russes en charge de la production, de la commercialisation ou du transport de combustibles nucléaires étaient toujours épargnées par les sanctions de l'*Office of Foreign Assets Control* du département du trésor contre l'industrie énergétique russe. Une première salve de sanctions contre des filiales de Rosatom a été prise en avril 2023 contre des ingénieristes actifs dans la production d'éléments pour réacteurs (*M.V. Protsenko Start Production Association*) et dans le démantèlement (*JSC NIKIMIT*) ainsi que contre *Rusatom Overseas*, la filiale en charge de la promotion et de la vente de réacteurs nucléaires à l'étranger. **Washington a ciblé indirectement la capacité d'enrichissement russe en sanctionnant deux entreprises (KMZ et Vladimir Tochmash JSC) participant à la production de centrifugeuses.** Ces sanctions pourraient avoir un effet si elles empêchaient Rosatom de se fournir en matériaux à l'étranger pour remplacer des centrifugeuses défectueuses, ce qui n'est probablement pas le cas, considérant l'autonomie de la filière en interne. Les dernières sanctions annoncées mi-mai 2023 évitent toujours le combustible et ciblent les filiales de Rosatom spécialisées dans le transport maritime.

Depuis le début de la guerre en Ukraine, Washington tente de relancer l'industrie états-unienne de l'enrichissement de quatre manières :

- **En interdisant totalement l'importation de LEU de Russie.** En février 2023, un groupe d'élus républicains et démocrates ont introduit au congrès deux textes identiques visant à prohiber entièrement l'importation de LEU russe (le *Reduce Russian Uranium Imports Act*⁶² au Sénat et le *Prohibiting Russian Uranium Imports Act* à la Chambre des représentants⁶³). Ces textes ont porté des possibilités d'exemption jusqu'en 2028, pour un maximum de 459 tonnes de LEU russe importées par an, soit l'équivalent de la consommation annuelle de

⁶¹ 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).

⁶² U.S. Congress, *Reduce Russian Uranium Imports Act*. Porté par Sen. John Barrasso, S.763, 118th Cong., 1st sess. 9 mars 2023. <https://library.bowdoin.edu/research/chicago-gov.pdf> (consulté le 30 juin 2023).

⁶³ U.S. Congress, *Prohibiting Russian Uranium Imports Act*. Porté par Rep. Cathy McMorris Rodgers, H. R. 1042, 118th Cong., 1st sess. 24 mai 2023. <https://www.congress.gov/bill/118th-congress/house-bill/1042/text> (consulté le 30 juin 2023).

30 réacteurs. Concrètement, ces exemptions permettent de continuer jusqu'en 2028 les importations au niveau actuel. **Ce texte visait à envoyer des signaux aux marchés sur la nécessité d'investir rapidement dans de nouvelles capacités d'enrichissement ainsi qu'un calendrier d'exécution.** À la Chambre des Représentants, ce texte a été voté dans les comités traitants des affaires énergétiques où **les Démocrates se sont exprimées contre, réclamant que ce texte introduise un financement direct par l'administration centrale de capacités d'enrichissement**, ce que les Républicains refusent. De plus, **une partie des démocrates reste opposée à l'énergie nucléaire et votera contre le texte par principe.** Soumis à la Chambre, ce texte devrait être voté favorablement par la majorité Républicaine. La proposition de loi n'a pas encore avancé dans sa procédure au Sénat où les Démocrates sont majoritaires. Ayant besoin de la validation par les deux chambres, ce texte a peu de chance d'aboutir dans sa forme actuelle.

- **En augmentant la réserve stratégique d'uranium enrichi.** Un deuxième texte de loi, le *Nuclear Fuel Security Act*⁶⁴, introduit à la Chambre des Représentants en février 2023 propose de renforcer l'*American Assured Fuel Supply Program* en achetant 100 tonnes de LEU par an jusqu'à début 2027 en ne contractualisant que des fournisseurs d'uranium naturel, de services de conversion et d'enrichissement états-unis. L'objectif est autant d'assurer concrètement des contrats pour ces acteurs que d'envoyer des signaux aux marchés sur le besoin en capacités d'enrichissement national. Anticipant les oppositions de certains exploitants de réacteurs, ce texte conditionne l'augmentation de la réserve à l'absence d'influence sur le coût d'opération des réacteurs états-unis. Début juin 2023, ce texte n'avait pas encore été soumis aux votes des deux chambres.
- **En octroyant des facilités de financement pour l'exploitation de centrales nucléaires s'engageant à utiliser de l'uranium américain.** Le *Civil Nuclear Credit Program*⁶⁵ introduit un mécanisme de prêt pour les exploitants de réacteurs nucléaires en difficultés économiques afin de limiter les fermetures de centrales. Si ce n'est pas une condition obligatoire, le texte requiert que ces prêts soient donnés en priorité aux centrales utilisant de l'uranium produit, converti et enrichi aux États-Unis.
- **En construisant les outils d'une diplomatie nucléaire dédiée à gagner des contrats à l'étranger.** L'introduction début 2022 de l'*International Nuclear Energy Act*⁶⁶ par des sénateurs républicains et démocrates visent à créer un *Executive office* auprès du

⁶⁴ 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).

⁶⁵ Grid Employment Office, *Civil Nuclear Credit Program*, s. d. <https://www.energy.gov/gdo/civil-nuclear-credit-program> (consulté le 30 juin 2023).

⁶⁶ 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).

président pour engager des négociations avec les pays de l'OCDE afin d'établir une stratégie d'exportation visant à affaiblir les industries nucléaires russe et chinoise. L'objectif est à nouveau de donner un signal aux marchés sur l'arrivée future de nouveaux contrats d'enrichissement pour des acteurs nord-américains.

Si ces propositions s'affichent comme bipartisanes, deux risques politiques pèsent sur leur réalisation. Premièrement, **les Démocrates restent divisés en interne sur l'expansion du nucléaire**. Tandis que l'aile représentée par Joe Biden y est favorable, ce n'est pas le cas de celle la plus à gauche du parti. Deuxièmement, **des tensions persistent entre Démocrates et Républicains sur le degré d'implication de l'État dans cette industrie**. Les démocrates souhaitent un financement direct de l'administration. Jenniffer Granholm, secrétaire du DoE, a envoyé une lettre en ce sens au congrès en juin 2022 demandant un financement à hauteur de 4,3 milliards de dollars dédié à l'enrichissement américain. Les Républicains se refusent encore à ce type d'interventionnisme et privilégient l'envoi de signaux aux marchés pour rassurer les investisseurs sur l'existence de commandes à venir.

3. L'Agence d'approvisionnement d'Euratom : les ratés d'une politique commune européenne

En absence de consensus, les mesures de l'UE pour limiter la présence russe sur le marché sont très limitées. Aucune sanction prise par la Commission européenne (CE) contre la Russie depuis l'invasion de l'Ukraine ne touche spécifiquement Rosatom. Portées par la Pologne, l'Allemagne et les trois pays baltes, les initiatives en ce sens se **sont heurtées à la menace de veto de la Hongrie** ainsi qu'à une opposition de principe de la France, alors que l'unanimité des pays membres est nécessaire. Pour Budapest, les débats sur les sanctions arrivent au moment de la négociation avec Moscou des modalités de la construction de deux nouveaux réacteurs VVER par Rosatom pour la centrale de Paks, un projet qui a reçu le feu vert de la Commission le 25 mai 2023. Le gouvernement lituanien a pris le leadership dans l'élaboration de nouvelles propositions de sanction contre Rosatom. L'objectif est de scinder les sanctions en fonction des activités de Rosatom, introduisant une interdiction d'importation d'uranium enrichi, ainsi que des mesures d'exemptions spécifiquement ciblées vers la France et la Hongrie qui disposerait d'un délai de 2 à 9 ans pour se conformer⁶⁷. **Pour le moment, l'UE se**

⁶⁷ 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).

limite à des déclarations d'intention, à l'image du plan REPowerEU⁶⁸ qui incite les pays membres à augmenter les capacités d'enrichissement, mais sans donner de moyen ou d'incitation légale.

