



**LA TRIPLE DEPENDANCE FRANÇAISE
EN COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE**

*

Jean-Claude ZERBIB, Bernard LAPONCHE

Mai 2023

SOMMAIRE

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCTION..... | 3 |
| 1. LES DIFFERENTS AVATARS DE L'URANIUM..... | 5 |
| 2. LA PROVENANCE DE L'URANIUM NATUREL..... | 6 |
| 2.1 LA PRODUCTION D'URANIUM NATUREL EN FRANCE..... | 6 |
| 2.2 L'ORIGINE DES BESOINS EN URANIUM NATUREL DE LA FRANCE..... | 6 |
| 2.3 L'IMPORTATION D'URANIUM NATUREL PAR LA FRANCE..... | 7 |
| 2.4 LES RESSOURCES MONDIALES EN URANIUM NATUREL..... | 8 |
| 2.5 MODALITÉS D'APPROVISIONNEMENT DE L'URANIUM NATUREL..... | 9 |
| 3. L'URANIUM ENRICHI..... | 11 |
| 3.1 L'ENRICHISSEMENT DE L'URANIUM..... | 11 |
| 3.2 L'ENRICHISSEMENT DE L'URANIUM NATUREL ACHETÉ PAR LA FRANCE... | 12 |
| 3.3 L'URANIUM ENRICHI IMPORTÉ DE RUSSIE..... | 12 |
| 3.4 LE PROJET D'ACCROISSEMENT DES CAPACITÉS D'ENRICHISSEMENT EN FRANCE..... | 14 |
| 4. L'URANIUM APPAUVRI ET SON ENRICHISSEMENT..... | 15 |
| 4.1 L'URANIUM APPAUVRI ENTREPOSE EN FRANCE..... | 15 |
| 4.2 L'ENRICHISSEMENT DE L'URANIUM APPAUVRI EN RUSSIE..... | 16 |
| 4.3 LE POTENTIEL D'ENRICHISSEMENT DU STOCK D'URANIUM APPAUVRI..... | 16 |
| 5. ENRICHISSEMENT DE L'URANIUM DE RETRAITEMENT..... | 18 |
| 5.1 L'URANIUM DE RETRAITEMENT..... | 18 |
| 5.2 COMBUSTIBLES URE ISSUS DE L'URT DANS LA CENTRALE DE CRUAS... | 19 |
| 5.3 ÉVOLUTION DU STOCK D'URANIUM DE RETRAITEMENT (URT)..... | 20 |
| 5.4 REPRISE DES ACTIVITÉS D'ENRICHISSEMENT DE L'URT AVEC LA RUSSIE | 21 |
| 6. LES COMBUSTIBLES DES RÉACTEURS D'EDF..... | 23 |
| 6.1 ÉVOLUTION DU CHARGEMENT EN COMBUSTIBLE..... | 23 |
| 6.2 LA FRANCE A-T-ELLE BESOIN D'ENRICHER SON URANIUM À L'ÉTRANGER ? | 25 |
| 6.3 FOURNITURE D'URANIUM ENRICHI ET RÉALISATION D'ASSEMBLAGES UNE EN FRANCE..... | 25 |
| 6.4 LES ASSEMBLAGES FABRIQUÉS PAR WESTINGHOUSE POUR EDF..... | 28 |
| 6.5 ACCORDS DE FRAMATOME AVEC LE KAZAKHSTAN..... | 28 |
| CONCLUSION..... | 29 |
| RÉFÉRENCES..... | 30 |
| ANNEXE 1 – LE COMBUSTIBLE MOX..... | 34 |
| ANNEXE 2 – USINE DE FABRICATION DE COMBUSTIBLE AU KAZAKHSTAN. . | 36 |

Merci à Abel Rosenstiehl pour la mise en forme et les illustrations..

INTRODUCTION

Avec 56 réacteurs répartis dans les 18 centrales nucléaires d'EDF, 70% environ de la production d'électricité en France sont assurés par l'utilisation de l'énergie nucléaire, grâce à la production de chaleur par la combinaison de la fission et de la réaction en chaîne dans les réacteurs.

Cette situation fait de la France le pays le plus « nucléarisé » au monde en proportion de sa population et le troisième en niveau de production après les États-Unis et la Chine, nettement plus peuplés.

Le programme des réacteurs actuellement en fonctionnement (en comptant les deux réacteurs de Fessenheim en cours de démantèlement) a été lancé au début des années 1970 et renforcé par le « Programme Messmer » de 1974, à l'occasion du premier « choc pétrolier », inaugurant la politique du « tout électrique-tout nucléaire » qui s'est poursuivie jusqu'à la construction de l'EPR de Flamanville en 2007, qui n'a toujours pas démarré.

Le gouvernement actuel se place dans cette lignée en prônant le prolongement de la durée de fonctionnement des réacteurs actuels et la construction d'un certain nombre de réacteurs de la filière EPR2, héritière de l'EPR.

Comme à l'époque, et bien que les temps aient bien changé, le principal argument de cette politique est « l'indépendance énergétique nationale », faisant d'ailleurs un raccourci trompeur de l'énergie à l'électricité et de celle-ci au nucléaire, symbole imaginaire d'une prétendue indépendance. Admettons toutefois que la conception et la construction des réacteurs soient « nationale », encore que bien des équipements soient importés, il n'en reste pas moins que la conception est essentiellement celle des réacteurs à uranium enrichi et eau sous pression d'origine Westinghouse, et que la « francisation » effectuée au début des années 1980 pose aujourd'hui pas mal de questions, notamment avec la découverte de fissures par corrosion sous contrainte ou fatigue thermique, qui plombent un certain nombre de réacteurs, dont les plus récents.

Par contre, l'indépendance est loin d'être acquise du côté du « combustible nucléaire » qui fait « bouillir la marmite ».

En effet, l'uranium naturel, matière première pour la fission, est depuis plusieurs dizaines d'années, totalement importé. Les fournisseurs sont nombreux mais, parmi les principaux, Kazakhstan, Niger, Ouzbékistan, Australie, Canada, trois présentent des risques géopolitiques. Mais, nous dit-on, la France possédant une usine d'enrichissement, une usine de retraitement et des usines de fabrication des combustibles, on pourrait être tranquille.

La réalité est beaucoup plus complexe.

En effet, le combustible des réacteurs en fonctionnement ou en perspective est constitué d'uranium enrichi de 3 à 5%. Il faut donc « enrichir » l'uranium dans des usines d'enrichissement par diffusion gazeuse ou par centrifugation et on s'aperçoit que, bien que la France possède une telle usine, on constate qu'il y a enrichissement en Russie d'uranium naturel envoyé par la France, d'uranium acheté par la France à un pays tiers et livré en Russie pour y être enrichi, d'uranium appauvri (issu des rejets de l'enrichissement de l'uranium naturel) exporté par la France en Russie pour être enrichi à son tour et enfin, ce qui n'est pas le moins scabreux par les problèmes qu'il pose, l'envoi en Russie de l'uranium issu du retraitement (donc pollué) pour y être enrichi, ce pays gardant l'uranium appauvri, sous-

produit de l'opération.

Enfin, indispensable pour EDF, la fabrication des assemblages de combustible dépend de 30% à 40% de Westinghouse.

L'objectif de cet article est d'évaluer :

- Les tonnages d'uranium qui sont livrés *directement* en France par le pays producteur, sous forme de *yellow cake* et subissent ensuite toutes les transformations, jusqu'à la mise sous forme d'assemblages ;
- Les tonnages d'uranium *naturel* qui transitent par un pays tiers, pour arriver en France sous forme d'uranium enrichi, gazeux ou solide, voire même d'assemblages combustibles réalisés à l'étranger ;
- Les opérations d'enrichissement en Russie de l'uranium *appauvri* d'EDF ;
- Les opérations d'enrichissement de l'uranium de *retraitement* d'EDF et d'Orano en Russie.
- La *fabrication* des assemblages combustibles, assurée en partie à l'étranger.

Sera ainsi établie la triple dépendance, totale ou partielle, en *approvisionnement* d'uranium naturel, en *enrichissement* de l'uranium naturel, de l'uranium appauvri et de l'uranium de retraitement et, en *fabrication* des assemblages combustibles.

Cet article est dédié à la mémoire d'André Guillemette, membre de Global Chance et de l'ACRO, expert des questions liées au retraitement des combustibles irradiés et à l'industrie du plutonium, auteur de plusieurs articles sur ces sujets, notamment en collaboration avec Jean-Claude Zerbib, publiés sur le site de Global Chance (www.global-chance.org).

1. LES DIFFERENTS AVATARS DE L'URANIUM

L'**uranium naturel** est un élément chimique qui a trois isotopes : les uraniums 234, 235 et 238 notés ^{234}U , ^{235}U et ^{238}U .

Du point de vue de leur importance pondérale, caractérisée par le taux massique (poids de l'isotope/poids de l'uranium), c'est l' ^{238}U qui est dominant : 99,28% contre 0,72% pour l'uranium 235 et 0,0056% pour l'uranium 234. L'uranium 235 (^{235}U) est le seul des trois isotopes à être fissile : dans un milieu contenant suffisamment d'atomes d' ^{235}U , si un neutron pénètre dans un noyau de cet isotope, il produit une fission. La fission est une explosion du noyau qui produit deux « produits de fission » (atomes d'autres éléments plus légers) plus deux ou trois neutrons et libère une très forte quantité d'énergie sous forme de chaleur. Si le milieu considéré contient suffisamment d'atomes d' ^{235}U , les neutrons ainsi produits vont à leur tour provoquer d'autres fissions. C'est ce que l'on appelle la *réaction en chaîne*.

Un réacteur nucléaire est un appareil qui permet de réaliser la combinaison fission + réaction en chaîne de façon contrôlée, afin de produire de la vapeur à partir de la chaleur dégagée par les fissions. Cette vapeur entraîne une turbine et son alternateur pour produire l'électricité.

L'uranium constitue l'élément de base des combustibles de la grande majorité des réacteurs nucléaires pour la production d'électricité en fonctionnement dans le monde¹.

La production et la provenance de l'uranium naturel sont traitées au **Chapitre 2**.

Certains réacteurs nucléaires peuvent utiliser de l'uranium naturel comme combustible² mais la grande majorité des réacteurs dans le monde utilisent de **l'uranium enrichi**³ pour la production d'électricité d'origine nucléaire. Ce sujet est traité au **Chapitre 3**.

L'enrichissement de l'uranium produit des quantités très importantes **d'uranium appauvri**. Lorsque celui-ci est produit en France, il est entreposé et une partie est ré-enrichie (celle relative à l'enrichissement par diffusion gazeuse), notamment en Russie. Cette question est traitée au **Chapitre 4**.

Durant leur séjour dans le réacteur, les combustibles initiaux à uranium naturel ou enrichi, connaissent de profondes modifications avec la production des produits de fission, des nombreux isotopes du plutonium et des actinides mineurs (éléments n'existant pas dans la nature et plus lourds que le plutonium). Ainsi, les deux autres isotopes ^{234}U et ^{238}U , qui sont également soumis aux flux de neutrons, produisent par activation neutronique deux isotopes *fissiles*, qui donneront à leur tour, au fur et à mesure de leur formation, des fissions et de l'énergie : l' ^{234}U donne de l' ^{235}U et l' ^{238}U donne l' ^{239}U , qui produit, par décroissance, du neptunium 239 (^{239}Np), puis du plutonium 239 (^{239}Pu).

Actuellement, à part en France et en Russie à un degré moindre, le combustible irradié constitue le « déchet ultime ». En France est pratiqué le « retraitement » du combustible irradié, pour extraire le plutonium après un traitement chimique qui sépare l'uranium et le plutonium de l'ensemble « produits de fission et actinides mineurs ».

On obtient ainsi de **l'uranium de retraitement** qui peut être à son tour utilisé. Ce sujet est traité au **Chapitre 5**. Le plutonium issu du retraitement est utilisé pour fabriquer le combustible MOX (mélange d'oxyde d'uranium appauvri et d'oxyde de plutonium : voir **Annexe 1**).

Le **Chapitre 6** fait le point sur la nature et la fabrication des combustibles des réacteurs du parc d'EDF.

1 Dont les 56 réacteurs en fonctionnement du parc des centrales nucléaires d'EDF.

2 Comme les réacteurs à uranium naturel, graphite, gaz (UNGG) des premières centrales d'EDF.

3 C'est le cas de tous les réacteurs des centrales nucléaires d'EDF en fonctionnement (réacteur à uranium enrichi et eau sous pression (REP)).

2. LA PROVENANCE DE L'URANIUM NATUREL

L'uranium exploité dans les mines de surface ou souterraines, se trouve dans la roche, en liaison avec d'autres éléments chimiques, avec lesquels il forme principalement deux minerais : la pechblende (U_3O_8) et l'uranite (UO_2) généralement, la roche est broyée et traitée sur place à l'acide⁴ et la solution liquide obtenue est précipitée, puis filtrée, lavée et séchée, pour obtenir une pâte jaune orange appelée *yellow cake* (gâteau jaune) majoritairement constitué de l'oxyde U_3O_8 (0,849 g d'U par g). C'est la première étape du cycle de l'uranium et plusieurs autres opérations vont suivre dans des installations industrielles.

2.1 LA PRODUCTION D'URANIUM NATUREL EN FRANCE

La prospection de l'uranium conduite en France par le Commissariat à l'énergie atomique (CEA), dès sa création (18/10/1945), à l'initiative de Frédéric Joliot-Curie⁵, a permis d'extraire à partir de 1946 et *jusqu'à fin 2001*, un total de 75 965 tonnes d'uranium naturel (U_{nat}) extraites de 52 millions de tonnes de minerai, soit une teneur moyenne de 1,46 pour mille (1,46 kg d'U/ tonne de minerai).

Ce minerai a été extrait de plusieurs des 250 sites explorés, répartis sur 27 départements. L'importance de ces sites dans la production d'uranium est très inégale, car ils ont connu des activités plus ou moins étendues : exploration minière suivie ou non de l'extraction de minerais, du traitement de ces minerais (8 sites avec usines) et du stockage *in situ* des résidus de traitements réalisés sur le site même (16 sites) qui peuvent être à l'origine de pollutions des eaux, provoquées par le radium 226 et ses nombreux descendants⁶.

Le recensement de ces sites a été réalisé par l'IRSN qui, dès 2009, a rendu accessible l'ensemble des données disponibles, via une interface cartographique sur le site Internet de l'IRSN [IRS 2017],

La teneur en uranium des sites français exploités est faible par rapport aux teneurs des minerais exploités dans différents pays producteurs d'uranium. A cet inconvénient, il faut ajouter le fait que pour accéder au minerai d'uranium, il a fallu d'abord extraire environ 200 millions de tonnes de roches dites *stériles*, car contenant des teneurs trop faibles pour avoir une valeur économique (par référence au prix du marché et au coût des traitements), soit 3,4 tonnes de stériles par tonne de minerai. Il faut donc au total extraire 4,4 tonnes de roches, pour obtenir 1,46 kg d'uranium métal, soit *3,4 tonnes de roche à dégager par kg d'uranium*.

2.2 L'ORIGINE DES BESOINS EN URANIUM NATUREL DE LA FRANCE

Comme la France n'a plus de mine d'uranium ouverte sur le sol national depuis 2001, nous allons montrer comment Orano et EDF explorent deux voies pour obtenir cette matière nucléaire, nécessaire au fonctionnement des réacteurs nucléaires : *l'importer* depuis des États producteurs ou *l'extraire* de matériaux uranifères dont elle dispose.

