



L'APPROVISIONNEMENT EN URANIUM DE LA FRANCE

Jean Claude ZERBIB, 5 décembre 2022

*

Table des matières

1. LES DIFERENTS ASPECTS DE L'URANIUM	2
2. LA PROVENANCE DE L'URANIUM NATUREL	3
2.1 LA PRODUCTION D'URANIUM NATUREL EN FRANCE	3
2.2 L'ORIGINE DES BESOINS EN URANIUM NATUREL DE LA FRANCE	3
2.3 L'IMPORTATION D'URANIUM NATUREL PAR LA FRANCE	4
2.4 LES RESSOURCES MONDIALES EN URANIUM NATUREL.....	5
2.5 MODALITES D'APPROVISIONNEMENT DE L'URANIUM NATUREL.....	6
3. L'URANIUM ENRICHI	7
3.1 L'ENRICHISSEMENT DE L'URANIUM	7
3.2 L'ENRICHISSEMENT DU STOCK D'URANIUM APPAUVRI	7
3.3 LE CAS DE L'URANIUM ENRICHI IMPORTE DE RUSSIE.....	9
4. L'URANIUM DE RETRAITEMENT (URT)	10
4.1 L'URANIUM DE RETRAITEMENT	10
4.2 L'USAGE DES COMBUSTIBLES URE ISSUS DE L'URT DANS LES REACTEURS DE LA CENTRALE DE CRUAS	11
4.3 EVOLUTION DU STOCK D'URANIUM DE RETRAITEMENT (URT)	12
4.4 REPRISE DES ACTIVITES D'ENRICHISSEMENT DE L'URT AVEC LA RUSSIE.....	13
5. CONCLUSIONS	14
REFERENCES	15

1. LES DIFFÉRENTS ASPECTS DE L'URANIUM

L'uranium est un élément chimique naturel 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 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.

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), 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. 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.

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, puis du plutonium 239 (^{239}Pu).

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). 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 la production du plutonium par un traitement chimique qui sépare l'uranium, le plutonium et 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 4.

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 (voir Chapitre 3).

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 [IRSN 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.

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 [Compère 2017].

⁶ Le radium 226, de période radioactive de 1 600 ans, donne en se désintégrant 13 descendants radioactifs (seul le ^{14}Pb 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.

Pour l'achat d'uranium naturel, sous forme d'uranate (*yellow cake*), la France procède à une 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 procèdera à divers traitements physicochimiques de l'uranium avant de l'envoyer en France sous la forme d'uranium enrichi (voir Chapitre 3).

Le tableau N°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 N°1 : Exemples d'importation directe et indirecte d'uranium en France

Année	Comurhex (France)	Converdun (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 : [LOUET 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 [Breteau 2022] :

Kazakhstan, 27 748 tonnes, 20,1% (1^{er} producteur mondial⁷),

Australie, 25 804 tonnes, 18,7% (3^{ème}),

Niger, 24 787 tonnes, 17,9% (5^{ème}),

Ouzbékistan, 22 197 tonnes, 16,1% (7^{ème}),

Namibie, 16 981 tonnes, 12,3% (4^{ème}),

Canada, 10 285 tonnes, 7,4% (2^{ème}),

Kirghizistan, 3 430 tonnes, 2,5%,

Afrique du Sud, 2 937 tonnes, 2,1% (12^{ème}),

Ukraine, 2 238 tonnes, 1,6% (9^{ème}),

Brésil, 1 037 tonnes, 0,75% (18^{ème}),

République tchèque, 687 tonnes, 0,50% (27^{ème}),

États-Unis, 59 tonnes, 0,043% (10^{ème})

Hongrie, 39 tonnes, 0,028% (23^{ème})

Slovénie, 256 kilos.

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*.

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 [Breteau 2022].

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 Kanjungan [Orano 2019], [Greenpeace 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 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 [AIEA 2021]. Cependant ces évaluations sont fonction du prix du kg d'uranium extrait. Les 8 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 8 à 2 millions de tonnes (2,008) [OECD-NEA 2020].

Le tableau N°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 mondiale⁹ derrière les États-Unis (28,6%).