Pourtant, l'UE dispose déjà des outils réglementaires lui permettant de limiter l'entrée d'uranium enrichi russe, sans pour autant s'en saisir. L'Agence d'approvisionnement du traité Euratom (ESA), créée en 1957, dispose du droit exclusif de conclure des contrats pour la fourniture de matières pour les combustibles nucléaires des exploitants de centrales de l'UE. En d'autres termes, si vendeurs et acheteurs d'uranium enrichi peuvent négocier seuls, ils doivent obligatoirement en référer à l'ESA qui contresigne ou non les contrats. Qui plus est, tous les contrats d'approvisionnement dépassant une durée de dix années doivent obligatoirement obtenir l'aval de la Commission. L'article 14 de son texte fondateur permet à l'ESA de refuser un contrat d'approvisionnement s'il « porte préjudice à l'achèvement des objectifs d'EURATOM ». **Les tensions entre pays membres ont mené jusqu'à aujourd'hui à une interprétation très libérale de cet article.** Pourtant, les pays d'Euratom se sont engagés, à l'occasion de la Déclaration de Corfou signée en 1993 à limiter à 20% la part de la Russie dans le marché européen des matières nucléaires. Mais cette déclaration ne se transformera jamais en quota contraignant. L'ESA traite les contrats au cas par cas, autorisant de très nombreuses dérogations. *In fine*, les contrats retoqués se comptent sur les doigts d'une main et le sont au titre de la durée considérée trop longue plus que de la provenance. **L'application plus stricte de l'article 14 de l'ESA et du traité de Corfou, ou *a minima* des annonces allant en ce sens constitueraient un premier signal fort pour les marchés** et inciteraient les investissements dans les capacités d'enrichissement.

Les pays membres ont pris des mesures dispersées. Jusqu'à présent, seule la Suède a décidé d'arrêter totalement l'importation de combustible russe pour l'entreprise d'État Vattenfall. En Europe centrale, les pays exploitants des réacteurs de technologie soviétique essaient de se défaire des importations russes de combustibles, et donc d'enrichissement, en signant des accords d'approvisionnement avec Westinghouse et Framatome (voir annexe 3).

L'accompagnement des pays d'Europe centrale dans la diversification de leurs approvisionnements pour VVER constitue le principal levier de l'UE pour lutter contre la présence russe. Du côté de l'offre, Westinghouse et l'espagnol ENUSA augmentent leur capacité de production de combustible pour VVER-440 sur leur site de Västerås en Suède et de Juzbado en Espagne. Sur le segment des VVER-1000, Framatome développe des moyens d'assemblage à Lingen (Allemagne), tandis que Westinghouse augmente les siens en Suède.

⁶⁸ 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 30 juin 2023).

Des doutes persistent sur la capacité de ces sites à fournir totalement les besoins des pays d'Europe centrale. Mais c'est dans la demande que les freins les plus importants existent. Outre son coût financier, le changement de type de combustible est limité par les longues procédures d'autorisation administrative d'utilisation, ainsi que par le risque de voir ces changements altérer les conditions d'assurances qui protègent les exploitants en cas de dysfonctionnement. **C'est dans l'accélération de ces processus que l'UE dispose de la plus grande capacité d'action. Dans cet objectif, la Commission a principalement mobilisé ses capacités de financement de la recherche.** Dès 2015, à la suite de l'annexion de la Crimée, le programme Horizon 2020 de la Commission finance le programme *European Supply of Safe Nuclear Fuel* dont l'objectif est de relancer la production de combustibles VVER et d'identifier les moyens de standardiser les processus d'autorisation d'utilisation à l'échelle européenne. La Commission a lancé un nouvel appel pour les chercheurs en juillet 2022 avec le même objectif.

En dehors de l'UE, **le Royaume-Uni a créé un fonds d'investissement à hauteur de 90 millions d'euros, le Nuclear Fuel Fund (NFF), pour encourager le développement de la filière de production de combustible dans le pays.** Accessible via un appel à intérêt, cet argent doit financer des projets du secteur privé visant à (1) réduire le temps et les coûts associés aux demandes d'autorisation pour la construction d'usine de la supply chain (2) répondre aux manques de main-d'œuvre qualifiée et (3) rassurer sur la rentabilité des investissements. L'objectif affiché est aussi de renforcer l'industrie britannique sur la fabrication de combustible pour tous les types de réacteurs, alors que la spécialisation historique de la filière s'est concentrée sur les modèles à refroidissement gaz. Toutefois, pour le moment, ce fonds a surtout visé l'étape de la conversion et son influence concrète sur l'enrichissement reste indéterminée. Dans sa réponse au NFF, Urenco signalait au gouvernement britannique que la meilleure solution pour assurer des investissements dans l'enrichissement était d'obliger les exploitants des futurs réacteurs planifiés à se fournir en combustibles produits dans le pays. Westminster ne semble pas avoir donné suite à cette proposition.

4. La Russie anticipe et cherche de nouveaux débouchés pour son uranium enrichi

Dès 2014, Rosatom s'est tournée vers des marchés en dehors de l'OCDE pour identifier des débouchés pour son uranium enrichi, en plus des contrats d'approvisionnements associés à la vente de réacteurs déjà évoqués (Turquie, Égypte, Bélarus, Bangladesh). Cette stratégie lui

permet aujourd'hui de maintenir des exportations vers un ensemble de pays pour lesquels la guerre en Ukraine ne constitue pas un obstacle au commerce avec Moscou.

En décembre 2022, le gouvernement **brésilien** signe avec Rosatom un contrat d'approvisionnement de LEU pour la centrale nucléaire d'Angra sur une durée de 4 ans⁶⁹. Les volumes sont restreints – l'équivalent d'une recharge complète de réacteur – mais Rosatom entrevoit ce contrat comme un moyen de renforcer sa place en Amérique latine. L'entreprise a déjà fourni du combustible au **Mexique**⁷⁰, avec lequel elle a signé un Memorandum of Understanding (MoU) en 2015 visant à étendre cet approvisionnement, et espère entrer sur le marché **argentin**.

En Asie, la **Chine** n'a à aucun moment remis en cause ses importations d'uranium enrichi russe. Parallèlement, les relations avec **l'Inde** se sont renforcées depuis début 2022 avec l'exportation par Rosatom de nouveaux types de combustibles pour la centrale VVER de Kudankulam pouvant opérer plus longtemps⁷¹. Enfin, le gouvernement à **Séoul** ne semble pas montrer de volonté d'arrêter ses importations d'uranium enrichi russe en cours depuis 1993, alors que Rosatom a gagné en janvier 2020 un nouveau contrat pour une durée de 10 ans représentant un tiers des besoins de ses 10 réacteurs de conception non coréenne⁷². Aux **Émirats arabes unis**, le contrat d'approvisionnement pour 15 ans entre *l'Emirates Nuclear Energy Corporation* et Rosatom à hauteur de la moitié des besoins de la centrale de Barakah n'a pas non plus été remis en cause par Abu Dhabi.

La Suisse constitue un contre-exemple. Trois des quatre réacteurs en fonction dans le pays, à Beznau et Leibstadt, consomment de l'uranium enrichi russe, à hauteur de 100% pour les deux premiers et de 50% pour le second, soit environ 40% de la demande totale du pays. En dépit de ce taux élevé, Axpo, l'exploitant de ces réacteurs qui appartient entièrement à neuf cantons suisses, a annoncé ne pas renouveler ses contrats avec Rosatom⁷³.