Pour l'achat d'uranium naturel, sous forme d'uranate (*yellow cake*), la France procède à une

4 Les résidus de traitement des minerais d'uranium, qui renferment principalement les descendants de l'uranium 238 et notamment le radium 226 et ses descendants radioactifs, constituent alors un déchet radioactif qui pose de nombreux problèmes pour sa gestion vis-à-vis de la protection de l'environnement. Les résidus sont généralement enterrés sur place, à 8 à 10 m de profondeur.

5 « Si je le pouvais, je lancerais sur la France 2.000 prospecteurs ! Ils balaieraient systématiquement notre sol au compteur Geiger, du Pas-de-Calais aux Pyrénées : pas un indice d'uranium ne m'échapperait ! », phrase prononcée le 2 décembre 1945, par Frédéric Joliot-Curie, qui inaugurerait le premier stage de prospecteurs [COM 2017].

6 Le radium 226, de période radioactive de 1 600 ans, donne en se désintégrant 13 descendants radioactifs (seul le 14^{ème} est stable, le plomb 206), divers éléments chimiques qui pourront se fixer dans les milieux traversés par les eaux qui traversent la mine, en fonction de leurs affinités chimiques avec la nature des terrains rencontrés.

importation directe ou indirecte de cet uranium. L'importation est dite *indirecte*, lorsque l'uranium acheté à un État ne vient pas directement en France, mais est envoyé à un autre État, qui procédera à divers traitements physicochimiques de l'uranium avant de l'envoyer en France sous la forme d'uranium enrichi (voir Chapitre 3).

Le tableau 1 illustre pour les années 2009-2010 le tonnage d'uranium naturel importé *directement* en France à la Comurhex (environ 45%) et les tonnages importés *indirectement*, après traitements dans les installations des USA, du Canada et de la Russie, qui sont *majoritaires*.

Tableau 1 : Exemples d'importation directe et indirecte d'uranium en France

| Année | Comurhex [France] | Converdyn [USA] | Cameco [Canada] | Tenex [Russie] | Total |
|-------|-------------------|-----------------|-----------------|----------------|-------|
| 2009 | 3 640 [43,6%] | 1 325 | 1 940 | 1 445 | 8 350 |
| 2010 | 3 635 [47,7%] | 610 | 1 295 | 2 085 | 7 625 |

Sources : [LOU 2011]

2.3 L'IMPORTATION D'URANIUM NATUREL PAR LA FRANCE

De 2005 à 2020, Orano a importé de l'uranium naturel, concentré sous forme de "yellow cake" (uranate), de 14 pays. Sur cette période de 16 ans au cours desquelles 138 230 tonnes ont été acquises par la France (8 639 t/an en moyenne), la distribution a été par ordre d'importance [BRE 2022] :

- o Kazakhstan, 27 748 tonnes, 20,1% (1^{er} producteur mondial⁷),
- o Australie, 25 804 tonnes, 18,7% (3^{ème}),
- o Niger, 24 787 tonnes, 17,9% (5^{ème}),
- o Ouzbékistan, 22 197 tonnes, 16,1% (7^{ème}),
- o Namibie, 16 981 tonnes, 12,3% (4^{ème}),
- o Canada, 10 285 tonnes, 7,4% (2^{ème}),
- o Kirghizistan, 3 430 tonnes, 2,5%,
- o Afrique du Sud, 2 937 tonnes, 2,1% (12^{ème}),
- o Ukraine, 2 238 tonnes, 1,6% (9^{ème}),
- o Brésil, 1 037 tonnes, 0,75% (18^{ème}),
- o République tchèque, 687 tonnes, 0,50% (27^{ème}),
- o États-Unis, 59 tonnes, 0,043% (10^{ème}),
- o Hongrie, 39 tonnes, 0,028% (23^{ème}),
- o Slovaquie, 256 kilogrammes.

Orano produit actuellement, dans des mines acquises dans le pays, 45% de l'uranium qui provient du Kazakhstan⁸, ainsi que du Canada (30 %) et du Niger (25 %) [BRE 2022] soit 15,7% de l'uranium importé. Les droits de propriété sur des gisements d'uranium (Kazakhstan, Canada, Niger, ...) représentaient en 2018 une capacité totale de l'ordre de 230 000 tonnes (soit environ 30 ans de consommation nationale).

La fourniture d'U_{nat} semble très large, du point de vue de la répartition géographique des quatorze pays fournisseurs, cependant les quatre principaux pays ont fourni, à eux seuls, près des trois quarts du total de l'uranium importé (72,8%), et les six premiers pays 92,5%.

La très grande majorité de l'uranium utilisé en France provient donc de *six pays*.

⁷ Classement des États du monde par production d'uranium, par Atlasocio.com 07/10/2019.

⁸ L'entreprise Orano est présente via sa filiale Katco, qu'elle détient à 51% tandis que 49% sont détenus par l'entreprise kazakhe Kazatomprom. Orano aurait également acquis un nouveau gisement en juillet 2019 à Kanjugan [ORA 2019], [GRE 2022].

Par ailleurs, comme le précise Pierre Breteau, parmi les fournisseurs majeurs de la France, le Kazakhstan, le Niger et l'Ouzbékistan (54,1% de l'U importé) ne sont pas des pays que l'on peut considérer comme des modèles de stabilité politique [BRE 2022].

Nous allons voir qu'en matière d'uranium, les échanges de la France avec la Russie sont importants et diversifiés, mais bien que cet État soit le 6^{ème} producteur mondial d'U_{nat}, il ne figure pas dans la liste des 14 pays qui fournissent de l'uranium *naturel* à la France, depuis 2005.

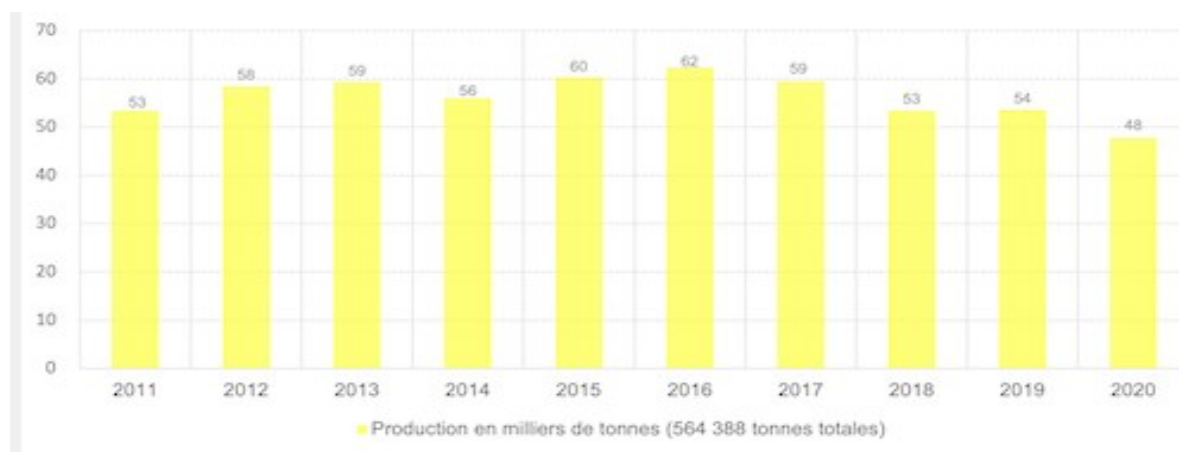
2.4 LES RESSOURCES MONDIALES EN URANIUM NATUREL

Selon l'Agence internationale pour l'énergie atomique (AIEA), début 2019, les ressources d'uranium répertoriées dans le monde s'élevaient à 8 070 400 tonnes d'uranium métal [AIE 2021]. Cependant ces évaluations sont fonction du prix du kg d'uranium extrait. Les huit millions de tonnes sont les réserves estimées pour un coût de 240\$ US du kilogramme d'uranium extrait. Pour 80\$/kg les ressources sont ramenées de huit à deux millions de tonnes [OEC 2020].

Le tableau 2 montre que la production mondiale d'uranium fluctue d'année en année avec en moyenne 56 439 tonnes pour la période 2011-2020. En 2018, la France occupait le 2^{ème} rang en consommation d'uranium naturel avec 14,1% de la production mondiale¹ derrière les États-Unis (28,6%).

Tableau 2 : Évolution de la production mondiale en uranium nature

| Année | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Tonnage | 53 493 | 58 493 | 59 331 | 56 041 | 60 304 | 62 379 | 59 462 | 53 498 | 53 656 | 47 731 |



Source : Atlasocio.com⁹, 07/10/2019

Les chiffres des ressources mondiales et de la production annuelle d'U_{nat} montrent que, s'il ne survient pas des *risques politiques planétaires* imprévus, affectant plusieurs *États importants producteurs*, l'approvisionnement de la France¹⁰ (environ 8 000 tonnes d'U_{nat}/an soit 13 % à 14% de la production mondiale) ne présente pas de risques particuliers pour les décennies à venir.

Si les ressources mondiales rassurent, *les risques politiques sont présents depuis février 2022* avec l'invasion russe de l'Ukraine, car deux de nos principaux fournisseurs d'uranium (Kazakhstan et Ouzbékistan) sont proches de la Russie, laquelle est également le 6^{ème}

⁹ Atlasocio.com 07/10/2019.

¹⁰ Par exemple, en 2014 et 2015, la France a importé 7 863 et 7 704 tonnes d'U_{nat}, tonnages représentatifs de ses besoins annuels moyens.

producteur mondial d'uranium et fabrique 17% du combustible nucléaire [SHA 2021].

Un combustible sur trois utilisé dans le monde comporte de l'uranium enrichi par Rosatom¹¹ [MEY 2022], et dès mars 2022, la Russie menaçait de cesser ses exportations en réponse aux sanctions occidentales, ce qui a fait flamber les prix.

Selon les experts de l'AIEA, au niveau mondial, les ressources d'uranium connues permettent de couvrir la demande sur une période d'environ **118 ans** si la consommation se maintient au rythme actuel, voire plus, si l'on tient compte des ressources non découvertes [Gaspar 2018] Cependant, des contraintes économiques peuvent apparaître avec des variations brutales du coût de l'uranium.

Au cours des 25 dernières années, le prix en dollar US du kg d'uranium est passé de **20** en l'an 2000 à **300 \$/kg** d' U_{nat} en 2007, avant de replonger en dessous de 50\$/kg (41 \$/kg en 2016) comme le montre la figure suivante [GAS 2018].

Mais depuis l'invasion de l'Ukraine, les prix ont augmenté de nouveau et la Russie *qui contrôle 35% de l'offre mondiale en uranium enrichi*, menace de cesser ses exportations en réponse aux sanctions occidentales. Une menace qui a fait grimper les prix [JUL 2022].

Figure 1 : Évolution du prix de l'uranium sur 20 ans, Source : [Gaspar 2018]



Nota : en ordonnée, dollar États-Unis/kg.

2.5 MODALITÉS D'APPROVISIONNEMENT DE L'URANIUM NATUREL

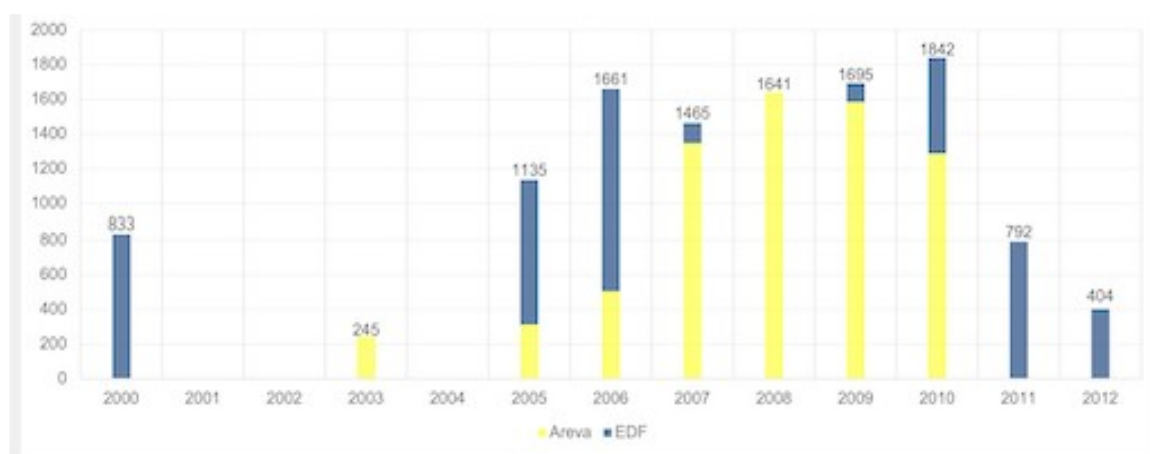
Areva et EDF ont procédé à l'importation *indirecte* de **11 713** tonnes d'uranium naturel via la Russie, [LOU 2011], [LOU 2013]. Le tableau 3 donne l'évolution de 2000 à 2012 de l'exportation vers la Russie, de l'uranium naturel acheté à ses différents États fournisseurs.

Comme EDF utilise en moyenne 1 030 t/an de combustible UNE et 111 t/an de MOX (moyenne 2010-16 [HCT 2018]), les 11 713 t d' U_{nat} , exportées en Russie en 13 années pour y être enrichies, représentaient les besoins français de près de 1,8 année de fonctionnement des réacteurs d'EDF.

Tableau 3 : Uranium naturel exporté en Russie par la France à des fins d'enrichissement en ^{235}U (tonnes)

11 Créé en 2007, Rosatom est le bras armé de l'État russe avec son poids dans l'extraction d'uranium, la fabrication de combustibles, la construction l'exploitation et la maintenance de centrales nucléaires, le démantèlement et la gestion des déchets nucléaires.

| Année | Areva | EDF | Total |
|--------------|--------------|--------------|---------------|
| 2000 | 0 | 833 | 833 |
| 2001 | 0 | 0 | 0 |
| 2002 | 0 | 0 | 0 |
| 2003 | 245 | 0 | 245 |
| 2004 | 0 | 0 | 0 |
| 2005 | 312 | 823 | 1 135 |
| 2006 | 505 | 1 156 | 1 661 |
| 2007 | 1 347 | 118 | 1 465 |
| 2008 | 1 641 | 0 | 1 641 |
| 2009 | 1 586 | 109 | 1 695 |
| 2010 | 1 287 | 555 | 1 842 |
| 2011 | 0 | 792 | 792 |
| 2012 | 0 | 404 | 404 |
| Total | 6 923 | 4 790 | 11 713 |



Sources : [LOU 2011] et [LOU 2013]

3. L'URANIUM ENRICHI

3.1 L'ENRICHISSEMENT DE L'URANIUM

Le combustible des réacteurs des centrales nucléaires d'EDF en France est constitué d'uranium enrichi au taux de 3 à 5% (3,7% dans la majorité des réacteurs).

Comme l'isotope ^{235}U , qui produit des fissions et de l'énergie, a une faible teneur dans l'uranium naturel (0,72%), cette teneur est augmentée artificiellement par des techniques physiques¹² d'enrichissement par *diffusion gazeuse* puis par *centrifugation*. Ces deux techniques d'enrichissement utilisent, de façons différentes, la légère différence de masse qui existe entre les isotopes 235 et 238 de l'uranium.

L' U_3O_8 (*yellow cake*) est dissous dans de l'acide, puis purifié en le séparant des impuretés qui l'accompagnent, car elles constituent des poisons neutrophages.