Tableau N°2 : Evolution de la production mondiale en uranium naturel

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.com, 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} producteur mondial d'uranium et fabrique 17 % du combustible nucléaire [Shapochkina 2021]. *Un combustible sur trois* utilisé dans le monde comporte de l'uranium enrichi par Rosatom¹¹ [Meyer 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 [Gaspar 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 [Jules 2022].

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.

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.

Évolution du cours de l'uranium



Source : www.indexmundi.com

Source : [Gaspar 2018]

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, [Louet 2011], [Louet 2013]. Le tableau N°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 [HCTISN 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 N°3 : Uranium naturel exporté en Russie par la France à des fins d'enrichissement en ^{235}U

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
2000-12	6 923	4 790	11 713

Sources : [Louet 2011] et [Louet 2013]

3. L'URANIUM ENRICHI

3.1 L'enrichissement de l'uranium

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.

Les taux en ^{235}U de l'uranium enrichi obtenus habituellement, varient de 3 à 5% (3,7% dans la grande majorité des réacteurs en France).

Une fois enrichi, 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.

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.

Au contact du fluor gaz, l' 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).

Une fois enrichi sous forme d' UF_6 , il faut procéder à la conversion en poudre de dioxyde d'uranium (UO_2), qui se fait par voie sèche¹³ (la plus utilisée) ou par voie humide, pour fabriquer les pastilles frittées, rectifiées et empilées dans les crayons combustibles.

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

Pour extraire, puis enrichir l'uranium à 3,7% en isotope ^{235}U qui reste dans *l'uranium de retraitement* (URT) et dans *l'uranium appauvri* (détenu par Orano), la France a choisi d'envoyer ces matières nucléaires en Russie pour y effectuer toutes les opérations qui conduisent à la production d'uranium enrichi. Ainsi nous exportons ces deux *matériaux uranifères* produits en France et importons en retour de Russie, de l'uranium *naturel enrichi* (depuis l'uranium appauvri à des taux voisins de 0,3% en ^{235}U) et de l'uranium de *retraitement enrichi* (URE).

Une fois les opérations d'enrichissement réalisées, la Russie garde l' U_{nat} réappauvri (de 0,3% à 0,15%) ainsi que l'URT appauvri, ce qui libère Orano et EDF de la gestion de ces deux matériaux devenus des *déchets*¹⁴.

3.2 L'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 ^{235}U 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 électrique¹⁵ (part importante du coût des opérations d'enrichissement) que la *diffusion* gazeuse, permet avec la

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 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 .

¹⁴ Comme ces uraniums appauvris n'ont plus de valeur économique, ils ne pourront plus trouver d'usage à moyen terme. Ils ne seront plus considérés en France comme des matières nucléaires mais comme des déchets radioactifs.

¹⁵ Selon l'ASN, la consommation d'énergie est de 75 MW contre 3000 MW, à production équivalente, soit une réduction d'un facteur 40 [ASN 2022].

même logique économique que précédemment (*taux de rejet* piloté par le coût de l'uranium¹⁶), 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, [ANDRA 2022]), entreposé sur les deux sites de Bessines et du Tricastin, devient un *gisement potentiel* d'uranium.

L'uranium appauvri est entreposé principalement¹⁷ 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°4. 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.

Tableau N°4 : Tonnage d'uranium appauvri entreposé en France

Année	Tonnage
2010	271 300
2011	276 300
2012	283 600
2013	290 000
2014	291 450
2015	299 170
2016	309 600
2017	314 800
2018	318 300
2019	321 200
2020	324 000

Sources : [ANDRA 2012] à [ANDRA 2022], [Louet 2011], [Louet 2013], [DGEC 2020], [DGEC 2022]

Le tableau N°4 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 réenrichissement en ^{235}U en Russie et pour une bien plus faible partie, dans la fabrication du MOX¹⁸.

Le tableau N°5 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' UF_6 pour assurer en Russie l'enrichissement en ^{235}U par *centrifugation gazeuse*. Ce tonnage permet de produire environ **2 370** tonnes d'UNE à 3,7% en ^{235}U avec un taux de rejet de 0,15% en ^{235}U .

¹⁶ 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*.

¹⁷ Une petite partie se trouve sous la forme d' UF_6 dans des conteneurs cylindriques.