⁶⁹ World Nuclear News, *Rosatom to supply uranium products for Brazil's Angra plant*, 7 décembre 2022, <https://world-nuclear-news.org/Articles/Rosatom-says-to-supply-uranium-products-for-Brazil> (consulté le 30 juin 2023).

⁷⁰ World Nuclear News, *Russia-Mexico agreement enters into force*, 11 août 2015, <https://world-nuclear-news.org/Articles/Russia-Mexico-agreement-enters-into-force> (consulté le 30 juin 2023).

⁷¹ Rezaul H. "Laskar, Russia offers new nuclear fuel solutions for India's atomic reactors," *Hindustan Times*, 22 novembre 2022, <https://www.hindustantimes.com/india-news/russia-offers-new-nuclear-fuel-solutions-for-india-s-atomic-reactors-101669119677843.html> (consulté le 30 juin 2023).

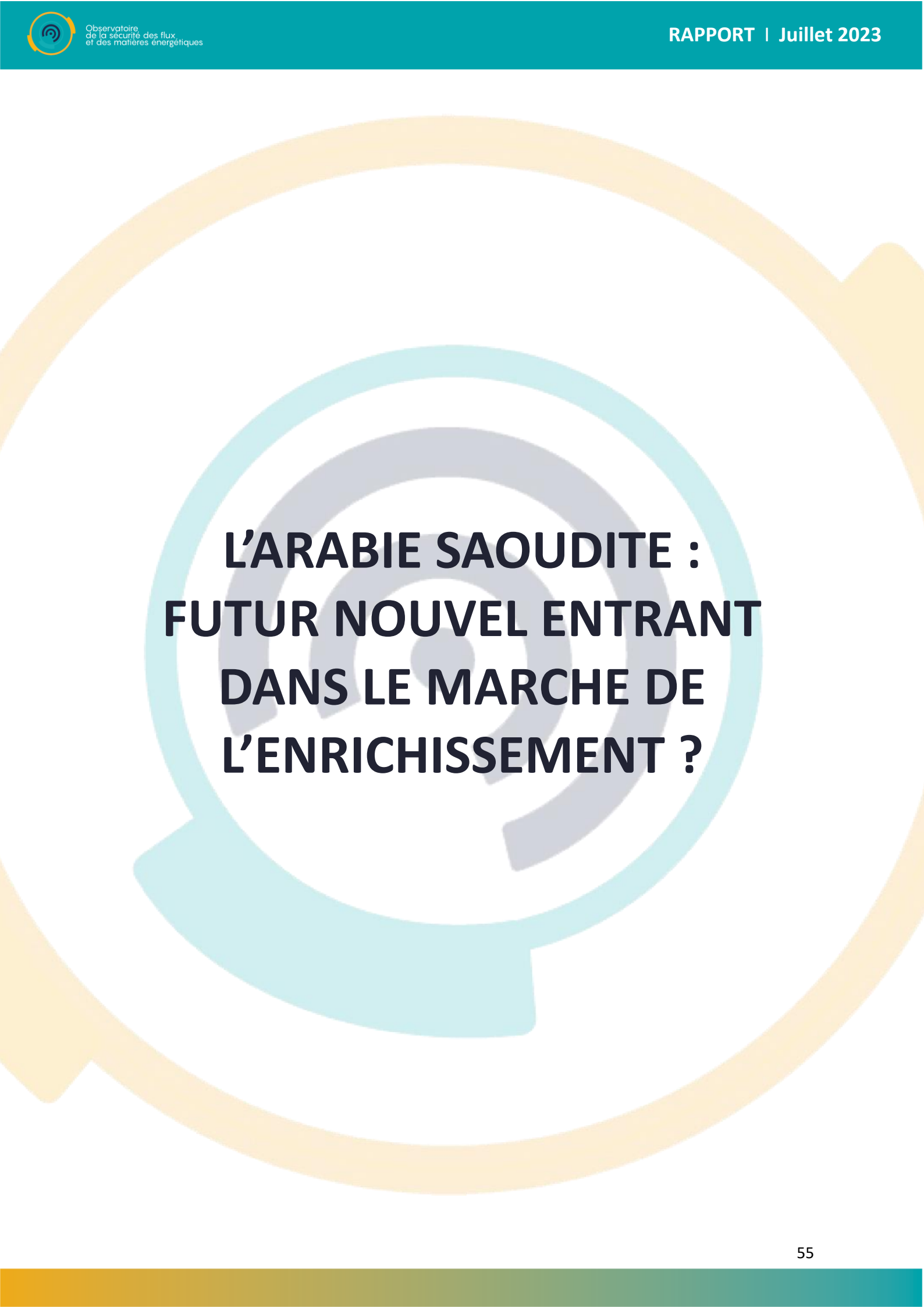
⁷² Nuclear Engineering International, *Russia's Tenex wins tender for fuel supply to South Korea*, 25 juin 2020, <https://www.neimagazine.com/news/newsrussias-tenex-wins-tender-for-fuel-supply-to-south-korea-7653727> (consulté le 30 juin 2023).

⁷³ Swissinfo.ch, *Use of Russian uranium for Swiss nuclear power under scrutiny*, 31 mars 2022, <https://www.swissinfo.ch/eng/business/use-of-russian-uranium-for-swiss-nuclear-power-under-scrutiny/47479722> (consulté le 30 juin 2023).

5. Une nouvelle alliance au sein du marché contre la Russie ?

Le 16 avril 2023, en marge du sommet du G7 de Sapporo, le Royaume-Uni, le Japon, le Canada, les États-Unis et la France ont signé une déclaration commune visant à créer une alliance pour isoler la Russie et réduire sa place dans le marché du combustible nucléaire⁷⁴. **Mais les moyens concrets restent à identifier.** Les pays signataires s'engagent à collaborer sur des projets d'extraction, de conversion et d'enrichissement d'uranium et à construire un marché global du combustible nucléaire, sans en définir les contours. Aucun interventionnisme direct des États n'est évoqué et les noms des enrichisseurs n'apparaissent pas. Pour URENCO, ni l'Allemagne ni les Pays-Bas n'ont publicisé leur soutien à cette initiative. Cette déclaration vise, à nouveau, à **donner des signaux positifs au marché quant aux souhaits des pays nucléarisés d'arrêter les importations de Russie pour les rassurer sur la rentabilité de futurs investissements privés** dans des moyens de production (voir annexe 4).

⁷⁴ Nuclear Engineering International, *Five G7 nations aim to cut dependence on Russian nuclear technology*, 19 avril 2023, <https://www.neimagazine.com/news/newsfive-g7-nations-aim-to-cut-dependence-on-russian-nuclear-technology-10770200> (consulté le 30 juin 2023).



L'ARABIE SAOUDITE : FUTUR NOUVEL ENTRANT DANS LE MARCHÉ DE L'ENRICHISSEMENT ?

À RETENIR

- L'Arabie Saoudite souhaite s'équiper de capacités d'enrichissement dans le cadre de sa politique de développement d'un parc nucléaire afin d'utiliser ses gisements en uranium naturel et assurer son indépendance. Cette stratégie s'inscrit dans la politique saoudienne de diversification de son industrie en dehors des hydrocarbures. Le développement à court terme de capacité d'enrichissement devra passer soit par l'importation de centrifugeuses, soit par des partenariats de transferts de technologie, ce qui devrait guider Riyad vers l'achat de réacteurs nucléaires russes ou chinois.
- Envisagées depuis 1946, les politiques d'internationalisation totale visant à limiter la prolifération des moyens d'enrichissement ont toutes échoué. En cause (1) le souhait de l'AIEA de solutions ne pesant pas sur son budget, (2) l'opposition des pays enrichisseurs qui y voient une concurrence déloyale et (3) l'opposition de certains pays consommateurs qui y voit un piège les obligeant à renoncer à l'enrichissement souverain.
- Jusqu'à présent, ces politiques se sont surtout centrées sur l'établissement d'assurance de marché visant à décourager l'investissement des pays nucléarisés dans des moyens d'enrichissement en couvrant d'éventuelles ruptures d'approvisionnement.