Après des opérations de précipitation-calcination, l'uranium est mis sous la forme de trioxyde d'uranium (UO_3), une poudre qui est hydro-fluorée à l'acide fluorhydrique pour donner du tétrafluorure d'uranium UF_4 , une substance *granuleuse* de couleur verte.

Ces opérations sont faites à Malvési¹³ (Orano), qui est une usine de raffinage et de conversion du *yellow cake* pour amener l' U_3O_8 sous la forme de tétrafluorure d'uranium (UF_4). Elle est située à Narbonne, dans la zone industrielle de Malvési.

L' UF_4 produit est ensuite transporté par voie ferroviaire au Tricastin, à l'usine d'Orano Philippe Coste¹⁴ (8900 tonnes produites en 2022).

La capacité annuelle installée de Malvési est d'environ **15 000 tonnes**¹⁵.

Au contact du fluor gaz, UF_4 donne de l'hexafluorure d'uranium (UF_6). En chauffant cet UF_6 , l'on obtient une forme *gazeuse* de l'uranium, qui se prête aux techniques d'enrichissement isotopique (diffusion gazeuse ou centrifugation). L'usine *Philippe Coste* (Orano), qui a pris la suite de la Comurhex¹⁶, est dédiée à la fluoration de l' UF_4 pour produire de l' UF_6 , (cristaux gris à température ambiante) forme qui permet après chauffage de passer en phase gazeuse afin d'être enrichi dans l'usine Georges Besse II (GB II). Elle a été mise en service fin 2018.

L'usine devrait atteindre à terme une *capacité de production nominale*¹⁷ de près de **15 000 tonnes** d' UF_6 à partir de l' UF_4 provenant de l'établissement Orano de Malvési.

Une fois enrichi sous forme gazeuse, l'uranium est mis sous la forme de dioxyde d'uranium (UO_2) car sa température de fusion (2847°C) est 2,5 fois plus élevée que celle de l'uranium métal (1132°C). L' UO_2 protège donc mieux le combustible du risque de fusion que l'uranium métal, dans le cas d'une élévation accidentelle de la température du cœur du réacteur. Cette opération se fait par voie sèche¹⁸ (la plus utilisée) ou par voie humide, pour fabriquer les pastilles frittées, rectifiées et empilées dans les 264 crayons combustibles de l'assemblage.

L'uranium appauvri sous forme d' UF_6 sera converti sous la forme d' U_3O_8 pour l'entreposer.

12 Comme tous les isotopes de l'uranium ont le même nombre de protons dans leur noyau (92), ils ont les mêmes propriétés chimiques, ce qui fait obstacle à une séparation de mode chimique.

13 Malvési a été exploitée par la Comurhex avant d'entrer en 2014 dans le Groupe Areva, puis Orano.

14 « Philippe Coste » est le nom de la nouvelle usine de conversion du Tricastin. P. Coste fut le 1er président fondateur de Comurhex.

15 Rapport annuel d'activité 2022 d'Orano (page 36/348).

16 La Comurhex a cessé son activité industrielle fin décembre 2017, après 55 ans de production industrielle.

17 Rapport annuel d'activité 2022 d'Orano (page 36/348).

18 Technique qui ne met en œuvre que des réactions gaz-gaz ou solide-gaz. L' UF_6 est vaporisé par chauffage dans une étuve et mis en présence de vapeur d'eau surchauffée pour former l' UO_2 .

3.2 L'ENRICHISSEMENT DE L'URANIUM NATUREL ACHETÉ PAR LA FRANCE

Nous avons fait au chapitre précédent le point sur l'uranium naturel acquis par la France. De 2005 à 2020, ces achats ont concerné 14 pays producteurs et majoritairement six¹⁹ d'entre eux (92,5%), qui sont aussi les premiers États producteurs dans le monde [ZER 22].

Une partie de cet uranium est exportée par le pays producteur *directement* en France pour y être raffinée puis traitée, afin de produire, après plusieurs traitements chimiques, de l'hexafluorure d'uranium (UF₆) qui sera enrichi dans l'usine Georges Besse II (GBII) au Tricastin. Nous allons évaluer la part des apports français, dans l'ensemble des besoins annuels en uranium d'EDF, afin de fabriquer environ un millier de tonnes d'assemblages combustibles.

Le reste de l'uranium acheté aux pays producteurs, est adressé à la société russe Tenex, filiale de Rosatom²⁰, qui va le traiter chimiquement, puis l'enrichir, avant d'en livrer à la France une partie sous forme d'UF₆ enrichi et une autre, sous forme d'UO₂.

Mais comme nous allons le voir dans notre bilan pluriannuel, cette fraction de l'uranium enrichi (UF₆) est minoritaire devant celle qui arrive de Russie sous forme d'UO₂.

Si les données relatives à l'uranium sous forme d'UF₆ enrichi sont publiées, celles concernant l'UO₂ enrichi, inséré ou non dans des assemblages, sont inconnues.

En matière d'information, l'exportation *indirecte* est source d'*opacité totale*.

Nous pouvons dire cependant que si la France *n'achète pas* officiellement de l'uranium naturel à la Russie²¹, elle utilise de manière importante, à la fois ses capacités de *transformations chimiques* et celles d'*enrichissement* de l'uranium qui sont au niveau mondial, les plus importantes (27,7 millions d'UTS, 46% des capacités mondiales et 3,7 fois la capacité de l'usine GBII) [WIK 22].

3.3 L'URANIUM ENRICHI IMPORTÉ DE RUSSIE

Si de 2000 à 2012, Areva et EDF n'ont pas acheté d'uranium naturel à la Russie, ils ont procédé à l'exportation *indirecte* de **11 713** tonnes d'uranium *naturel* et importé directement **7296** tonnes d'uranium *enrichi*, probablement²² sous la forme d'UF₆ dont **6 398** tonnes d'UNE, produites à partir d'uranium naturel russe et importées *directement* de Russie.

Comme la Russie utilisait l'enrichissement par centrifugation, les 11 713 tonnes d'Unat exportées en Russie ont pu produire **1,85** tonne d'UNE à 3,7% en ²³⁵U.

Le tableau N°4 décline les importations *directes* (uranium naturel russe enrichi en Russie) et *indirectes* d'uranium enrichi (U_{nat} acheté à un pays tiers et livré à la Russie pour être enrichi), par Areva et EDF, de 2000 à 2012.

19 Kazakhstan (20,1%), Australie (18,7%), Niger (17,9%), Ouzbékistan (16,1%), Namibie, (12,3%), Canada (7,4%), pour un total de 138 230 tonnes en 16 années [BRE 22].

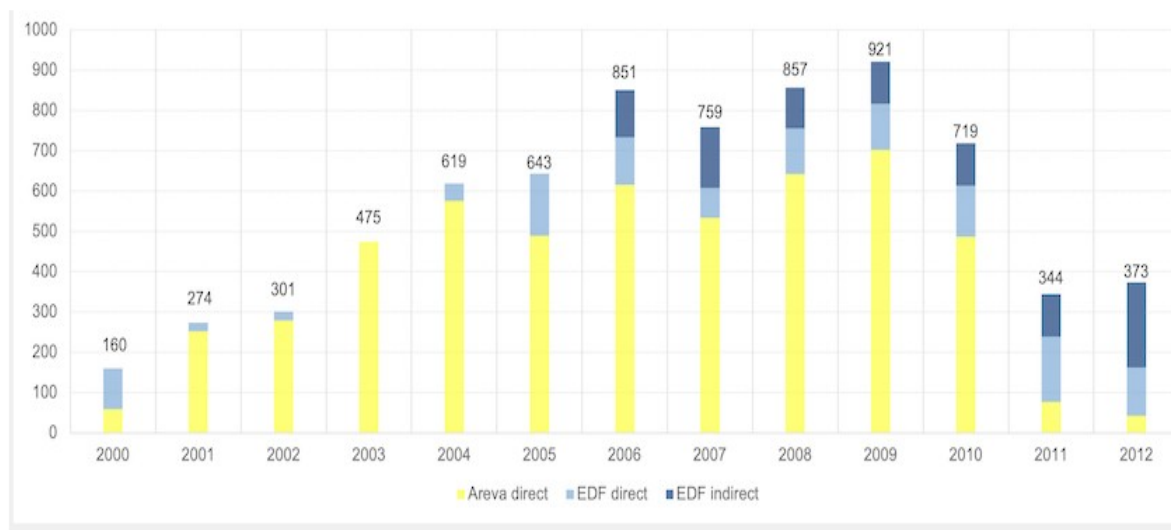
20 Créée par Vladimir Poutine le 1^{er} décembre 2007, Rosatom qui dispose de 276 100 employés et de plus de 350 entreprises (2020) est le bras armé de l'État russe, avec sa présence dans tous les maillons du cycle nucléaire, depuis l'extraction de l'uranium, ses conversions chimiques, son enrichissement, la fabrication de combustibles, la construction, l'exploitation et la maintenance de centrales nucléaires, le démantèlement et la gestion des déchets nucléaires.

21 L'osmose des relations que la Russie entretient avec le Kazakhstan et l'Ouzbékistan ne permet pas d'avoir des certitudes.

22 Le conditionnement de l'uranium enrichi n'est pas précisé dans les publications [LOU 2011], [LOU 2013].

Tableau 4 : Tonnage d'uranium naturel enrichi importé de Russie par la France (tonnes)

| Année | Areva direct | EDF direct | EDF indirect | Total |
|-------|--------------|------------|--------------|--------------|
| 2000 | 59 | 101 | 0 | 160 |
| 2001 | 252 | 22 | 0 | 274 |
| 2002 | 279 | 22 | 0 | 301 |
| 2003 | 475 | 0 | 0 | 475 |
| 2004 | 575 | 44 | 0 | 619 |
| 2005 | 489 | 154 | 0 | 643 |
| 2006 | 616 | 117 | 118 | 851 |
| 2007 | 533 | 75 | 151 | 759 |
| 2008 | 642 | 113 | 102 | 857 |
| 2009 | 702 | 114 | 105 | 921 |
| 2010 | 487 | 126 | 106 | 719 |
| 2011 | 77 | 162 | 105 | 344 |
| 2012 | 43 | 119 | 211 | 373 |
| Total | 5 229 | 1 169 | 898 | 7 296 |



Sources : [LOU 2011], [LOU 2013]

Comme EDF utilise en moyenne 1 030 t/an de combustible UNE et 111 t/an de MOX (moyenne 2010-16) [HCT 2018], les 7 296 tonnes d'UNE importées représentaient sept années de fonctionnement du parc des réacteurs d'EDF.

Selon Greenpeace [GRE 2022], la France aurait importé 8 213 tonnes d'uranium enrichi entre 2000 et 2020, soit 917 tonnes de plus que notre bilan. Est-ce que ce déficit est en lien avec le contrat signé par Cogema avec la Russie ?

Le premier contrat d'achat d'uranium enrichi à la Russie avait été réalisé par Cogema en mars 1999 en signant un accord avec le représentant commercial du Ministère russe de l'Energie Atomique, pour l'achat de l'uranium *hautement enrichi* (> 90%) issu du démantèlement des armes nucléaires russes.

Cogema était associée dans cette opération à Cameco, producteur canadien d'uranium et à Nukem Inc., filiale américaine d'une société allemande de négoce et d'ingénierie. Cet accord commercial avait été approuvé par les deux gouvernements russe et américain. Il prévoyait la dilution en Russie, avant la livraison aux États-Unis, de 500 tonnes d'U hautement enrichi afin d'obtenir un uranium utilisable dans les réacteurs nucléaires [COG 1999]. Près de 100 000 tonnes, devaient en principe être vendues à Cameco, Cogema, et Nukem [LES 1999].

Mais depuis ces annonces, Cogema et Areva n'ont plus communiqué sur l'utilisation ou la vente de cet uranium enrichi obtenu par dilution d'uranium hautement enrichi avec de l'uranium naturel pour fournir un uranium enrichi adapté aux réacteurs nucléaires.

3.4 LE PROJET D'ACCROISSEMENT DES CAPACITÉS D'ENRICHISSEMENT EN FRANCE

Orano lance en 2023 le projet de construction d'une extension des installations de Georges Besse II (+3,5 millions d'UTS) au coût estimé de 1,3 à 1,8 milliard d'euros [MAN 23] avec un début de mise en service de l'extension en 2028 [LIN 23]. La concertation préalable sur le projet d'extension de cette usine a eu lieu du 1^{er} février au 9 avril 2023, sous l'égide de la Commission Nationale du Débat Public.

Le choix d'Orano est surtout guidé par la situation internationale, provoquée par l'invasion russe de l'Ukraine. L'Europe comme les États-Unis, recherchent des capacités d'enrichissement de l'uranium afin de ne plus dépendre de celles de la Russie et Orano pense pouvoir répondre à cette demande avec l'extension de GBII. Selon Orano, en 2022, les indicateurs de marché de l'enrichissement et de la conversion ont été impactés par la crise russo-ukrainienne : les prix spot de l'UTS et de la conversion ont plus que doublé²³ fin 2022 par rapport à fin 2021.

Mais la course est ouverte avec URENCO (18 millions d'UTS) qui envisage également des extensions pour capter ce nouveau marché [GOD 23].

23 Selon la moyenne des indicateurs, le prix de référence spot de l'UTS est passé de 56 \$US/UTS fin 2021 à 118 \$US/UTS fin 2022. Le prix spot de la conversion est passé de 16 \$US/kg d'U fin 2021 à 40 \$US/kg d'U fin 2022.

4. L'URANIUM APPAUVRI ET SON ENRICHISSEMENT

4.1 L'URANIUM APPAUVRI ENTREPOSE EN FRANCE

L'uranium appauvri issu de l'enrichissement de l'uranium naturel réalisé en France est entreposé principalement²⁴ sous la forme d' U_3O_8 et conditionné dans des conteneurs métalliques scellés et peints (désignés *cubes verts* par l'ANDRA), de 3 m³ de volume et d'une contenance moyenne de 7 tonnes d'uranium. Ces containers sont empilés sur trois rangées dans des entrepôts, sur deux sites d'entreposage.

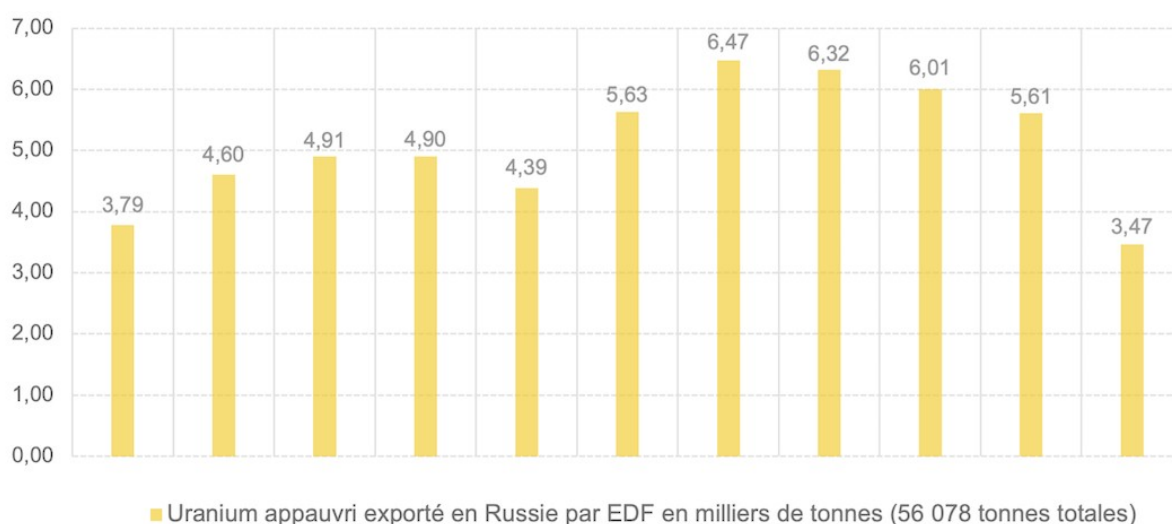
L'évolution de ce tonnage d'uranium appauvri est présentée par le tableau N°5. Le tonnage total de 320 000 tonnes fin 2020, permettrait d'extraire 13 000 tonnes d'URE à 3,7%, soit la valeur de plus de 12 années de chargement du parc nucléaire d'EDF actuel.