L'industrie de l'enrichissement est prise en tenaille entre deux forces. D'un côté, **la lutte contre la prolifération nucléaire nécessite de limiter la volonté de certains pays nucléarisés de se doter de capacités d'enrichissement pour sécuriser leur approvisionnement**. De l'autre, **la libéralisation économique du marché mène ses acteurs à s'opposer à toute forme d'interventionnisme étatique**.

En janvier 2023, Abdulaziz ben Salman, ministre saoudien de l'Énergie et frère du prince héritier Mohammed ben Salman (MBS), **réitérait l'intention du Royaume de s'équiper de moyens d'enrichissement d'uranium afin d'assurer une indépendance complète dans la production du combustible nucléaire**⁷⁵. Cette annonce fait suite au Décret royal de 2009 désignant l'énergie nucléaire comme nécessaire au développement du pays face à la déplétion des hydrocarbures et l'augmentation des besoins en énergie pour le dessalement de l'eau, un projet confirmé dans le plan Vision 2030 publié en 2016. Les ambitions ont été graduellement revues à la baisse. De la construction de 16 réacteurs planifiés en 2020, on passe à 12 en 2012, puis à seulement 4 GW de capacités nucléaires en 2019, soit 3 ou 4 réacteurs en fonction d'ici à 2030. Pour satisfaire ces besoins de manières autonomes, le régime aurait besoin d'une capacité d'enrichissement annuelle d'environ 550 kUTS pour le plan à 4 réacteurs et de 2 400 kUTS pour celui à 16 réacteurs, soit environ quatre fois la capacité de l'usine brésilienne pour le premier scénario, et la moitié de celle d'Urenco à Capenhurst (GB) pour le second. En mai 2022, Riyad a lancé son premier appel d'offres pour la construction de deux réacteurs dans la baie de Khor Duweihin entre le Qatar et les Émirats arabes unis⁷⁶.

L'enrichissement s'inscrit dans la stratégie d'indigénisation de la filière nucléaire développée par MBS qui envisage de localiser 25% à 30% de la fabrication des réacteurs dans le royaume pour servir l'objectif de modernisation technologique de l'Arabie saoudite⁷⁷. Il s'agit alors de **mettre à profit les gisements d'uranium identifiés dans le pays** et actuellement explorés avec l'aide d'industriels chinois. Les ressources saoudiennes identifiées jusqu'à présent sont toutefois moins larges qu'escomptées, n'identifiant qu'environ 77 000 t d'uranium dans des ressources non conventionnelles présentes dans les gisements de phosphates dont l'exploitation ne serait pas rentable⁷⁸. Ce choix se fait également au regard de la situation iranienne, laissant peser le doute sur la nature civile du programme. Mohammed bin Salman a ainsi répété début 2023 que, si l'Arabie saoudite ne souhaitait pas s'équiper d'un armement

⁷⁵ 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).

⁷⁶ 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).

⁷⁷ Noura Mansouri, "Commentary – The Saudi Nuclear Energy Project," KAPSARC, janvier 2020, <https://www.saudi-aee.sa/wp-content/uploads/2022/01/3-The-Saudi-Nuclear-Energy-Project.pdf> (consulté le 30 juin 2023).

⁷⁸ Nuclear Energy Agency, *Uranium Resources, Production and Demand (Red Book)*, 2022, https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_28569/uranium-resources-production-and-demand-red-book (consulté le 30 juin 2023).

nucléaire, le royaume se gardait la possibilité de le faire si Téhéran devait poursuivre son programme militaire.

Le choix du type de réacteur aura une influence sur la capacité de Riyad à développer des capacités d'enrichissement. L'importation de technologies états-uniennes obligerait l'Arabie saoudite à signer un accord au titre de la section 123 de l'*US Atomic Act* introduisant des garants pour s'assurer que ces transferts de technologie ne soient pas détournés de leur vocation civile. Mais Riyad serait forcée de signer une version augmentée, dite *Gold Standard*, qui l'engagerait à abandonner toutes velléités d'enrichissement. Cette situation découle de la signature entre les États-Unis et les Émirats arabes unis d'un accord *Gold Standard* en 2009 pour permettre l'importation de réacteurs sud-coréens utilisant des technologies états-uniennes. Or, cet accord comprend une clause de retrait si Washington avalisait un texte moins contraignant avec un pays du Golfe. L'administration Trump envisageait de réformer à la baisse le *Gold Standard* afin de faire avancer les projets d'exportation de réacteurs de Westinghouse en Arabie saoudite⁷⁹. Le Congrès a stoppé ces projets et les parlementaires ont également tenté d'introduire, sans succès, **un texte de loi interdisant les ventes d'armes au royaume saoudien tant que l'enrichissement ne serait pas abandonné**. Une autre solution évoquée serait d'autoriser la construction d'une usine d'enrichissement en Arabie saoudite, conjointement contrôlée par Riyad et Washington, ce à quoi le royaume se refuse pour l'instant. Dans cette situation, **il est probable que l'Arabie saoudite se tourne vers des fournisseurs moins regardants**, au premier titre desquels la Chine, avec laquelle elle a déjà un partenariat pour l'exploration de l'uranium, ou la Russie qui n'opposera pas les mêmes conditions à la vente de réacteurs.

⁷⁹ Miller, Nicholas R., et Tristan Volpe. « Abstinence or Tolerance : Managing Nuclear Ambitions in Saudi Arabia » . The Washington Quarterly 41, no 2 (3 avril 2018) : 27-46. <https://doi.org/10.1080/0163660x.2018.1484224>.



CONCLUSION

D'où partons-nous ?

- Le marché de l'enrichissement est en surcapacité de production, mais cette situation devrait s'inverser d'ici à 2035, date à laquelle la consommation chinoise pourrait dépasser celles européenne et états-unienne cumulées. (Partie 1.A)
- Ce contexte a laissé s'installer l'image d'un secteur dépourvu d'enjeux stratégiques et d'abord guidé par des intérêts commerciaux. (Partie 1.A)
- Cumulé à la libéralisation et la privatisation du secteur à Washington, la production états-unienne s'est effondrée, en dépit d'un réveil qui précède la guerre en Ukraine. (Partie 1.C)
- La Russie a profité de ce vide stratégique pour prendre l'ascendant sur l'enrichissement, s'appuyant sur son système industriel pléthorique, des coûts de production faibles, une diplomatie nucléaire permettant de gagner des marchés à l'étranger et des accords de dénucléarisation militaire qui ont inondé le marché avec de l'uranium enrichi peu cher. (Partie 1.B)
- Mais l'enrichissement est aussi fondamental pour la Russie. Premièrement, c'est le garant de sa stratégie de vente de réacteur nucléaire à l'étranger. Deuxièmement, ses surcapacités lui permettent de compenser la faiblesse de sa production d'uranium naturel (1.B)
- En Europe, la gouvernance complexe d'Urenco, mêlant intérêts nationaux divergents et stratégies d'entreprises, freine toute évolution rapide (1.D). L'entreprise n'envisage pour l'instant que de reconstruire les capacités d'enrichissement qu'elle avait supprimé ces dernières années.
- Orano est aujourd'hui le seul enrichisseur engagé dans une augmentation substantielle de ses moyens de production (1.D)
- La Chine poursuit une stratégie visant d'abord l'autonomie de ces besoins nationaux avant d'essayer de conquérir des marchés à l'étranger. Mais les divisions internes qui grèvent son industrie nucléaire freinent ce processus (1.E)

Quels sont les risques posés par cette situation ?