Le tableau N°5 montre un accroissement annuel moyen du tonnage d'uranium appauvri (2010-2020) de 4 791 t/an, au lieu des 8 000 à 9 000 tonnes produites annuellement.

Cet écart prouve bien qu'une partie importante de cet uranium appauvri a été utilisée, principalement pour un ré-enrichissement en ²³⁵U en Russie et pour une bien plus faible partie, dans la fabrication du MOX²⁵.

Tableau 5 : Tonnage d'uranium appauvri entreposé en France

| Année | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Tonne | 271 300 | 276 300 | 283 600 | 290 000 | 291 450 | 299 170 | 309 600 | 314 800 | 318 300 | 321 200 | 321 200 |



Sources : [AND 2012] à [AND 2022], [LOU 2011], [LOU2013], [DGE 2020], [DGE 2022]

²⁴ Une petite partie se trouve sous la forme d' UF_6 dans des conteneurs cylindriques.

²⁵ De 1987 à 2020, EDF a déchargé 2 350 tonnes de MOX irradiés [AND 2022], qui renfermaient environ 2 200 t d'uranium appauvri, soit 0,68% du stock d'uranium appauvri en 2020.

4.2 L'ENRICHISSEMENT DE L'URANIUM APPAUVRI EN RUSSIE

Tableau 6 - Uranium appauvri exporté en Russie par EDF pour enrichissement en ²³⁵U

| Année | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2000 - 2010 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| Tonnes | 3 785 | 4 600 | 4 905 | 4 903 | 4 385 | 5 626 | 6 474 | 6 315 | 6 006 | 5 610 | 3 469 | 56 078 |

Sources : [LOU 2011] et [LOU 2013]

Le tableau N°6 montre que de 2000 à 2010, EDF a exporté **56 078** tonnes d'uranium appauvri, en Russie, pour y être enrichi par la technique d'enrichissement par centrifugation. Ces 56 078 tonnes d'uranium appauvri, qui proviennent des rejets de l'enrichissement par diffusion gazeuse (taux de rejet voisins de 0,30%) ont été mises sous forme d'UF₆ pour assurer en Russie l'enrichissement en ²³⁵U par centrifugation gazeuse. Ce tonnage permet de produire environ 2 370 tonnes d'UNE à 3,7% en ²³⁵U avec un taux de rejet de 0,15% en ²³⁵U. Nous avons indiqué en 3.3 le tonnage global d'uranium enrichi importé de Russie, car nous ne disposons pas de données permettant de séparer les tonnages qui proviennent de l'U_{nat} enrichi, de ceux de l'enrichissement de l'uranium appauvri, voire de l'achat direct d'uranium enrichi à la Russie par la France.

Ainsi, environ 56 000 tonnes d'uranium appauvri, issues de la première usine d'enrichissement par diffusion gazeuse²⁶, pour lesquelles le taux de rejet était de 0,3% environ, ont été ré-enrichies en 2010, par Tenex pour EDF. Ce tonnage avait permis de produire environ 2 370 tonnes d'uranium naturel enrichi à 3,7% en ²³⁵U, avec un taux de rejet de 0,15% en U.

4.3 LE POTENTIEL D'ENRICHISSEMENT DU STOCK D'URANIUM APPAUVRI

L'enrichissement de l'uranium naturel se faisait en France au moyen du procédé de diffusion gazeuse, avec un taux de rejet en ²³³U piloté par le coût de l'uranium sur le marché international. La valeur moyenne de ce taux de rejet était proche de 0,30%.

La technique de centrifugation gazeuse, qui consomme 50 fois moins d'énergie électrique²⁷ (part importante du coût des opérations d'enrichissement) que la diffusion gazeuse, permet avec la même logique économique que précédemment *taux de rejet* piloté par le coût de l'uranium²⁸, d'avoir des taux de rejet voisins de 0,15%. De ce fait, l'U_{nat} appauvri résultant de la diffusion gazeuse (majeure partie des 324 000 tonnes fin 2020, [AND 2022]), entreposé sur les deux sites de Bessines et du Tricastin, devient un *gisement potentiel* d'uranium.

Les 215 300 tonnes d'uranium appauvri, à teneur en ²³⁵U voisines de 0,30%, qui étaient disponibles depuis la première opération d'enrichissement de 2010, permettraient de produire environ 8 640 tonnes d'UNE, ce qui représente aujourd'hui plus de 12 années de besoins pour EDF. Cependant, depuis le premier ré-enrichissement du stock d'uranium appauvri (sous

26 Les besoins en énergie électrique de cette usine qui, à travail de séparation égal, consommait 50 fois plus que la centrifugation gazeuse, ne permettait pas, pour des raisons économiques, d'extraire l'isotope 235 au-delà de 0,3%. Fin 2010, 271 300 tonnes d'uranium appauvri étaient encore disponibles [AND 12].

27 Selon l'ASN, la puissance électrique nette est de 7,5 MW contre 300 MW, à production équivalente, soit une réduction d'un facteur 40 [ASN 2022].

28 Le coût de l'uranium enrichi dépend de deux paramètres : le coût de l'uranium naturel et de ses transformations et le coût de l'enrichissement. Si l'on veut extraire un maximum d'isotope 235 de l'U_{nat}, le coût de l'enrichissement va fortement peser sur le coût final de l'U enrichi. C'est un calcul financier basé sur les deux paramètres qui donne le taux résiduel d'uranium 235 à partir duquel l'on arrête l'extraction pour avoir l'uranium enrichi au meilleur coût. Ce taux est appelé *taux de rejet*. Dans ce modèle économique la réduction du *coût financier* l'emporte donc sur l'économie de *matière*.

forme d' U_3O_8), effectué en Russie voici 13 années, EDF ne semble pas vouloir privilégier cette voie, qui nécessite préalablement à l'enrichissement, toutes les conversions chimiques qui permettent de passer de l' U_3O_8 (forme sous laquelle se trouve l'uranium appauvri entreposé) à l' UF_6 .

Est-ce que l'arrêt du ré-enrichissement du stock d'uranium appauvri est dû au *coût des opérations chimiques*, devant celui de l'uranium naturel relativement bas²⁹ ?

Est-ce les capacités limitées des installations françaises de *conversions chimiques* de l'uranium qui empêchent cette reprise ?

Est-ce les capacités totales des installations GBII³⁰, atteintes en 2016, ne permettent pas l'enrichissement d'un tonnage significatif de l'uranium appauvri d'EDF ?

Nous n'avons pas de réponses précises à toutes ces interrogations mais nous avons vu en 3.4 que les installations françaises ne sont pas pleinement sollicitées³¹ et que le *coût des opérations* de conversion et d'enrichissement de l'uranium semble jouer un rôle majeur dans les choix industriels d'EDF.

29 Avec les coûts des conversions de l' U_{nat} , depuis le *yellow cake* jusqu'à l' UF_6 , l'on dispose de l' ^{235}U à 0,72% alors que la conversion de l'uranium appauvri, sous forme d' U_3O_8 , avec un coût assez proche, ne conduit qu'à de l' UF_6 à 0,30%. Ainsi, l'opération d'enrichissement de l'uranium appauvri, n'est pas financièrement intéressante lorsque le coût de l' U_{nat} est bas.

30 Areva a démarré en 2006 la construction de l'usine d'enrichissement par centrifugation Georges Besse II (GBII), en remplacement de l'usine de diffusion gazeuse Eurodif, qui était en service depuis 1978. En avril 2011, l'*unité Sud* de GBII a commencé à produire de l' U^{235} enrichi et l'*unité Nord* en mars 2013. Les installations de GBII ont atteint leur pleine capacité de production de 7,5 millions d'UTS en 2016 [OEC 23].

31 Selon le rapport annuel 2021 de l'ASN [ASN 2022], l'usine de Malvés (Aude) qui purifie le concentré minier (*yellow cake*) en UF_4 comme l'usine « Philippe Coste » (Tricastin) qui transforme l' UF_4 en UF_6 ont toutes deux une capacité de 15 000 tonnes par an. Une capacité qui est deux fois plus importante que les besoins français en matière d' U_{nat} comme d'uranium appauvri.

5. ENRICHISSEMENT DE L'URANIUM DE RETRAITEMENT

5.1 L'URANIUM DE RETRAITEMENT

L'uranium de retraitement (URT), obtenu lors des opérations de retraitement des combustibles irradiés, a un taux d'enrichissement résiduel en ^{235}U (0,9% à 1,1%) supérieur³² à celui de l'uranium naturel (0,72%). Il peut être envisagé d'enrichir cet uranium de retraitement, à des fins d'économie de matières premières.

Cependant, cet URT comporte un isotope artificiel, l'uranium 236 (^{236}U), produit par activation neutronique de l' ^{235}U , qui est *neutrophage*³³. La présence de cet isotope diminue l'efficacité du flux neutronique, aussi l'URT nécessite un enrichissement supérieur en ^{235}U à celui de l'uranium naturel pour un même usage (taux de 4,1% de l' ^{235}U de l'URT pour un équivalent à 3,7% en ^{235}U de l' U_{nat} enrichi). Le coût de l'enrichissement de cet uranium de retraitement, qui présente par ailleurs des contaminations, est donc augmenté par rapport à l'uranium naturel.

Pour cette raison, la Commission Castaing avait déclaré, que compte tenu des pénalités que présente cet uranium, le recyclage présente un intérêt limité [CAS 1982].

Notons également que l'URT pose des problèmes de *radioprotection*, car l'uranium 232, produit par les décroissances du plutonium 236 et de l'uranium 236, va créer du thallium 208 (^{208}Tl), un radionucléide qui émet de nombreux gammas d'énergies élevées, dont un gamma de 2,6 MeV émis à pratiquement 100%. De ce fait, à quantité et géométrie égales, une masse d'uranium de retraitement est environ 50 fois plus irradiante que celle de l'uranium naturel.

La baisse des coûts de l'enrichissement isotopique de l'uranium par centrifugation (diminution depuis 2010 du prix de l'UTS³⁴ d'un facteur 4 à 5), qui permet des taux de rejets moitié plus faibles que ceux de la diffusion gazeuse, a donné de l'intérêt au recyclage de l'URT (comme à la reprise des stocks d'uranium appauvri). Mais comme l'extraction chimique de l'uranium des solutions de dissolution des combustibles irradiés (pureté de 99,5% environ), ne permet pas d'éliminer la totalité des contaminations radioactives par des radionucléides émetteurs alpha et bêta-gamma, le recyclage de l'URT entraîne des *contaminations radioactives* des installations de conversion de l'uranium et de l'enrichissement par centrifugation.

Pour cette raison, l'URT n'a pas été enrichi en France, tant par diffusion gazeuse que par centrifugation, bien qu'Orano soutienne³⁵ que l'usine Georges Besse II avait adapté dès sa conception, une partie de son installation pour enrichir de l'uranium retraité. La Russie a pour sa part dédié des batteries de centrifugeuses à l'enrichissement de l'URT, qui sont inévitablement contaminées par des produits de fission, des plutoniums et des transuraniens. L'URT, sous forme de nitrate d'uranyle (NU), est transféré dans des citernes de La Hague vers l'installation TU5 de Pierrelatte (1 000 à 1 200 t/an), où s'opère la conversion du NU en

32 Ce taux va dépendre du taux de combustion atteint par le combustible retraité. Plus le taux de combustion est élevé, plus le taux résiduel en ^{235}U diminue. L'enrichissement résiduel en ^{235}U est de l'ordre de 0,7 % à 0,8 % pour des combustibles des réacteurs à uranium enrichi et eau sous pression (REP) pour des taux de combustion de 45 à 55 GWj/t.

Il faut donc privilégier l'enrichissement de l'uranium de retraitement (URE) des premiers combustibles irradiés retraités (30 à 40 GWj/t), car depuis 2008, les taux de combustion sont supérieurs à 45 GWj/t.

33 L'uranium 236 va produire de l'uranium 237 par activation neutronique et réduire ainsi le flux de neutrons qui produisent la fission nucléaire et donc la production d'énergie.

34 UTS = *Unité de travail de séparation*. Il faut environ 100 000 UTS pour produire le combustible nécessaire au fonctionnement pendant un an d'un réacteur PWR de 1000 MW de puissance électrique nette [CEA 2018], p. 50.

35 Véronique Le Billon, "EDF relance une filière de recyclage de son uranium usé", Les Échos, 11 septembre 2018 [LEB 2018].

U₃O₈ pour être entreposé.

C'est sous cette forme que l'uranium est envoyé en Russie³⁶, pour être converti en UF₆ puis enrichi en ²³⁵U. Cet uranium de retraitement enrichi (URE) revient en France sous forme UF₆ dans des conteneurs de type 30B. Il est ensuite mis sous la forme d'UO₂ pour réaliser les pastilles, puis les assemblages combustibles.

La Russie garde contractuellement l'URT *appauvri*, des conditions qui ont conduit EDF à faire enrichir l'URT en Russie, afin d'obtenir de l'URE tout en réduisant son stock d'URT, qui deviendra un déchet à gérer³⁷ s'il n'est pas enrichi [ASN 2021a].

5.2 COMBUSTIBLES URE ISSUS DE L'URT DANS LA CENTRALE DE CRUAS

Le tableau N°7 donne les tonnages d'URT *exportés* en Russie de 2000 à 2012, par Areva et EDF, pour être enrichis à 4,1% en ²³⁵U. Les 4 804 tonnes d'URT exportées en Russie ont dû permettre la production d'environ **650 tonnes** d'URE (taux de rejet de 0,15%). Les données trouvées ou *calculées* relatives aux combustibles URE confirment cet ordre de grandeur.

Une évaluation montre que c'est un total d'environ **633 tonnes** d'assemblages URE qui a été fourni par Areva à EDF [AREVA 2015], pour être chargé dans les réacteurs de la centrale EDF de Cruas³⁸, entre 1994 et 2013. Le tonnage total de combustible URE réellement utilisé est de **622 tonnes**, selon la DGE [DGE 2022], avec des maximums chargés dans les 4 réacteurs de la centrale de Cruas³⁹ entre 2010 et 2012 (72, 70 et 74 tonnes), ce qui correspond à environ 1/4 de cœur en URE.

Tableau 7 : Tonnage d'URT exporté en Russie par la France pour un enrichissement en ²³⁵U (tonne)

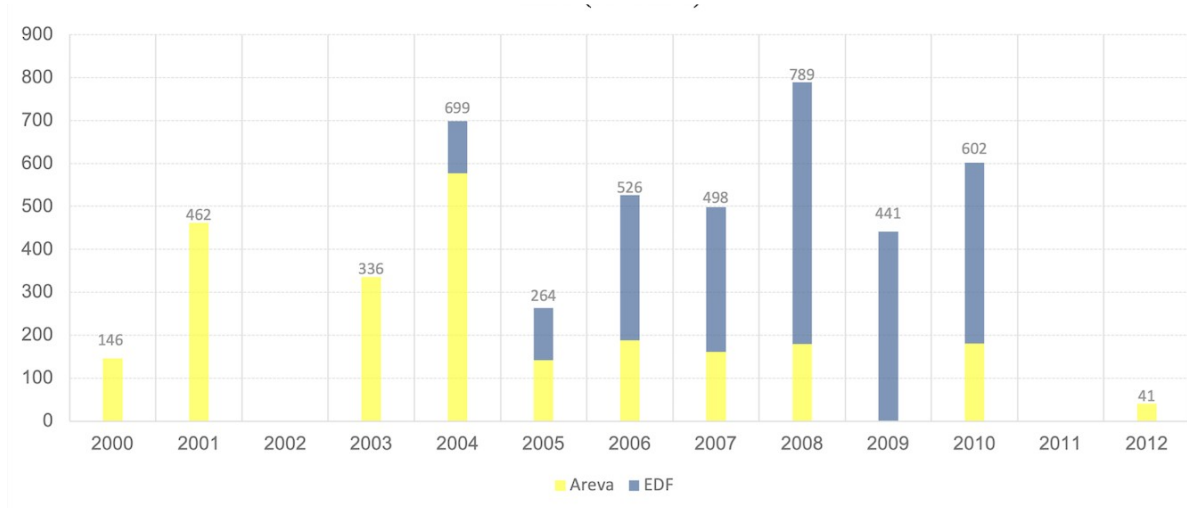
| Année | Areva | EDF | Total |
|----------------|--------------|--------------|--------------|
| 2000 | 146 | 0 | 146 |
| 2001 | 462 | 0 | 462 |
| 2002 | 0 | 0 | 0 |
| 2003 | 336 | 0 | 336 |
| 2004 | 577 | 122 | 699 |
| 2005 | 142 | 122 | 264 |
| 2006 | 188 | 338 | 526 |
| 2007 | 161 | 337 | 498 |
| 2008 | 180 | 609 | 789 |
| 2009 | 0 | 441 | 441 |
| 2010 | 181 | 421 | 602 |
| 2011 | 0 | 0 | 0 |
| 2012 | 41 | 0 | 41 |
| 2000-12 | 2 414 | 2 390 | 4 804 |

36 La société russe Tenex dispose de capacités d'enrichissement par centrifugation sur quatre sites. L'enrichissement de l'URT français a été réalisé sur le site de Seversk.

37 Comme EDF achète l'U_{nat} dont elle a besoin, le transforme, l'enrichi en ²³⁵U et traite ses combustibles irradiés, elle doit donc gérer l'uranium appauvri, les déchets vitrifiés et compactés ainsi que l'URT.

38 Les réacteurs Cruas N°3 et N°4 (915 MW) ont été chargés en URE, respectivement en 1993 et 1994. En 2009, ce sont les réacteurs N°1 et N°2 de Cruas qui l'ont été. Par rapport aux réacteurs de 900 MWe qui utilisent du combustible UOX classique, les réacteurs de Cruas disposent de 4 grappes de contrôle supplémentaires.

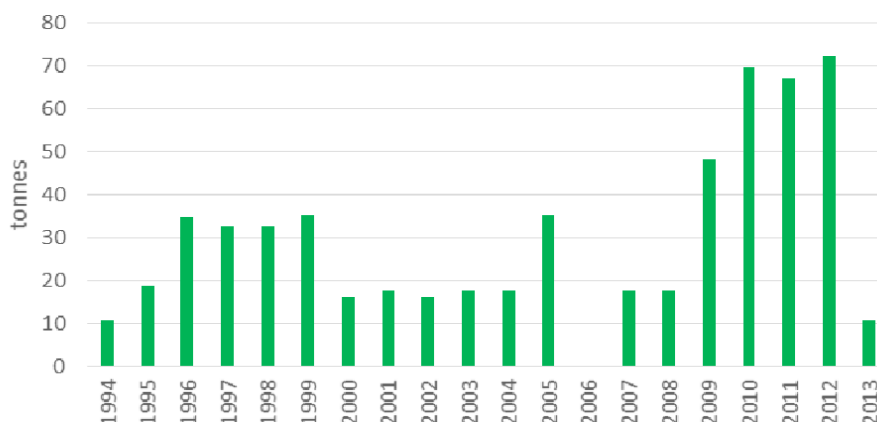
39 Selon le rapport annuel d'Areva de 2014, [AREVA 2015], 3 700 assemblages URE ont été fabriqués par Areva pour des clients européens dont environ 1 370 pour EDF à la fin 2014. Comme ces assemblages étaient chargés dans des réacteurs de 900 MW, la charge en uranium de ces assemblages est égale à 461,7 kg. Le tonnage total d'assemblages URE utilisé est donc d'environ 633 tonnes.



Sources : [LOU 2011] et [LOU 2013]

La figure 2, extraite du rapport du HCTISN sur le *Cycle du combustible français en 2018*, montre l'évolution du tonnage de combustible URE chargé dans les réacteurs EDF de Cruas.

Figure 2 : Quantité annuelle de combustible URE chargée à Cruas (de 1994 à 2013) [HCT 2018]



L'URT susceptible d'être enrichi, est celui des premières années de retraitement⁴⁰, car dès 2009, le taux de combustion moyen des combustibles retraités à La Hague, atteint puis dépasse les 45 GWj/t, ce qui entraîne d'une part le fait que la teneur en ²³⁵U de l'URT *décroit* et que, d'autre part, la teneur en uranium 236, poison neutronique, *augmente*.

Pour des combustibles irradiés à des taux de combustion égaux ou supérieurs à 45GWj/t, cette double évolution réduit alors fortement l'intérêt du recyclage de l'URT.

5.3 ÉVOLUTION DU STOCK D'URANIUM DE RETRAITEMENT (URT)

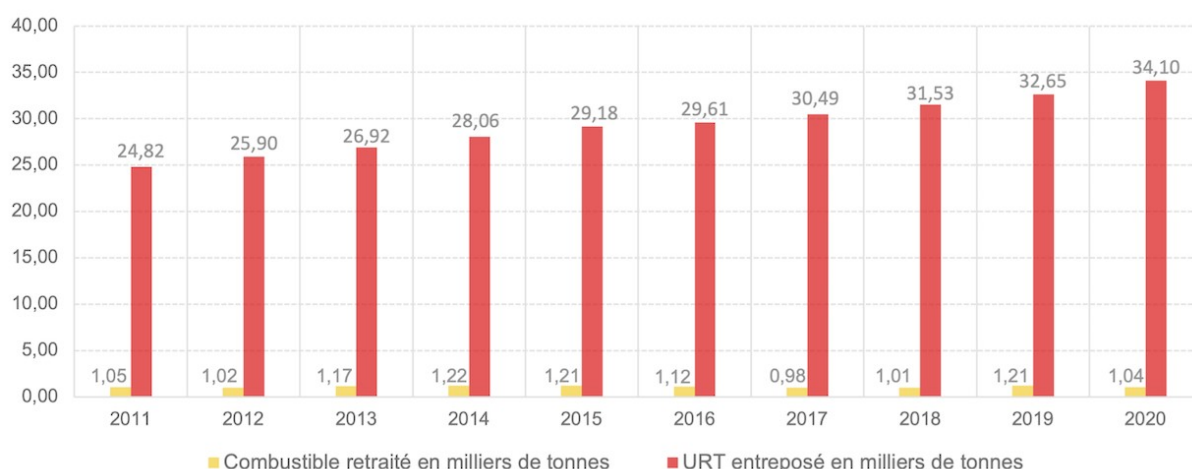
Le tableau 8 montre les évolutions du tonnage de combustibles retraités à La Hague et celle du tonnage d'URT entreposé en France, dans les années qui ont suivi les premiers envois en Russie de l'URT, pour être enrichi. De 2011 à 2020, il a été retraité à La Hague 11 022 tonnes de combustibles irradiés (1 102 t/an en moyenne) pour un accroissement du tonnage d'URT entreposé de 9 280 tonnes, soit 928 t/an en moyenne au lieu d'environ 1 047 t/an attendu.

⁴⁰ Notamment avant 1997, lorsque les taux de combustion étaient inférieurs à 30 GWj/t.

Ce déficit sur 10 ans d'environ 1 190 tonnes, montre que de l'URT a été *prélevé* sur l'entreposage durant la période 2011- 2020.

Tableau 8 : Tonnage retraité et tonnage d'uranium de retraitement entreposé en France

| Année | Tonnage retraité | Tonnage URT |
|-------|------------------|-------------|
| 2011 | 1 045 | 24 820 |
| 2012 | 1 024 | 25 900 |
| 2013 | 1 172 | 26 920 |
| 2014 | 1 217 | 28 063 |
| 2015 | 1 205 | 29 180 |
| 2016 | 1118 | 29 610 |
| 2017 | 983 | 30 490 |
| 2018 | 1 009 | 31 530 |
| 2019 | 1 214 | 32 650 |
| 2020 | 1 035 | 34 100 |



Sources : [ANDRA 2016], [ANDRA 2022], [DGEC 2020], [DGEC 2022], [Louet 2011] et [Louet 2013]

L'ONG Greenpeace avait découvert au port du Havre que plusieurs dizaines de tonnes d'uranium de retraitement français avaient été chargées à bord du navire Mikhail Lomonosov à destination de Saint-Petersbourg les 20 janvier et 12 février 2021 [Greenpeace 2021].

Émilie Massemin, journaliste à Reporterre, a interrogé l'entreprise Orano qui a reconnu avoir *vendu* plus de 1 000 tonnes d'URT⁴¹ à l'entreprise nucléaire russe Rosatom. [MAS 2021]. Une quantité d'URT qui explique les raisons du déficit d'environ 1 147 tonnes, que nous avons calculé.

5.4 REPRISE DES ACTIVITÉS D'ENRICHISSEMENT DE L'URT AVEC LA RUSSIE

Après l'arrêt des exportations de l'URT en Russie pour être enrichi, EDF déclarait avoir suspendu ce recyclage pour des raisons économiques, industrielles et *environnementales*.

⁴¹ Dans les contrats de retraitement de combustibles irradiés d'Orano avec ses clients étrangers, les conditions de retour des déchets compactés et vitrifiés ainsi que du plutonium ont été précisées, mais il n'a pas été prévu de renvoyer l'URT. Orano a donc intérêt à se séparer de l'URT, qui sera considéré comme étant un déchet si un usage n'est pas envisageable. Une preuve de plus sur le mythe national du recyclage des matières nucléaires.

Mais le 25 mai 2018, la société russe Tenex, filiale de Rosatom, a annoncé avoir signé un contrat (d'un montant de 600 millions d'euros), avec EDF pour recycler et enrichir de l'uranium issu du retraitement [AFP 2018].

En septembre 2018, Denis Lépée, directeur de la division combustible nucléaire à EDF, précisait un peu plus la raison de la suspension de 2012 : « *Nous avons recyclé l'uranium de retraitement de 1994 à 2013, avant d'arrêter suite à un process de traitement des effluents non satisfaisant* » [LEB 2018]. Il s'agissait là d'une explication d'EDF très diplomatique. La réalité de la gestion des effluents radioactifs, appelée hypocritement *process de retraitement* est plutôt inquiétante, car il s'agit d'une pollution directe de l'environnement :

Les résidus chimiques et radioactifs de la conversion et du ré-enrichissement étaient en fait **directement injectés dans le sous-sol des installations sous forme liquide** [GRE 2021].

Selon Greenpeace, il n'y a aujourd'hui, aucune garantie que cette procédure ait cessée [GRE 2021]. Les investigations dans ce complexe industriel sont impossibles, car il est situé dans la ville de Seversk, qui est une ville *fermée*⁴² de la région (oblast en russe) de Tomsk. Elle n'est accessible qu'à des visiteurs munis de permis spéciaux [WIK 2019].

Lors d'une réunion du HCTISN en janvier 2020, Mme Emmanuelle VERGER, Directrice de la Division combustible nucléaire d'EDF [VER 2020], confirmait qu'un contrat avait été signé en 2018 avec Tenex (site de Seversk en Russie), afin de relancer en 2023 l'usage des combustibles URE⁴³, et que la situation antérieure allait changer car des exigences fortes sur le respect de l'environnement ont été introduites dans ce contrat : recyclage à 99,5% de l'uranium présent dans les effluents, mise en place d'une installation de vitrification des effluents avant l'arrivée de l'URT, droit d'audit des installations de Seversk sur place par les équipes EDF, défluoration de l'uranium appauvri non utilisé, etc.

Mais il faudra qu'EDF et Tenex apportent les preuves concrètes de l'application réelle de ces nouvelles dispositions contractuelles respectueuses de l'environnement.

En octobre 2021, en enquêtant dans le port du Havre, Greenpeace découvre que l'enrichissement de l'URT par la Russie avait bien repris. Plusieurs dizaines de tonnes d'URT avaient été chargées à bord du navire *Mikhail Lomonosov* à destination de Saint-Pétersbourg les 20 janvier et 12 février 2021 [GRE 2021], [QUE 2021].

Puis, le 24 août 2022, Greenpeace constate sur le port de Dunkerque, que 52 conteneurs de type 30B⁴⁴ contenant de l'uranium enrichi (vraisemblablement de l'URE), ont été déchargés du cargo *Mikhail Dudin* en provenance de Saint-Pétersbourg.

Ces conteneurs ont été chargés dans des camions qui ont pris la direction de la vallée du Rhône, où se trouvent les sites nucléaires de Pierrelatte et de Romans-sur-Isère [GRE 2022a], [REP 2022].

Le commerce des matières nucléaires de la France avec la Russie a donc repris. Mais, est-ce bien selon le contrat de 2018 passé par Tenex avec EDF ?

C'est une opération commerciale qui, en août 2022, fait désordre, six mois après le début de la guerre menée par la Russie contre l'Ukraine, depuis le 24 février 2022.

42 Après la fin de l'URSS, il est resté des villes *fermées*, qui sont des villes insérées dans un complexe militaro-industriel. Elles comportent toujours des restrictions d'accès, de déplacement et de résidence et regroupent 1,5 million d'habitants. La ville de Seversk où se font les traitements physicochimiques de l'uranium pour la France s'appelait Tomsk7 jusqu'en 1992, et ne figurait pas sur les cartes. Trois autres oblasts disposent de villes fermées dans lesquelles se pratique l'enrichissement industriel de l'uranium

43 EDF veut relancer l'usage des combustibles URE en 2023 dans les 4 réacteurs de 900 MW de Cruas et à partir de 2027 dans 3 ou 4 réacteurs de 1300 MW jusqu'à fin 2033, la fin du contrat signé en 2018 avec la Russie (Tenex). Un contrat qui porte sur la *conversion*, l'*enrichissement* de l'URT et la *fabrication des assemblages* URE. Une utilisation qui conduira à utiliser 1300 tonnes d'URT par an [LEB 2018].

44 Les conteneurs 30B sont utilisés pour le transport de l'uranium enrichi en phase gazeuse (UF6).

Le Parlement européen a adopté le 1^{er} mars 2022 une *résolution* en 52 points [PAR 2022], qui devrait conduire à un réexamen des contrats commerciaux (notamment de celui de mai 2018 sur l'URT), dans la mesure où elle précise en son point 17/52 que : « *les ports de l'Union soient fermés aux navires russes; que l'accès à tous les ports de l'Union soit refusé aux navires dont le dernier ou le prochain port d'escale se trouve dans la Fédération de Russie, sauf en cas de raisons humanitaires justifiées* ».