- La Russie n'a pas la capacité d'utiliser coercitivement ou diplomatiquement sa domination sur le marché de l'enrichissement (2.A)
- Toutefois, aucune sanction ne touche pour le moment les filiales de ventes de combustibles de Rosatom (2.B / 2.C)
- Son poids dans la vente de service d'enrichissement a permis à la Russie de maintenir et développer des capacités de construction de centrifugeuse pour l'enrichissement, ce qui est moins le cas en Europe et aux États-Unis (5.A)
- L'Arabie Saoudite est le seul pays qui aujourd'hui démontre une réelle volonté de développer des capacités commerciales d'enrichissement (4.A)
- L'arrivée sur le marché de nouveaux types de réacteurs demandant des taux d'enrichissement du combustible plus élevés que ceux actuellement utilisés (dits « HALEU ») pourrait représenter une pression supplémentaire sur les usines occidentales (6.A)
- En l'état, il n'existe pas de filière HALEU commerciale en dehors de Russie (6.A)

Quelles sont les principales voies de mitigation du risque ?

- Les États-Unis ont introduit des quotas sur le volume d'enrichissement importé de Russie depuis les années 1990. Cette mesure est prolongée jusqu'en 2040 (1.C)
- Si des mesures d'interdiction complètes des importations russes sont actuellement débattues par les parlementaires états-uniens, Washington vise d'abord à reconstruire ses capacités d'enrichissement en restant dans le cadre du marché libéralisé et en envoyant des signaux aux investisseurs potentiels sur la demande future (2.B)
- C'est sur le marché HALEU que Washington est le plus interventionniste en lançant des appels d'offres pour l'achat de premières quantités d'uranium enrichi à des taux plus élevés, financées par l'État (6.B)
- Bien qu'elle dispose des instruments réglementaires pour limiter la place de la Russie dans son marché intérieur, l'Union européenne ne les utilise pas. L'Europe compte d'abord sur le financement de l'innovation pour découpler les exploitants de réacteurs nucléaires de technologie soviétique de leurs approvisionnements russes. (1.D)

Quels blocages persistent ?

- Aux États-Unis, les mesures de reconstruction d'une industrie nationale d'enrichissement sont freinées par : (1) l'opposition de certains exploitants de réacteurs nucléaires qui y voient un risque pour leur rentabilité, (2) l'opposition au nucléaire d'une partie des Démocrates et (3) l'opposition des Républicains à l'interventionnisme de l'État (2.B)
- En Union européenne, la Hongrie persiste à menacer d'un veto toute mesure coercitive contre l'importation de combustibles nucléaires russes (2.C)
- Les enrichisseurs privés européens et états-uniens ne s'engageront pas dans des investissements lourds pour augmenter leur production tant qu'ils n'auront pas de certitudes sur la place que prendra la Russie dans ces marchés ou sans nouveaux contrats sur le long terme.
- Les tentatives pour internationaliser le secteur de l'enrichissement n'ont jamais entièrement abouti et se limitent principalement à des assurances de marché (4.B)
- L'économisation des capacités d'enrichissement grâce à la stratégie d'*overfeeding* sera très fortement contraintes par les goulets d'étranglement qui existent sur les capacités de transformation de l'uranium naturel (conversion) préalable à son enrichissement (7.A)



GLOSSAIRE

LEU : Low Enriched Uranium – uranium enrichi en ^{235}U entre 3% et 5%

LEU+ : Low Enriched Uranium+ – uranium enrichi en ^{235}U entre 5% et 10%

PWR : Réacteur à eau pressurisé

BWR : Réacteur à eau bouillante

AGR : Réacteur avancé refroidi au gaz

LWGR : Réacteur modéré au graphite refroidi à l'eau

PHWR : Réacteur à eau lourde

HTGR : Réacteur à haute température refroidi au gaz

HALEU : High-Assay Low Enriched Uranium - uranium enrichi en ^{235}U entre 10% et 20%

RNR : Réacteur à neutrons rapides

UTS : Unité de travail de séparation – mesure de l'effort nécessaire pour enrichir de l'uranium

HEU : High Enriched Uranium – uranium enrichi en ^{235}U à plus de 20%

SEU : Slightly Enriched Uranium - uranium enrichi en ^{235}U entre 0,9% et 3%

RSA : Russian Suspension Agreement

CNNC : China National Nuclear Corporation

CGN : China General Nuclear Power Corporation

SPIC : China State Power Investment

CNFC : China Nuclear Fuel Corporation

CNEIC : China Nuclear Energy Industry Corporation

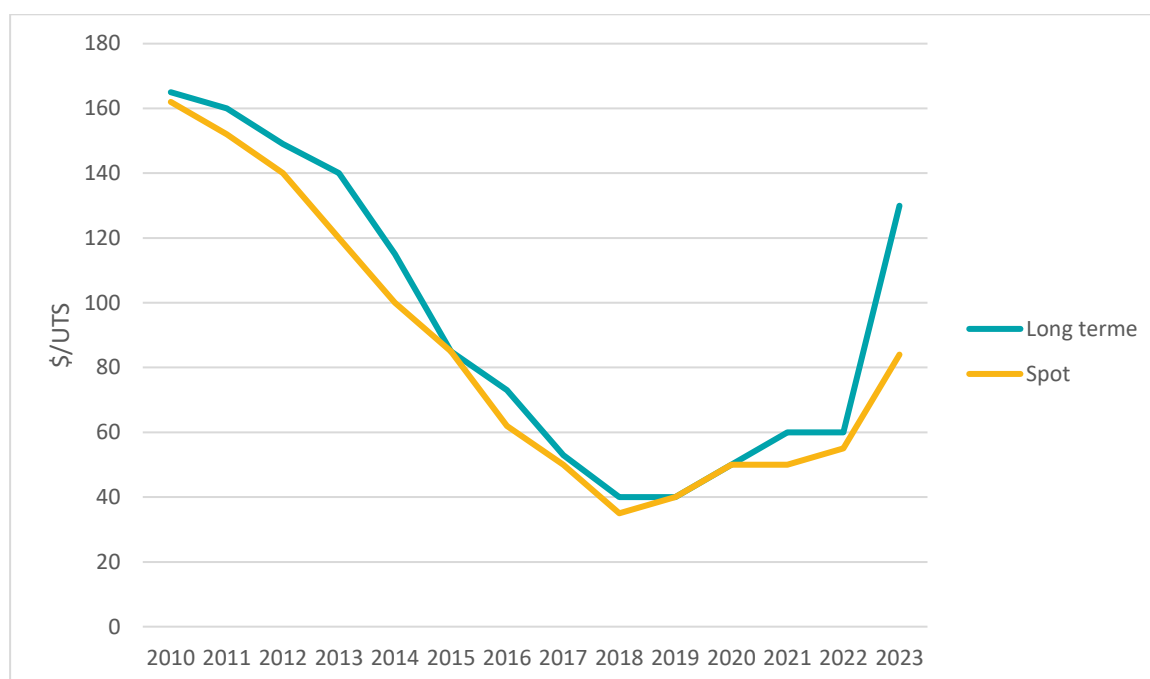
ESA: Agence d'approvisionnement du traité Euratom

VVER : Modèle de réacteur à eau pressurisé de technologie russe



ANNEXES

Annexe 1 : Évolution du prix de l'UTS depuis 2010



Source : TradeTech

Annexe 2 : Répartition des capacités d'enrichissement commercial en 2022 par entreprise, usine et pays