6. LES COMBUSTIBLES DES RÉACTEURS D'EDF

6.1 EVOLUTION DU CHARGEMENT EN COMBUSTIBLE

Pour fabriquer les éléments combustibles des réacteurs des centrales nucléaires d'EDF, il faut de l'uranium naturel (U_{nat}), des installations nucléaires radiochimiques qui permettent de transformer, suivant plusieurs étapes, l'uranium sous forme de *yellow cake*⁴⁵ en hexafluorure d'uranium UF_6 , afin de l'enrichir en ^{235}U sous sa forme gazeuse. Une fois enrichi par la technique de centrifugation, il faut convertir l'uranium qui est sous la forme d' UF_6 , afin de produire de l'oxyde d'uranium UO_2 en poudre. Cette forme permet de fabriquer, par frittage à chaud (1700°C), des pastilles qui seront rectifiées à un diamètre précis, avant d'être insérées dans les gaines, constituant l'assemblage combustible.

Les tonnages de combustible nucléaire, à base d'uranium naturel enrichi (UNE) en uranium 235, chargés dans les réacteurs d'EDF, varient chaque année, par suite du déchargement de combustibles irradiés, qui ont atteint au bout de trois à quatre ans, le *taux de combustion* prévu (actuellement supérieur à 45 GWj/t) lesquels sont alors remplacés périodiquement par un chargement de combustibles neufs.

Le tableau 9 montre qu'en moyenne (2010-17), EDF charge 1032 tonnes par an de combustible à uranium naturel enrichi (UNE), associé ou non, avec les combustibles à uranium de retraitement enrichi (URE), et 112 tonnes d'assemblages MOX, soit un total de 1144 t de combustible neuf, en moyenne par an.

Tableau 9 : Tonnages des différents types de combustibles chargés dans les réacteurs d'EDF

| Année | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | Moyenne |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|---------|
| UNE | 967 | 1022 | 919 | 1021 | 1096 | 1023 | 938 | 1040 | 1003 |
| URE | 72 | 70 | 74 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 28 |
| MOX | 107 | 103 | 109 | 120 | 120 | 114 | 104 | 119 | 112 |
| Total (UNE+URE) | 1039 | 1092 | 993 | 1032 | 1096 | 1023 | 938 | 1040 | 1032 |
| Total (UNE+URE+ MOX) | 1146 | 1195 | 1102 | 1152 | 1216 | 1137 | 1042 | 1159 | 1144 |

De 2010 à 2017, le tonnage des combustibles MOX, chargés dans 22 réacteurs de 900 MW, représentait en moyenne 10% des combustibles chargés annuellement dans les réacteurs du parc EDF. Cette contribution va décroître significativement à partir de l'année 2017, avec la réduction progressive des tonnages d'assemblages MOX produits à Melox, et la part de ces assemblages fournie à EDF. La baisse du tonnage de combustible MOX fourni par Melox à EDF, s'est de nouveau fortement accentuée en 2021, comme le montre le tableau 10.

Comme la fourniture par Melox, de combustible MOX à EDF, a été significativement réduite depuis 2016, EDF a été autorisée, depuis 2018, à utiliser du combustible à uranium naturel enrichi (UNE), en lieu et place du MOX, dans les 22 réacteurs de 900 MW équipés pour utiliser ces assemblages.

⁴⁵ Le *yellow cake*, est un concentré d'uranium, de couleur jaune, qui renferme 70% à 75% d' U_{nat} sous forme, U_3O_8 . Plusieurs étapes de conversion, réalisées dans différentes installations industrielles radiochimiques, seront nécessaires avant d'obtenir de l' UF_6 en phase gazeuse, qui permet l'enrichissement de l' ^{235}U .

**Tableau 10 : Evolution du tonnage du combustible MOX fabriqué à Melox
et de celui fourni à EDF**

| Année | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 |
|-------------------------|-------|------|--------|--------|--------|--------|-------|------|------|------|------|
| MOX produits (t) | 138,6 | 150 | 135,76 | 129,69 | 127,71 | 113,55 | 103,4 | 80 | 73 | 79 | 51 |
| MOX EDF (t) | 118,1 | 94,6 | 114,65 | 114,65 | 120,11 | 103,73 | 103,7 | 76 | 71 | 71 | 38 |



Sources : [ASN 11] à [ASN 22].

Nota : le tonnage est celui du métal lourd (U et Pu) contenu dans l'assemblage neuf.

La réduction du tonnage d'assemblages MOX livrés à EDF entraîne donc l'usage d'un tonnage d'assemblages UNE plus important, et par conséquent l'augmentation des achats d' U_{nat} , ainsi que celles du coût des conversions chimiques et des enrichissements en ^{235}U .

Avec les données de l'ANDRA, qui publie les évolutions annuelles des stocks de matières nucléaires et celles des tonnages de combustibles neufs, chargés et déchargés des réacteurs d'EDF, nous pouvons quantifier la réduction du tonnage MOX chargé, illustrée par le tableau 11.

Tableau 11 : Évolution du tonnage de combustible MOX chargé dans les réacteurs de 900 MW

| Année | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| UNE (t) | 4373 | 4421 | 4450 | 4210 | 4360 | 4160 | 4070 | 3970 |
| MOX (t) | 428 | 434 | 430 | 431 | 424 | 348 | 323 | 215 |

Sources : [AND 16] à [AND 23]

C'est à compter de 2018 que le tonnage de combustible MOX chargé a été réduit en moyenne de 30% par rapport aux cinq années antérieures. En 2021, le tonnage MOX chargé n'atteignait que 50% de la charge annuelle habituelle, soit un déficit d'assemblages voisin de 215 tonnes. Le bilan de l'année 2022, qui ne sera publié qu'en 2024 par l'ANDRA, montrera une réduction plus sévère encore du tonnage de combustible MOX chargé dans les réacteurs, du fait de la fourniture significativement réduite de l'usine Melox.

6.2 LA FRANCE A-T-ELLE BESOIN D'ENRICHER SON URANIUM À L'ÉTRANGER ?

L'enrichissement par diffusion gazeuse à Eurodif, avec des taux de rejets en uranium 235 (^{235}U) de l'ordre de 0,30%, nécessitait **8 537** tonnes d'uranium naturel (U_{nat}) pour produire **1032** tonnes d'uranium enrichi à 3,7% (tonnage moyen 2010-17 d'UNE et d'URE chargé).

L'enrichissement par centrifugation dans les installations de Georges Besse II (GBII), qui permet, avec la réduction du coût de l'UTS, des taux de rejets en ^{235}U plus bas, nécessite un tonnage d' U_{nat} plus faible. Nous pouvons évaluer ce tonnage, sachant que pour enrichir un kg d'uranium à 3,7% en ^{235}U , avec un taux de rejet à 0,15%, il faut 6,328 kg d' U_{nat} et 6,740 UTS [CEA 18].

L'enrichissement de l'uranium par centrifugation, permet donc de réduire à **6 530** tonnes d' U_{nat} le besoin⁴⁶, soit une économie de 23,5% de *matière première*, au prix d'une augmentation de **43%** des *besoins en UTS* (6,956 millions d'UTS au lieu de 4,863 MUTS). Afin de fournir l'uranium enrichi qui permet d'assurer le besoin annuel moyen de 1032 tonnes d'assemblages, il faut donc **6,96** millions d'UTS. Comme GBII, a atteint en 2016 sa pleine capacité d'enrichissement, qui est égale à 7,5 millions d'UTS, la totalité des besoins d'EDF aurait pu être couverte. Orano précise d'ailleurs dans ses rapports annuels que l'usine d'enrichissement Georges Besse II produit en continu avec un rendement supérieur à 99 % [ORA 22], [ORA 23] page 25.

Nous constatons donc que *tout l'uranium dont a besoin EDF peut être enrichi en France*. L'enrichissement n'est donc pas le maillon du cycle nucléaire qui limite la réalisation en France, de la *totalité* de l'uranium enrichi nécessaire à la réalisation du tonnage d'assemblages combustibles requis pour le parc des réacteurs d'EDF.

6.3 FOURNITURE D'URANIUM ENRICHI ET RÉALISATION D'ASSEMBLAGES UNE EN FRANCE

Nous allons rechercher maintenant les conditions d'approvisionnement d'EDF en *uranium enrichi* pour fabriquer en France, ou à l'étranger, des assemblages combustibles et à estimer le tonnage d'*assemblages combustibles* acheté à l'étranger afin de compléter celui fabriqué en France par Framatome, pour assurer les besoins annuels des réacteurs du parc d'EDF.

La fourniture des assemblages de combustibles

Il n'y a pour EDF que deux fournisseurs d'assemblages combustibles à uranium naturel enrichi (UNE) : Framatome et Westinghouse⁴⁷. Comme l'indique le tableau 4 suivant, les combustibles utilisés sont majoritairement fournis par Framatome qui fabrique les gaines en zircaloy et réalise l'assemblage final, appelé "M5".

Les usines de Framatome qui produisent les assemblages UNE sont : FBFC à Romans-sur-Isère (France) et à Dessel (Belgique) ainsi qu'à ANF Siemens à Lingen (Allemagne).

Les assemblages Westinghouse, appelés "Z4" sont fabriqués dans les usines de Westinghouse à Vâsterås en Suède, Springfield au Royaume-Uni, ainsi qu'à l'usine de la société espagnole ENUSA de Juzbado (Salamanque) d'European Fuel Group [COU 20],

Nous avons recherché l'origine des tonnages d'uranium enrichi *sous forme d'UF₆*, qui permettent la réalisation de combustibles UNE en France. Les données sont regroupées dans le tableau 12 et synthétisées dans le tableau 13. Les assemblages de Framatome sont réalisés avec de l'uranium enrichi provenant majoritairement de l'usine Georges Besse II, mais aussi

46 L'enrichissement de l'uranium en isotope ^{235}U par centrifugation, à travail égal avec celui de la diffusion gazeuse, consomme 50 fois moins de kWh. Il en résulte que le coût total de l'enrichissement est divisé d'un facteur 2 environ, ce qui permet de poursuivre l'extraction de l' ^{235}U jusqu'à un taux résiduel de 0,15% au lieu du 0,30% qui était la limite pratique de la diffusion gazeuse.

47 [COU 20], chapitre 28, "Le combustible : gestions, surveillance et évolutions", page 816.

d'Urenco et pour une très faible partie par Tenex (Russie).

Tableau 12 : Tonnages d'UF₆ produits en France et importés, fabrication et emploi de combustible UNE

| Approvisionnement en UF ₆ enrichi et en assemblages combustibles (tonnes) | | | | | | |
|--|------------------------|------------------------|-----------|-------------------------------------|-------------------------------|--|
| Année | GBII UNE | Urenco UNE | Tenex UNE | Assemblages UNE fabriqués en France | Assemblages UNE fournis à EDF | Assemblages UNE chargés dans les réacteurs d'EDF |
| 2021 | 564 | 142 (P-B, A, RU) | 21 | 750 (749)* | 710 | 1032 (68,8%) |
| 2020 | 614 | 106 (RU) | 0 | 705 (705) | 615 | 1032 (59,6%) |
| 2019 | 323 | 322 (RU) | 25 | 642 (641) | 577 | 1032 (55,9%) |
| 2018 | 574 | 123 (RU) + 16 BNFL | 0 | 742 (733) | 617 | 1032 (59,8%) |
| 2017 | 411,5 | 237,1 (?) +0,9 BNFL | 8,3 | 603 (626) | 612,1 | 1040 (58,9%) |
| 2016 | 328,856 | 303,200 (A et RU) | 8,288 | 629,99 (620) | 644,456 | 938 (68,7%) |
| 2015 | 596,12 | | | 617,06 | 482,18 | 1023 (47,1%) |
| 2014 | 632,347 (dont Areva) | | | 640,28 | 514,28 | 1096 (46,9%) |
| 2013 | 673,08 | | | 692,15 | 514,28 | 1032 (49,8%) |
| 2012 | 599,265 +25,71 Areva | | | 584,409 | 507,16 | 993 (51,1%) |
| 2011 | 632 + 74 Areva | | | 541 | 459 | 1092 (44,9%) |
| 2010 | 624,827 + 95,913 Areva | | | 387,813 +92,426 Areva | 271,279 +92,926 Areva | 1039 (35,1%) |

Sources : [ASN 12] à [ASN 22]. Les données publiées sur les tonnages fabriqués par Framatome [FRA 19] à [FRA 22], figurent entre parenthèses*.

Nota : L'uranium enrichi (sous forme d'UF₆) est fourni régulièrement à Framatome par GBII, Urenco et Tenex (Russie) avec des compléments de BNFL ou d'Areva, certaines années. La répartition des tonnages d'UF₆ fournis, n'est détaillée dans les rapports annuels de l'ASN, qu'à compter de 2016. Le pourcentage entre parenthèses, représente la fraction du tonnage combustible UNE chargée dans les réacteurs qui a été fournie par Framatome (+ Areva en 2010). L'uranium enrichi fourni par Urenco peut venir d'Allemagne à Gronau, (A), des Pays-Bas (P- B) à Almelo ou du Royaume-Uni (RU) à Capenhurst.

Nota : Les tonnages d'assemblages fabriqués, mis entre parenthèses, sont ceux publiés par Framatome qui fournit des combustibles à EDF, mais aussi à des clients étrangers et pour des réacteurs de recherche. En l'absence de données sur le tonnage combustible chargé dans les réacteurs d'EDF, de 2018 à 2021, nous retenons la moyenne du tonnage chargé de 2010 à 2017 (1032 tonnes). L'hexafluorure d'uranium, enrichi ou non, est un produit très toxique. S'il réagit avec l'eau, il se transforme en fluorure d'uranyle (UO₂F₂) et en acide fluorhydrique (HF) qui est très corrosif. Il y a eu plusieurs accidents de fuites d'UF₆ aux États-Unis, dont deux mortels en 1944 et un autre en 1986 [WIK 22].

L'analyse des données

Afin de pouvoir analyser les données de ce tableau 12, qui est complexe, nous avons calculé des valeurs moyennes annuelles, représentées synthétiquement au tableau 13.

Les données moyennes de 2010-2015 montrent que le tonnage moyen d'U_{nat} enrichi disponible (658,9 t) ne permet de fournir que 473,5 tonnes d'assemblages soit 45,3% du tonnage utilisé par EDF dans son parc de réacteurs nucléaires.

Comme de 2010 à 2015, les données de l'ASN sur les tonnages d'uranium enrichi sous forme

d'UF₆ ne fournissent pas les parts des différents fournisseurs (Georges Besse II, Urenco et Tenex), l'analyse ne peut porter que sur la fabrication des assemblages.

Tableau 13 : UF6 français et importé, fabrication et emploi de combustible UNE

| Approvisionnement en UF ₆ enrichi et en assemblages combustibles (tonnes/an) | | | | | | |
|---|------------------|----------------|--------------|-------------------------------------|-------------------------------|--|
| Années | Eurodif-GBII UNE | Urenco UNE | Tenex UNE | Assemblages UNE fabriqués en France | Assemblages UNE fournis à EDF | Assemblages UNE chargés dans les réacteurs d'EDF |
| 2016 à 2021 | 469 (68,3%) | 208 (30,3%) | 10 (1,5%) | | | |
| | 687 | | | 679 | 629 | 1 018 |
| 2010 à 2015 | 658,9 | | | 592,6 | 473,5 | 1045,8 |

Pour la période 2016 à 2021, le tableau 13 montre que ce sont en moyenne 687 tonnes/an d'uranium enrichi qui ont été mis en œuvre par Framatome : 68,3% ont été enrichies à Eurodif-GBII, 30,3% à Urenco et 1,5% par Tenex en Russie.