Entreprise	Pays	Usine	Capacité (kUTS)	Total des capacités mondiales
Urenco	Pays-Bas	Almelo	5100	9%
	Grande-Bretagne	Capenhurst	4500	7,9%
	Allemagne	Gronau	3700	6,5%
	États-Unis	Eunice	4800	8,4%
Orano	France	Tricastin	7500	13,2%
Rosatom	Russie	Novouralsk	9900	17,4%
		Zelenogorsk	8600	15,1%
		Seversk	3000	5,3%
		Angarsk	2600	4,6%
CNNC	Chine	Lanzhou	2600	4,6%
		Hanzhong	2710	4,8%
		Emeishan	1450	2,5%
		Heping	250	0,4%
INB	Brésil	Resende	110	0,2%
CNEA	Argentine	Pilcaniyeu	20	Négligeable
DAE	Inde	Rathnahalli	10	Négligeable
JNFL	Japon	Rokkasho	100	0,2%

Sources : OCDE-NEA ; World Nuclear Association

Annexe 3 : Les stratégies de diversification de l’approvisionnement en combustibles VVER des pays européens depuis le début de la guerre en Ukraine

Pays	Fournisseur de solution de diversification	Date de signature	Description
aRépublique tchèque	Westinghouse	31/03/2023	Fourniture de combustibles pour les réacteurs VVER-440 de la centrale de Dukovany pour 7 ans
	Westinghouse	28/06/2022	Fourniture de combustibles pour le réacteur 1 de Temelín sur 15 ans
	Framatome		Fourniture de combustibles pour le réacteur 1 de Temelín sur 15 ans
Roumanie	Pas de réacteur qui consomme du LEU		
Slovaquie	Framatome	01/06/2023	Accord pour le développement de combustibles entièrement européen pour les VVER-440
Bulgarie	Urenco	21/04/2023	Fourniture en service d’enrichissement sur 10 ans pour un des deux réacteurs de Kozloduy (Kozloduy-5)
	Cameco	21/04/2023	Fourniture en UF ₆ de 10 ans pour un des deux réacteurs de Kozloduy (Kozloduy-5)
	Westinghouse	22/12/2022	Fourniture en combustibles VVER-1000 de 10 ans pour un des deux réacteurs de Kozloduy à partir de 2024 (Kozloduy-5)
	Framatome	03/01/2023	Fourniture de combustibles VVER-1000 de 10 ans pour un des deux réacteurs de Kozloduy à partir de 2025 (Kozloduy-6)
Hongrie	Aucun projet		
Finlande	Westinghouse	23/11/2022	Fourniture de combustibles VVER-440 pour la centrale de Loviisa en parallèle de Rosatom

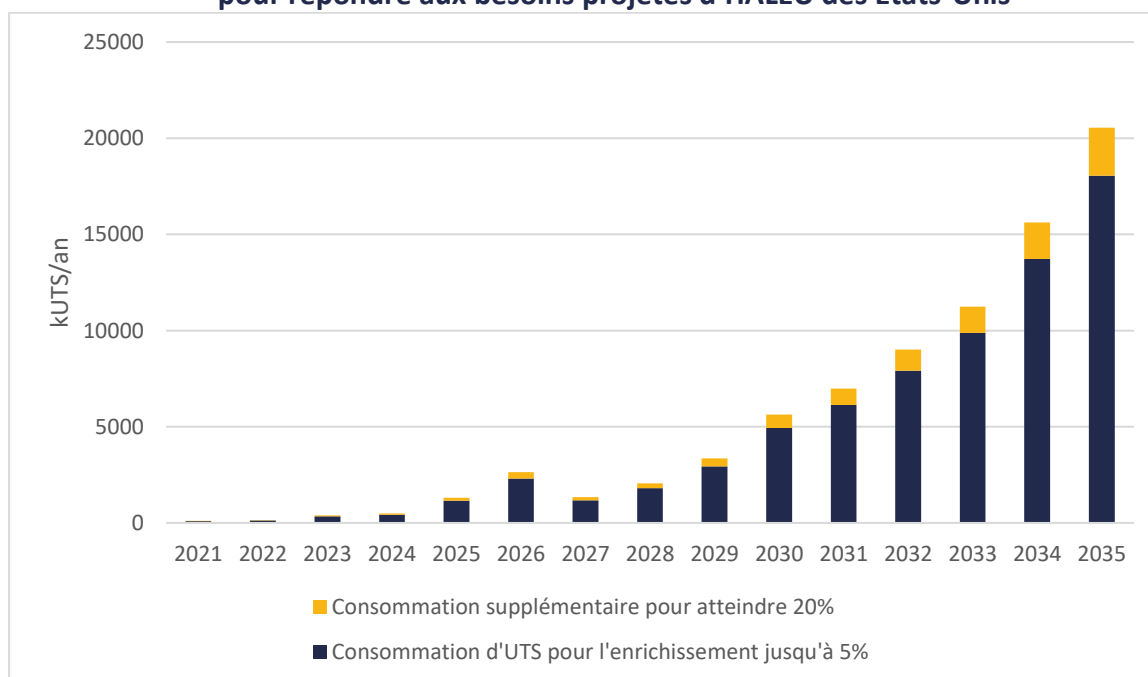
Annexe 4 : Rappel des mesures stratégiques de diversification des approvisionnements en uranium enrichi russe depuis l’invasion de l’Ukraine

États-Unis	Fléchage de prêts spécifiquement pour les exploitants de réacteurs utilisant de l’uranium enrichi états-unien (<i>Civil Nuclear Credit Program</i>)
	Stimuler la construction de nouvelles capacités d’enrichissement en développant une task force auprès du président dédiée à la diplomatie nucléaire (<i>International Nuclear Energy Act</i>)
	Augmenter la réserve stratégique d’uranium enrichi (<i>Nuclear Fuel Security Act</i> – toujours en débat au Congrès)
	Interdire entièrement les importations de Russie (<i>Reduce Russian Uranium Imports Act</i> et le <i>Prohibiting Russian Uranium Imports Act</i> – toujours en débat au Congrès)
Union européenne	Financer des programmes de recherche pour développer des solutions alternatives à la Russie pour les combustibles VVER et accélérer les procédures de leur homologation
République tchèque	Contrat d’approvisionnement avec Westinghouse et Framatome pour les centrales de Temelín et Dukovany
Slovaquie	Contrat d’approvisionnement avec Framatome pour les VVER-440 de Bohunice et Mochovce
Bulgarie	Contrat d’approvisionnement avec Urenco, Westinghouse et Framatome pour la centrale de Kozloduy
Finlande	Contrat d’approvisionnement avec Westinghouse pour les VVER-440 de Loviisa
Suède	Suspension de l’achat de services d’enrichissement et de combustibles par l’entreprise d’État Vattenfall
Suisse	Décision de ne pas reconduire le contrat de fourniture des réacteurs exploités par Axpo
Royaume-Uni	Création d’un fonds d’investissement pour encourager le développement de la filière de production de combustible dans le pays

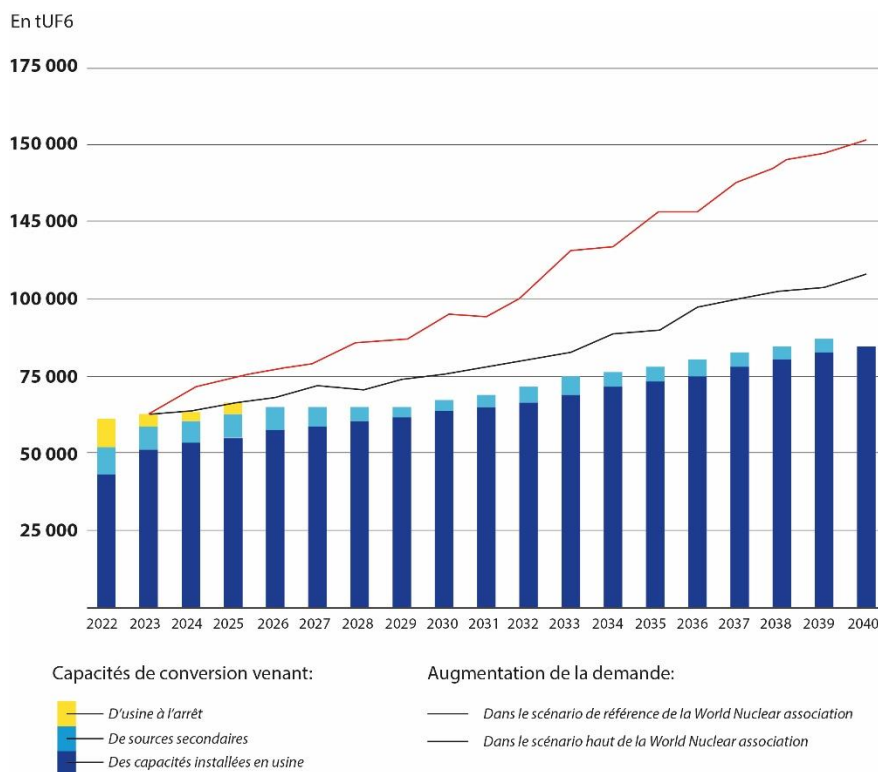
Annexe 5 : Les types de SMR envisagés en Europe consommeront principalement du LEU

Modèle de réacteurs	BWRX-300	VOYGR	Sealer	SMR-160	Nuward
Fabricant	General Electric	NuScale	LeadCold	Holtec	EDF
Pays envisageant leur déploiement	Pologne, Estonie, République tchèque	Roumanie, Finlande, République tchèque	Suède	République tchèque	France
Type de combustible	LEU	LEU	HALEU	LEU	LEU

Annexe 6 : Consommation d'UTS annuelle théorique pour répondre aux besoins projetés d'HALEU des États-Unis



Annexe 7 : Évolution des capacités et de la demande de conversion dans des scénarii sans *overfeeding*



Sources : World Nuclear Association

*

Annexe 8 : Le poids de l'enrichissement russe est aussi une conséquence mal anticipée du programme de désarmement Megatons to Megawatts.

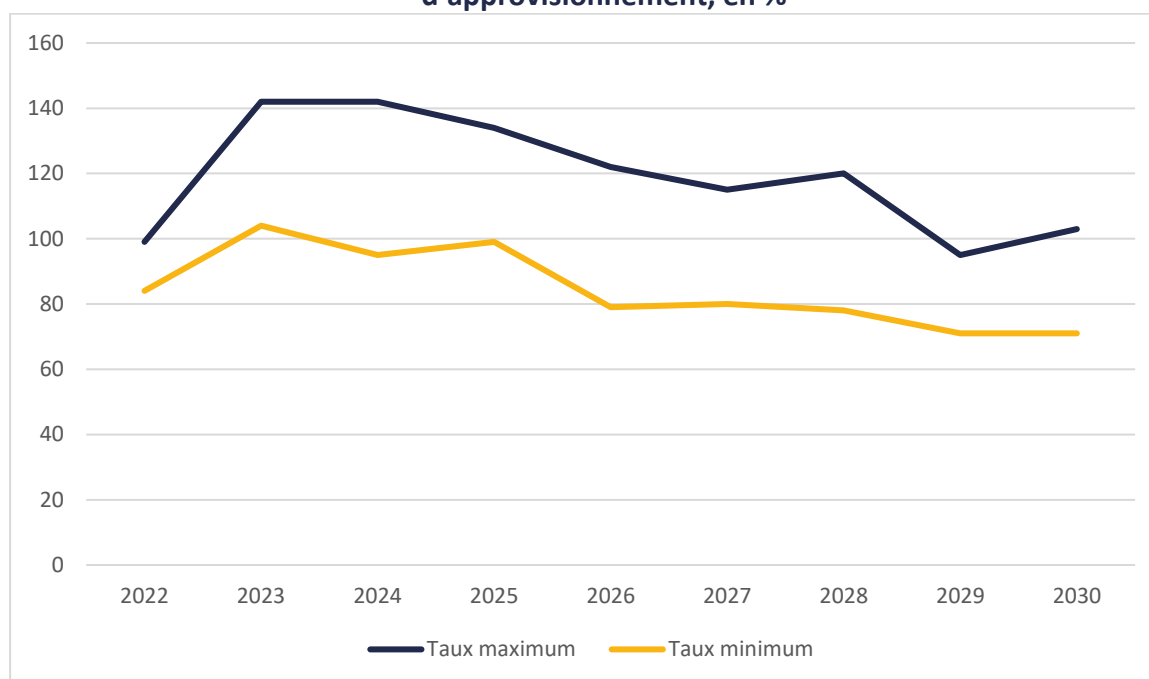
Signé en 1994 entre Washington et Moscou, cet accord prévoit l'achat par les États-Unis de 500t d'HEU issu du démantèlement de stocks militaires soviétiques à la Russie sur une période de 20 ans pour la fabrication de combustible LEU. L'effet pour la filière d'enrichissement russe est double. Premièrement, elle rapporte environ 800 millions de dollars par an à la Russie. On estime qu'en 1999, ces paiements constituaient jusqu'à 3% des revenus du gouvernement russe. Deuxièmement, alors que la demande mondiale en UTS stagne, elle occupe une partie des capacités russes d'enrichissement, leur permettant de survivre. Le passage du HEU au LEU se fait par le mélange du premier avec de l'uranium très faiblement enrichi, à environ 1,5%. Ce dernier est produit en Russie par le réenrichissement d'une partie des tails stockés jusqu'alors, mobilisant environ 5 500 kUTS par an. Megatons to Megawatts permet alors à la filière russe d'enrichissement de survivre aux années 1990 et 2000. Le programme s'arrête en 2013, libérant ainsi une part importante de capacités russes sur le marché.

Annexe 9 : Besoin annuel en enrichissement par réacteur selon sa génération et la composition des *tails*

Type de réacteur	Composition des <i>tails</i> en ^{235}U	Consommation d'enrichissement (en kUTS/an)	Consommation d' UF_6 (tonnes)
Génération actuelle (Gen2)	0,16% (<i>underfeeding</i>)	207	191
	0,22%	178	211
	0,30% (<i>overfeeding</i>)	151	248
Génération en construction (Gen 3 et 3+)	0,16% (<i>underfeeding</i>)	148	165
	0,22%	142	164
	0,30% (<i>overfeeding</i>)	121	192