Le tonnage d'uranium traité en France entre 2016 et 2021, qui a permis de produire les 469 tonnes enrichies à GBII, a nécessité 3,16 millions d'UTS, soit seulement **42,1%** des capacités d'enrichissement de GBII (7,5 MUTS).

Dans l'hypothèse où la moyenne de 687 tonnes d'²³⁵U enrichi livrées à Framatome pour réaliser des assemblages combustibles, avaient été entièrement ouvragées en France, elles auraient nécessité l'utilisation de 4,624 millions d'UTS, soit 61,7% des capacités de GBII. Ce tonnage aurait donc pu être enrichi *en totalité* en France.

Près *d'un tiers de l'uranium enrichi* (31,8%), utilisé sous la forme d'UF₆ pour être transformé en France en UO₂, afin de fabriquer des assemblages UNE, est donc venu de l'étranger.

De plus, la totalité de l'UF₆ enrichi en France et à l'étranger (688 t/an) ne fournit que **629** tonnes d'assemblages UNE sur les **1 018** tonnes (61,8%) qui en moyenne, ont été chargées annuellement dans les réacteurs d'EDF.

Ainsi, de 2016 à 2021, seuls **6 assemblages UNE sur 10** (61,8%) utilisés par EDF ont été fabriqués en France. Cela signifie que le tonnage complémentaire de 389 t/an d'uranium enrichi (38,2%), sous forme d'assemblage combustible UNE, a été *importé*, ce qui représente **4 assemblages sur 10**.

Pour la période précédente, de 2010 à 2015, en moyenne 658,9 tonnes par an d'uranium enrichi sous forme d'UF₆, ont été fournies par Eurodif-GBII, Urenco et par Tenex (Russie), pour réaliser des assemblages combustibles, mais les fractions relatives à chacun de ces trois fournisseurs ne sont pas fournies dans les rapports annuels de l'ASN. Cet uranium enrichi a été utilisé pour réaliser en moyenne 592,6 tonnes d'assemblages par an, dont **473,5 t/an** (79,9%) ont été fournies à EDF, soit **45,3%** des 1045,8 t/an de combustibles chargées dans les réacteurs (moyenne 2010-15). De 2010 à 2015, moins *d'un assemblage UNE sur deux* utilisés par EDF a été fabriqué en France.

Ces assemblages importés, qui complètent ceux de Framatome, sont fournis par Westinghouse. Ils sont probablement réalisés avec de l'uranium acheté par la France, mais envoyé en Russie (Tenex) pour y être enrichi, puis livré sous forme d'UO₂ enrichi.

Mais l'opacité entretenue qui couvre toutes les opérations de transformation de l'U_{nat} jusqu'à la fabrication des assemblages, ne permet pas d'avoir un suivi de toutes les phases industrielles et une vue claire sur les parts jouées par les différents intervenants industriels

dans le cycle.

EDF et Framatome cultivent cette opacité sur la fourniture d'uranium enrichi à l'étranger. Cela va jusqu'à modifier au dernier moment le port⁴⁸ où arrivent les conteneurs d'UF₆ gazeux enrichi en Russie, avant d'être véhiculés jusqu'à l'usine de fabrication de combustibles nucléaires de Lingen, dans le nord de l'Allemagne [BON 22]. Un site exploité par ANF (Advanced Nuclear Fuels), une filiale de Framatome.

6.4 LES ASSEMBLAGES FABRIQUÉS PAR WESTINGHOUSE POUR EDF

De 2003 à 2014, l'entreprise américaine Westinghouse a fourni à EDF environ 6 000 assemblages combustibles⁴⁹ à EDF, soit 2 961 tonnes (247 t/an en moyenne). Le 18 décembre 2014, le contrat de fourniture de ces assemblages⁵⁰ qui arrivait à son terme fin 2014, a été renouvelé [FOR 15]. Il porte sur plusieurs milliers de tonnes de combustible.

Nous n'avons pas trouvé de données relatives aux tonnages produits par Westinghouse pour EDF.

6.5 ACCORDS DE FRAMATOME AVEC LE KAZAKHSTAN

Dans le cadre d'accords signés avec ses partenaires kazakhs (Kazatomprom⁵¹), Framatome a fourni la technologie de fabrication du combustible, les équipements de production critiques ainsi que des documents d'ingénierie, des formations et de l'assistance technique, pour la construction de l'usine de fabrication d'assemblages de combustible nucléaire de Ulba-FA, une coentreprise kazakh-chinoise située à Ust-Kamenogorsk⁵².

L'installation fabriquera et livrera en Chine, des assemblages combustibles suivant la technologie de fabrication d'assemblage de combustible de Framatome et des équipements fabriqués dans les usines de Framatome en France et en Allemagne ainsi que des équipements fournis par des entreprises chinoises.

On ne peut exclure le fait que Framatome produise aussi dans cette usine des assemblages pour EDF (voir Annexe 2).

Comme le Kazakhstan est le plus important producteur d'uranium au monde et fournit près de 40 % de la demande mondiale, il est vraisemblable que l'uranium de ces assemblages sera celui du Kazakhstan. La traçabilité des matières nucléaires en France sera encore plus difficile à établir.

48 En septembre 2022, le navire russe *Mikhail Dudin*, attendu dans le port de Rotterdam, a finalement débarqué à Dunkerque sa cargaison d'uranium enrichi destinée à Lingen, faussant compagnie aux militants allemands et néerlandais [WOE 22], mais pas à ceux de Greenpeace [GRE 22].

49 Avec 34 réacteurs de 900 MW équipés d'assemblages de 0,4617 tonne et 20 réacteurs de 1300 MW et 4 réacteurs de 1450 MW avec des assemblages de 0,5385 t, le poids moyen des assemblages était de 0,4935 t.

50 Ces assemblages sont fabriqués dans les deux usines européennes de Westinghouse : à Västerås en Suède (Westinghouse Electric Sweden) et à Springfield au Royaume-Uni (Springfield Fuels Limited).

51 Kazatomprom est une compagnie minière du Kazakhstan, créée en juillet 1997 et détenue à 100 % par le gouvernement kazakh. Elle est l'entreprise mère de 80 autres compagnies et emploie 26 000 personnes.

Une nouvelle usine de production située au Kazakhstan qualifiée pour la fabrication de combustible Framatome, 1^{er} décembre 2021.

52

CONCLUSION

Les degrés de dépendance du combustible des centrales nucléaires françaises, concernent tant la provenance de la matière première concernée, l'uranium et ses différents avatars (uranium naturel, uranium enrichi, uranium appauvri enrichi, uranium de retraitement), que la fabrication du combustible et ses assemblages.

L'approvisionnement en *uranium naturel* pour réaliser les assemblages combustibles des réacteurs du parc EDF, dépend *totalemment* de l'importation. Mais ce n'est pas la seule dépendance, car près d'un tiers (32%) de l'*uranium enrichi* sous forme d' UF_6 qui a approvisionné l'entreprise française Framatome de 2016 à 2021, provient de l'étranger.

En outre, si la majeure partie des *assemblages* utilisée dans le parc des réacteurs d'EDF est réalisée en France par Framatome, à partir d'uranium enrichi à Eurodif ou importé, l'autre partie, soit plus *d'un assemblage sur deux* de 2010 à 2015 et près de *quatre assemblages sur dix* de 2016 à 2021, ont été fabriqués à l'étranger.

Bien que les performances connues des six dernières années (2016-21) soient meilleures que celles des six années précédentes (2010-15) en matière de tonnage d'assemblages produits en France, ces données montrent que la France se trouve sous une *triple* dépendance : elle est *totale* pour l'approvisionnement en uranium et elle est *partielle*, mais importante, tant pour l'enrichissement de l'uranium en isotope ^{235}U , que pour la fabrication d'assemblages combustibles.

Dans cette triple dépendance, la Russie occupe une position dominante.

Bien que la Russie, 6^{ème} producteur mondial d'uranium naturel, ne vende pas directement son uranium à EDF et Orano, elle joue un rôle important dans l'approvisionnement de la France en enrichissant pour elle de l'uranium *naturel*, de l'uranium *appauvri* et de l'uranium de *retraitement* ou en exportant de l'uranium *enrichi* à partir de l'uranium naturel de Russie.

Areva, devenu Orano, et EDF, ont importé *indirectement* de l'uranium *naturel* sous forme de *yellow cake* (nitrate d'uranyle), en expédiant en Russie cet uranium, acheté chez certains de ses États fournisseurs, pour y être transformé sous forme d' UF_6 avant d'arriver en France.

Depuis le début du fonctionnement des réacteurs utilisant des combustibles à oxyde d'uranium enrichi, la France a accumulé 320 000 tonnes d'*uranium appauvri* (fin 2020). EDF a exporté en Russie de l'uranium appauvri, de 2000 à 2010, afin de l'enrichir pour l'utiliser dans ses réacteurs. Un tonnage qui a permis à EDF d'importer de Russie de l'uranium enrichi à 3,7% en ^{235}U .

Areva et EDF ont également importé de Russie, de l'*uranium naturel enrichi*, de 2000 à 2012, pour fabriquer les combustibles des réacteurs d'EDF.

Orano et EDF ont exporté de 2000 à 2012, à parts pratiquement égales, de l'uranium de retraitement (URT) en Russie afin de l'enrichir puis de l'importer et de fabriquer des combustibles à base de cet uranium de retraitement enrichi (URE). Ce combustible a été utilisé de 1993 à 2013 dans les réacteurs de la centrale EDF de Cruas.

Plus récemment (2020-21) Orano a *vendu* et expédié de l'URT à la Russie tandis qu'EDF a pour sa part signé en mai 2018 avec la société Tenex (Russie), un contrat visant à réutiliser de l'URE dans les réacteurs de 900 MW de puissance électrique nette de la centrale de Cruas à partir de 2023, puis dans 3 à 4 réacteurs de 1300 MW à partir de 2027.

Dans un contexte géopolitique de plus en plus tendu, cette triple dépendance pose de sérieuses questions.

Comme les capacités de conversions chimiques et d'enrichissement de l'uranium de la France pourraient largement assurer *la totalité des besoins* relatifs au parc des réacteurs d'EDF, les traitements chimiques comme l'enrichissement réalisés à l'étranger ne relèvent pas d'un choix contraint. Les dépendances françaises ne sont donc pas inéluctables, elles résultent en fait de

plusieurs *optimisations économiques* et posent évidemment des problèmes politiques.

RÉFÉRENCES

I.

- [AFP 2018], Lefigaro.fr avec l'AFP, "*Une filiale de Rosatom signe un contrat avec EDF*", 25 mai 2018.
- [AIE 2021], AIEA, "*Les ressources en uranium mondiales sont suffisantes pour répondre à la demande dans un avenir proche, d'après le nouveau rapport de l'AEN et de l'AIEA*", 29/01/2021, Vienne (Autriche).
- [AND 2012], Andra, "*Rapport de synthèse 2012, Inventaire national des matières et déchets radioactifs*", 212 pages, juin 2012.
- [AND 2016], Andra, "*Bilan à fin 2015, Inventaire national des matières et déchets radioactifs*", 16 pages, décembre 2016.
- [AND 2018], Andra, "*Rapport de synthèse 2018, Inventaire national des matières et déchets radioactifs*", 180 pages, juillet 2018.
- [ANDRA 2022], Andra, "*Les essentiels 2022, Inventaire national des matières et déchets radioactifs*", 28 pages, janvier 2022.
- [ASN 2022], ASN, "*Usine Georges Besse II de séparation des isotopes de l'uranium par centrifugation*" : 17 mai 2022.
- [ARE 2015], Areva, "*Traitement des combustibles usés provenant de l'étranger dans les installations d'AREVA NC La Hague, Rapport 2014*", 50 pages, juin 2015.
- [BRE 2022], Pierre Breteau, "*L'indépendance énergétique de la France grâce au nucléaire : un tour de passe-passe statistique*", Lemonde.fr, 24 janvier 2022.
- [CAS 1982], Commission Castaing, "*Rapport du Groupe de travail sur la gestion des combustibles irradiés*", 88 pages, Conseil supérieur de la sûreté nucléaire, Décembre 1981-Novembre 1982.
- [CEA 2014], CEA, "*Périodes radioactives, Table de valeurs recommandées*", CEA, Laboratoire national Henri Becquerel, 20 pages, février 2014.
- [CEA 2018], CEA, "*Mémento sur l'énergie, édition 2018*", 100 pages, CEA, Bâtiment Siège, 91191 Gif sur Yvette Cedex.
- [COG 1999], Cogema, "*Cogema signe un accord pour l'achat de la composante uranium de l'uranium hautement enrichi ou-HEU-russe*", COGEMA, 25 mars 1999, Communiqué de presse.
- [COM 2017], Sylvain Compère, "*La grande aventure de l'uranium en Limousin*", Le Populaire, 9 décembre 2017. http://www.lepopulaire.fr/gf/PC_gf_uranium/
- [DGE 2020], DGEC, "*État des lieux des flux et stocks du cycle du combustible français 2016-2017*", 11 pages, Direction générale de l'énergie et du climat, HCTISN, 22 janvier 2020.
- [DGE 2022], DGEC, "*État des lieux des flux et stocks du cycle du combustible français 2018-2019*", 12 pages, Direction générale de l'énergie et du climat, HCTISN, 8 mars 2022
-
- [GAS 2018], Miklos Gaspar et Noah Mayhew, "*URAM 2018 : les hauts et les bas, les paramètres économiques de l'extraction d'uranium*", Bulletin de l'AIEA, juin 2018.
- [GRE 2021], Greenpeace, "*Déchets nucléaires français, aller-simple pour la Sibérie, Dossier Greenpeace*", 12 octobre 2021.
- [GRE 2022], Greenpeace, "*L'industrie nucléaire française, une alliée du régime de V. Poutine*", 7 pages, mars 2022.
- [GRE 2022a], Greenpeace, "*Nucléaire : des conteneurs d'uranium enrichi en provenance de Russie continuent d'arriver en France*", 25 août 2022.
- [HCT 2018], HCTISN, "*Présentation du Cycle du combustible français en 2018*", 101 pages, 27 juillet 2018, mis à jour le 21 septembre 2018.
- [IRS 2017], IRSN, "*L'extraction de l'uranium en France : données et chiffres clés*", février 2017.
- [JUL 2022], Robert Jules, "*Nucléaire : la Russie menace d'arrêter de vendre son uranium enrichi aux Etats-*

Unis", latribune.fr, 25 mars 2022.

[LEB 2018], Véronique Le Billon, "EDF relance une filière de recyclage de son uranium usé", Les Échos, 11 septembre 2018.

[LES 1999], Les Échos, "Cogema prêt à acheter de l'uranium issu des armes russes", 26 mars 1999.

[LOU 2011], Charles-Antoine Louet, "Bilans 2009 et 2010 des flux et stocks de matière", Direction générale de l'énergie et du climat, 19 pages, 15 septembre 2011, HCTISN.

[LOU 2013], Charles-Antoine Louet, "Bilan 2012 des flux et stocks de matière", Direction générale de l'énergie et du climat, 18 pages, 12 décembre 2013, HCTISN.