Sources : Urenco SWU Calculator ; World Nuclear Association

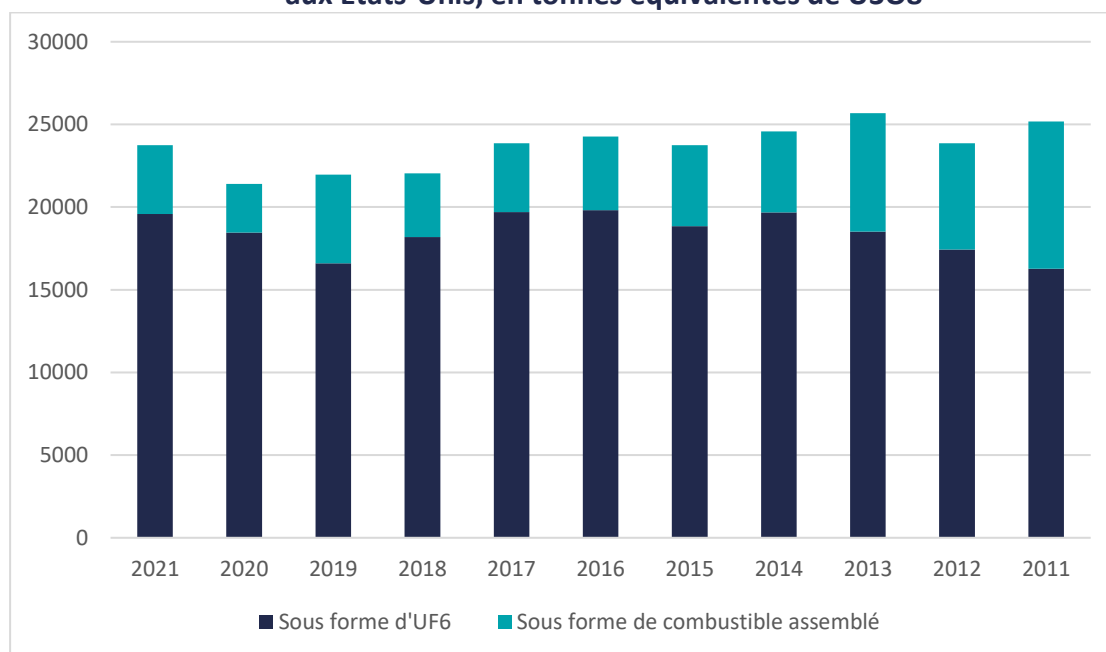
Annexe 10 : Part de la consommation en enrichissement des exploitants européens de centrales nucléaires pour chaque année déjà couverte par un contrat d'approvisionnement, en %⁸⁰



Source : Euratom Market Observatory

⁸⁰ Les contrats d'enrichissement comprennent un taux minimal et maximal que les enrichisseurs s'engagent à fournir chaque année.

Annexe 11 : Les stocks d'uranium enrichi détenus par les exploitants de réacteurs aux États-Unis, en tonnes équivalentes de U3O8⁸¹



Sources : *Uranium Marketing Annual Report* - U.S. Energy Information Administration

Annexe 12 : Les stratégies d'autonomie stratégique des petits enrichisseurs

En plus de ces quatre grands groupes, l'Argentine, le Brésil, le Japon et l'Inde développent des capacités d'enrichissement limitées dans l'objectif de renforcer l'autonomie de leur consommation. Pour tous, la construction de ces sites entraîne un coût de l'enrichissement supérieur à celui du marché international, signalant bien la valeur d'abord stratégique de ces usines. On laissera de côté ici les enrichisseurs dont l'objectif est d'abord de répondre à des besoins militaires ou de recherche, comme l'Iran, le Pakistan et la Corée du Nord, en dehors de l'objet de ce rapport.

Le Brésil vise une autonomie complète en 2037. Depuis l'inauguration de l'usine à centrifugation de Resende en 2006, le gouvernement brésilien via l'entreprise publique *Indústrias Nucleares do Brasil* (INB) augmente graduellement ses capacités d'enrichissement. En novembre 2022, INB termine la première phase du projet, lui permettant de répondre à 70% aux besoins du réacteur 1 de la centrale d'Angra, pour une capacité estimée entre 100 et

⁸¹ Les données identiques n'existent pas pour l'Europe. L'agence d'approvisionnement d'Euratom ne donne que le volume total de produit d'uranium en inventaire, sans faire la différence entre uranium naturel et uranium enrichi.

115 kUTS/an (même si l'efficacité réelle de ces sites est sujette à caution)⁸². La construction de la deuxième phase a été engagée pour une mise en fonction espérée en 2037 avec une capacité suffisante pour répondre à la consommation des deux réacteurs en fonction d'Angra, en plus de celui actuellement en construction. Après avoir copié et amélioré la technologie d'Urenco avec l'aide de la Marine militaire, intéressée pour alimenter de futurs sous-marins nucléaires, INB est aujourd'hui autonome dans la fabrication des centrifugeuses. Cette stratégie d'autonomie se couple à la réouverture de la mine d'uranium de Caetité fin 2020 et à la décision en 2023 d'autoriser le secteur privé à exploiter les réserves uranifères. Cette décision pourrait également permettre à des financeurs privés d'investir dans l'enrichissement. Le Brésil est devenu exportateur d'enrichissement pour la première fois en 2016 avec la vente de 4 tonnes d'uranium enrichi à l'Argentine. Si cette expérience n'a pas été renouvelée, elle marque la volonté de Brasilia d'entrer graduellement dans ce marché et de changer son image de simple exportateur de matière première, même si ses coûts de production restent un frein à tout développement.

En Argentine, l'enrichissement attend la stabilisation de la stratégie nucléaire du pays. La *Comisión Nacional de Energía Atómica* a relancé en 2015 son usine d'enrichissement de Pilcaniyeu (Rio Negro), fermée depuis 1989, avant de la remettre à l'arrêt en 2018. Utilisant la diffusion gazeuse, le site a une capacité très limitée d'environ 20 kUTS/an. L'Argentine n'exploite actuellement que des réacteurs PHWR dont les besoins en uranium très faiblement enrichi sont limités. La relance de la construction du prototype de petits réacteurs modulaire à uranium enrichi CAREM25 en 2021 pourrait augmenter faiblement les besoins en UTS du pays. Buenos Aires hésite encore entre continuer sa stratégie PHWR en s'équipant de réacteurs CANDU ou passer au REP en achetant un Hualong One à la Chine ou en développant un modèle plus grand du CAREM. Le choix aura une influence sur les besoins en enrichissement, même si pour l'option chinoise CNNC restera fournisseur d'uranium enrichi.

Poursuivant aussi une stratégie PHWR, l'Inde dispose de capacités réduites, mais suffisantes pour ses besoins actuels. Seuls 4 de ses 19 réacteurs sont des REP/REB et nécessitent du LEU. Le contrat d'exportation des 2 VVER à Kudankalam comprend la fourniture par Rosatom du combustible durant toute la vie de la centrale et il devrait en être pareil pour les 4 nouvelles tranches en construction. Le groupe russe est également fournisseur du LEU pour les deux REB de Tarapur. Le choix indien de se concentrer sur le déploiement de nouveaux réacteurs IPHWR pour (Indian PHWR) de technologie locale devrait augmenter, à la marge, les besoins en enrichissement, ces centrales nécessitant des combustibles d'uranium très faiblement enrichi

⁸² Nuclear Engineering International, *INB completes first stage of uranium enrichment plant*, 29 novembre 2022, <https://www.neimagazine.com/news/newsinb-completes-first-stage-of-uranium-enrichment-plant-10391917> (consulté le 30 juin 2023).

à 1,1% d' ^{235}U . Pour le moment, le *Department of Atomic Energy* (DAE), exploite une petite usine d'enrichissement à Ratnahalli au sud du pays dans le Karnataka, principalement pour des usages militaires. En 2011, le DAE a annoncé son intention de construire une nouvelle usine dans le district de Chitradurga au Karnataka, d'environ 50 kUTS/an pour ses programmes militaires et civils. Les images satellites montrent toutefois que le projet n'a pas avancé depuis.

Au Japon, l'enrichissement est en phase de reconstruction. L'usine de Rokkasho à l'extrême nord de l'île d'Honshu a été fermée en 2010 après une série de problèmes sur les centrifugeuses. Le programme de relance a été mis à l'arrêt suite à la catastrophe de Fukushima. Malgré l'accord de l'autorité de régulation nucléaire japonaise, le projet reste ralenti. S'il visait une capacité finale de 1 500 kUTS/an en 2020, les installations ne totalisent en réalité, en 2023, qu'au maximum 100 kUTS/an. L'usine n'a plus vendu d'uranium enrichi depuis 2012, exceptées 4 tonnes provenant de stocks historiques en 2018. Malgré le plan de relance du nucléaire annoncé début 2023 par le gouvernement japonais, la remise à niveau des capacités d'enrichissement ne semble pas s'accélérer.

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