[MAS 2021], Émilie Massemin, "La France se débarrasse de déchets nucléaires en Russie", Reporterre, 12 octobre 2021, mis à jour le 15 octobre 2021.

[MEY 2022], Teva Meyer, "Moscou et Pékin se partagent la planète électronucléaire", Le Monde diplomatique, juin 2022.

[OEC 2020], OECD and NEA, "Uranium 2020 : Resources Production and Demand", 484 pages, NE N°7551, Nuclear Energy Agency (NEA) Boulogne-Billancourt, France, 2020

[ORA 2019], Orano, "Point sur le gisement de Kanjungan au Kazakhstan", Orano, 2 septembre 2019

[PAR 2022], Parlement européen, "Résolution du Parlement européen du 1^{er} mars 2022 sur l'agression russe contre l'Ukraine", mardi 1^{er} mars 2022, Bruxelles, [Textes adoptés - Agression russe contre l'Ukraine - Mardi 1^{er} mars 2022 \(europa.eu\)](#)

[QUE 2021], Caroline Quevrain, "La France envoie-t-elle des déchets nucléaires en Russie ?", TF1 Info, 18 novembre 2021.

[REP 2022], Reporterre, "En pleine guerre, la France reçoit de l'uranium russe", 25 août 2022, mis à jour le 22 août 2022.

[SHA 2021], Anastasiya Shapochkina, "Plus de trois décennies après Tchernobyl, la Russie joue crânement la carte nucléaire", 23 avril 2021, theconversation.com.

[VER 2020], Emmanuelle VERGER, "Recyclage de l'uranium de retraitement (URT)", EDF, Direction division combustible nucléaire, 22 janvier 2020, exposé à la 52^{ème} réunion du HCTISN.

[WIK 2019], Wikipédia, " Ville fermée", 2019

II.

[AND 12], Andra, "Rapport de synthèse 2012 Inventaire national des matières et déchets radioactifs", 212 pages, juin 2012, Châtenay-Malabry.

[AND 16], Andra, "Bilan à fin 2015, Inventaire national des matières et déchets radioactifs", 16 pages, décembre 2016, Châtenay-Malabry.

[AND 18], Andra, "Rapport de synthèse 2018, Inventaire national des matières et déchets radioactifs", 180 pages, juillet 2018, Châtenay-Malabry.

[AND 19], Andra, "Les essentiels 2019, Inventaire national des matières et déchets radioactifs", 26 pages, janvier 2019, Châtenay-Malabry.

[AND 20], Andra, "Les essentiels 2020, Inventaire national des matières et déchets radioactifs", 26 pages, janvier 2020.

[AND 21], Andra, "Les essentiels 2021, Inventaire national des matières et déchets radioactifs", 28 pages, février 2021, Châtenay-Malabry.

[AND 22], Andra, "Les essentiels 2022, Inventaire national des matières et déchets radioactifs", 28 pages, janvier 2022, Châtenay-Malabry.

[AND 23], Andra, "Les essentiels 2023, Inventaire national des matières et déchets radioactifs", 24 pages, février 2023, Châtenay-Malabry.

[ASN 11], ASN, "Rapport de l'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France en

2010", 468 pages, 2011, Paris.

[ASN 12], ASN, "*Rapport de l'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France en 2011*", 512 pages, avril 2012, Paris.

[ASN 13], ASN, "*Rapport de l'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France en 2012*", 542 pages, 2013, 92120 Montrouge.

[ASN 14], ASN, "*Rapport de l'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France en 2013*", 538 pages, mars 2014, 92120 Montrouge.

[ASN 15], ASN, "*Rapport de l'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France en 2014*", 548 pages, avril 2015, 92120 Montrouge.

[ASN 16], ASN, "*Rapport de l'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France en 2015*", 538 pages, avril 2016, 92120 Montrouge.

[ASN 17], ASN, "*Rapport de l'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France en 2016*", 540 pages, avril 2017, 92120 Montrouge.

[ASN 18], ASN, "*Rapport de l'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France en 2017*", 480 pages, avril 2018, 92120 Montrouge.

[ASN 19], ASN, "*Rapport de l'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France en 2018*", 396 pages, mai 2019, 92120 Montrouge.

[ASN 20], ASN, "*Rapport de l'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France en 2019*", 388 pages, mai 2020, 92120 Montrouge.

[ASN 21], ASN, "*Rapport de l'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France en 2020*", 396 pages, mai 2021, 92120 Montrouge.

[ASN 22], ASN, "*Rapport de l'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France en 2021*", 390 pages, mai 2022, 92120 Montrouge.

[BON 22], Violette Bonnebas, "*L'encombrante livraison d'uranium russe à l'Europe*", Reporterre, 15 septembre 2022.

[BRE 22], Pierre Breteau, "*L'indépendance énergétique de la France grâce au nucléaire : un tour de passe-passe statistique*", Lemonde.fr, 24 janvier 2022.

[CEA 18], CEA, "*Mémento sur l'énergie, édition 2018*", 100 pages, CEA, Bâtiment Siège, 91191 Gif sur Yvette Cedex.

[COU 20], Jean COUTURIER, coordinateur IRSN, "*Éléments de sûreté nucléaire, Les réacteurs à eau sous pression*", 1200 pages, éditeur EDP Sciences, décembre 2020.

[DGE 20], DGEC, "*État des lieux des flux et stocks du cycle du combustible français 2016-2017*", 11 pages, Direction générale de l'énergie et du climat, HCTISN, 22 janvier 2020.

[DGE 2022], DGEC, "*État des lieux des flux et stocks du cycle du combustible français 2018-2019*", 12 pages, Direction générale de l'énergie et du climat, HCTISN, 8 mars 2022

[FOR 15], Forum nucléaire suisse, "*Du combustible Westinghouse pour EDF*", 6 janvier 2015.

[FRA 19], Framatome, "*Rapport d'information 2019 du site Framatome à Romans-sur-Isère*", édition 2019 basée sur les résultats 2018, 56 pages, juin 2019.

[FRA 21], Framatome, "*Rapport d'information 2021 du site Framatome à Romans-sur-Isère*", édition 2021 basée sur les résultats 2020, 48 pages, juin 2021.

[FRA 22], Framatome, "*Rapport d'information 2022 du site Framatome à Romans-sur-Isère*", édition 2022 basée sur les résultats 2021, 27 pages, juin 2022.

[GUI 13], Guillemette André et Zerbib Jean-Claude, "*Les combustibles MOX d'EDF, production et stockages, bilans 2011*", Les cahiers de Global Chance, N°33, pp (66-85), mars 2013.

[GOD 23], Marine Godelier, "*Nucléaire : Le sprint d'Orano pour remplacer l'uranium enrichi russe, notamment aux Etats-Unis*", Latribune.fr, 27 janvier 2023.

[GRE 2021], Greenpeace, "*Déchets nucléaires français, aller-simple pour la Sibérie, Dossier Greenpeace*", 12 octobre 2021.

[GRE 22], Greenpeace, "*Nucléaire : des conteneurs d'uranium enrichi en provenance de Russie continuent d'arriver en France*", 25 août 2022.

[HCT 18], HCTISN, "*Présentation du Cycle du combustible français en 2018*", 101 pages, 27 juillet 2018, mis à jour le 21 septembre 2018.

[LIN 23], Linfodurable, "*Produire plus d'uranium enrichi pour se passer de la Russie (ou presque), le pari du Français Orano*", 27 janvier 2023.

[MAN 23], Nathan MANN, "*Pourquoi Orano veut investir 1,3 milliard d'euros dans l'extension de son usine d'enrichissement d'uranium à Tricastin*", L'Usine nouvelle, 30 janvier 2023.

[OEC 23], OECD, "*Uranium 2022: Resources, Production and Demand*", NEA No. 7634, © OECD 2023, March 2023.

[WIK 22], Wikipédia, "*Enrichissement de l'uranium*", 2022

[WOE 22], Géraldine Woessner, "*EDF fait enrichir en Russie 15 % de son uranium*", Libération, 8 décembre 2022

[ZER 22], Zerbib Jean Claude, "*L'approvisionnement en uranium de la France*", 17 pages, Global Chance, 5 décembre 2022.

ANNEXE 1 – LE COMBUSTIBLE MOX

La légitimation du retraitement des combustibles irradiés s’est appuyée sur :

- un discours évoquant l’*indépendance énergétique de la France* apportée par le *cycle fermé qui répond au principe utile du recyclage, fondé sur la préservation des ressources naturelles et la limitation de l’impact sur l’environnement*,
- l’affirmation selon laquelle *le recyclage permet une économie d’uranium naturel de l’ordre de 20 à 25%* [ARE 2008].

Recyclage de l’uranium de retraitement :

En pratique, les assemblages réalisés avec de l’uranium de retraitement enrichi ont permis de charger en **20 ans** (1994-2013), dans les réacteurs de Cruas, 633 tonnes de combustibles URE (voir 5.2 et figure 2), soit en moyenne 32 t/an, ce qui correspond à une économie de **3,1%**.

Recyclage du plutonium :

Les premiers combustibles MOX ont été chargés en 1987. En 2010, il était entreposé 1 287 tonnes de MOX irradiés et 2 390 t en 2021 [AND 2012], [AND 2023]. Si nous considérons ces années (2010-21) où l’usage du MOX a été le plus important, en 11 années il a été utilisé 1103 tonnes de MOX soit une moyenne de 100,3 t/an. Pour la même période, il a été chargé en moyenne 1032 tonnes d’UNE, soit une économie de **8,9%**.

Le recyclage de l’URT et du plutonium a permis un gain de 12% soit environ la *moitié* de ce qu’Areva avait annoncé. Il serait intéressant que des économistes comparent le coût financier du retraitement du combustible irradié, au gain de 12% d’uranium naturel.

Mais le problème le plus important, c’est l’impact du MOX irradié qui est bien plus important que celui de l’UNE irradié, Comme le montre le tableau suivant.

Comparaisons des caractéristiques des combustibles UO₂ et MOX irradiés

| Caractéristiques | UO ₂ irradié | MOX irradié | Rapport MOX/UO ₂ |
|--|----------------------------|----------------|--------------------------------|
| Masse d’actinides | 1,24 kg/t | 6,04 kg/t | 4,87 |
| Activité des actinides | 328 TBq/t | 3 549 TBq/t | 10,82 |
| Masse de plutonium | 11,21 kg/t | 66,61 kg/t | 5,94 |
| Activité du plutonium | 4 842 TBq/t | 38 433 TBq/t | 7,94 |
| Masses (Pu + actinides) | 12,45 kg/t | 72,65 kg/t | 5,84 |
| Activités (Pu + actinides) | 5 170 TBq/t | 41 982 TBq/t | 8,12 |
| Dose par µg de métal lourd (ingestion) | 0,12 mSv/µg | 1,05 mSv/µg | 8,75 |
| Puissance thermique des produits de fission et d’activation | 4,22 kW/t | 4,58 kW/t | 1,09 |
| Puissance thermique des PF + PA + Pu + actinides | 4,74 kW/t | 9,64 kW/t | 2,03 |
| Puissance thermique des Pu + actinides | 0,53 kW/t | 5,06 kW/t | 9,6 |

t = tonne de métal lourd, Taux de combustion = 45GWj/t, Temps de refroidissement = 3 ans
Source : [GUI 13]

Le MOX irradié recèle une activité de plutonium **7,94 fois** plus importante que celle de l'UNE irradié, la toxicité potentielle due à l'activité du plutonium et des actinides mineurs est **8,75 fois** plus élevée [GUI 13].

Ce sont donc les MOX irradiés qui augmentent le plus la charge radioactive que nous allons laisser aux générations à venir, déchets produits pour produire les kWh que nous avons consommé.

EDF projette de charger en 2024 les 4 premiers assemblages MOX assemblages MOX, dans un réacteur de 1300 MW. A cet effet, la demande de modification du Décret d'Autorisation de Création (DAC) de la tranche 4 de Paluel a été déposée auprès du Ministère de la Transition Ecologique en décembre 2020, en vue d'obtenir l'autorisation de charger ces 4 assemblages [VER 2022].

Mais les ennuis sérieux que connaît Melox depuis 2018, qui se sont traduits en 2021 par la fourniture réduite à 38 tonnes d'assemblages MOX, soit à peine plus du tiers du tonnage d'assemblages livrés les années précédentes (110 tonnes en moyenne pour 2011-17), vont bousculer ce planning.

Faut-il encore utiliser l'intelligence des ingénieurs pour remettre en marche ce système qui alourdit grandement et cyniquement l'importance des déchets à vie longue que nous laissons en héritage aux générations à venir ?

ANNEXE 2 – USINE DE FABRICATION DE COMBUSTIBLE AU KAZAKHSTAN

UNE NOUVELLE USINE DE PRODUCTION SITUÉE AU KAZAKHSTAN QUALIFIÉE POUR LA
FABRICATION DE COMBUSTIBLE FRAMATOME

1^{er} décembre 2021

Framatome - Espace presse

Le 1 décembre 2021 – Dans le cadre d’accords signés avec ses partenaires kazakhs, Framatome a fourni la technologie de fabrication du combustible, les équipements de production critiques ainsi que des documents d’ingénierie, des formations et de l’assistance technique, pour la construction de l’usine de fabrication d’assemblages de combustible nucléaire de Ulba-FA, une coentreprise kazakh-chinoise située à Ust-Kamenogorsk. Trente ans après l’indépendance de la République du Kazakhstan, l’inauguration de cette unité de fabrication a été célébrée récemment au sein de l’usine.

Des représentants de Samruk-Kazyna, Kazatomprom, Ulba Metallurgical Plant JSC, China Atomic Energy Authority, CGNPC et Framatome étaient présents lors de la cérémonie d’ouverture. Cette nouvelle usine sera gérée et exploitée par la JV Ulba-FA, fondée par Ulba Metallurgical Plant JSC, filiale de Kazatomprom et CGN-URC, filiale de CGNPC.

« Cette nouvelle usine, dont la mise en route a été couronnée de succès et s’est déroulée dans les délais prévus, est l’aboutissement d’une coopération de longue durée et d’un effort intense entre toutes les parties concernées », a déclaré Bernard Fontana, CEO de Framatome. *« Chez Framatome, nous sommes très fiers d’avoir contribué au développement de ce projet, de la conception à la construction et jusqu’à la qualification. Cette nouvelle installation confirme notre capacité à réaliser des projets internationaux complexes et renforce les liens solides qui unissent Framatome et le Kazakhstan. »*

« Ce projet est un parfait exemple de réussite d’une coopération multilatérale d’entreprises de référence du secteur nucléaire mondial. Cette production qui s’appuie sur un savoir-faire spécifique offre à notre pays de nouvelles possibilités pour développer la coopération avec d’autres États dans le domaine nucléaire. », s’est félicité Mazhit Sharipov, CEO de NAC Kazatomprom JSC.

L’installation vient de répondre aux exigences de qualification et entre maintenant dans sa phase d’industrialisation, avec une chaîne de fabrication ultra-moderne qui fabriquera et livrera en Chine, en toute sécurité, un combustible de haute qualité. L’usine utilise la technologie de fabrication d’assemblage de combustible de Framatome et des équipements fabriqués dans les usines de Framatome en France et en Allemagne ainsi que des équipements fournis par des entreprises chinoises. Elle bénéficiera également des capacités de production de pastilles de combustible fabriquées par sa voisine Ulba Metallurgical Plant JSC.