¹⁸ De 1987 à 2020, EDF a déchargé 2 350 tonnes de MOX irradiés [ANDRA 2022] qui renfermaient environ 2 200 t d'uranium appauvri, soit **0,68%** du stock d'uranium appauvri en 2020.

Tableau N°5 : Uranium appauvri exporté en Russie par EDF pour enrichissement en ^{235}U

Année	Tonnage
2000	3 785
2001	4 600
2002	4 905
2003	4 903
2004	4 385
2005	5 626
2006	6 474
2007	6 315
2008	6 006
2009	5 610
2010	3 469
2000-10	56 078

Sources : [Louet 2011] et [Louet 2013]

Nous verrons plus loin 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.

3.3 Le cas de l'uranium enrichi importé de Russie

Le tableau N°6 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.

Tableau N°6 : Tonnage d'uranium naturel enrichi importé de Russie par la France

Année	Areva <i>direct</i>	EDF <i>direct</i>	EDF <i>indirect</i>	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 : [Louet 2011], [Louet 2013]

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 **7 296** tonnes d'uranium *enrichi*, probablement¹⁹ sous la forme d' UF_6 dont **6 398** tonnes d'UNE, (5 229 + 1 169) produites à partir d'uranium naturel russe et importées *directement* de Russie.

¹⁹ Le conditionnement de l'uranium enrichi n'est pas précisé dans les publications [Louet 2011], [Louet 2013].

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.

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

Selon Greenpeace [Greenpeace 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 [Cogema 1999]. Près de 100 000 tonnes, devaient en principe être vendues à Cameco, Cogema, et Nukem [Les Échos 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.

4. L'URANIUM DE RETRAITEMENT (URT)

4.1 L'uranium de retraitement

L'uranium, obtenu lors des opérations de retraitement des combustibles irradiés, a un taux d'enrichissement résiduel en ²³⁵U (0,9% à 1,1%) supérieur²⁰ 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 (²³⁶U, produit par activation neutronique de l'²³⁵U) qui est *neutrophage*²¹. La présence de cet isotope diminue l'efficacité du flux neutronique, aussi l'URT nécessite un enrichissement supérieur en ²³⁵U à celui de l'uranium naturel pour un même usage (taux de **4,1%** de l'²³⁵U de l'URT pour un équivalent à **3,7%** en ²³⁵U 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 [Castaing 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, produit du thallium 208 (²⁰⁸Tl), un radionucléide qui émet de nombreux gammas d'énergies élevées²² dont un gamma de 2,6 MeV

²⁰ 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 ²³⁵U diminue. L'enrichissement résiduel en ²³⁵U est de l'ordre de 0,7 % à 0,8 % pour des combustibles 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.

²¹ 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.

²² Le thallium 208 émet des gammas de 277 keV (6,4%), 511 keV (22,8%), 583 keV (85,1%), 763 keV (1,9%), 860 keV (12,5%) et 2,615 MeV (99,8%).

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'UTS²³ 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 soutienne²⁴ que l'usine Georges Besse 2 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 U₃O₈. C'est sous cette forme que l'uranium est envoyé en Russie²⁵, pour être converti en UF₆ puis enrichi en ²³⁵U. Cet uranium de retraitement enrichi (URE) revient en France sous forme d'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* (qui devient un *déchet*), 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 gérer s'il n'est pas enrichi.

4.2 L'usage des combustibles URE issus de l'URT dans les réacteurs de 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 Cruas²⁶, entre 1994 et 2013. Le tonnage total de combustible URE réellement utilisé est de **622** tonnes, selon la DGEC [DGEC 2022], avec des maximums chargés dans les 4 réacteurs de la centrale de Cruas²⁷ entre 2010 et 2012 (72, 70 et 74 t), ce qui correspond à environ ¼ de cœur en URE.

²³ 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 MWé [CEA 2018], page 50.

²⁴ [Le Billon 2018].

²⁵ 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.

²⁶ 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 d'environ **633** tonnes.

²⁷ Les réacteurs Cruas N°3 et N°4 (915MWe) 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.

Tableau N°7 : Tonnage d'URT exporté en Russie par la France pour un enrichissement en ^{235}U

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

Sources : [Louet 2011] et [Louet 2013]

La figure N°1, 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.

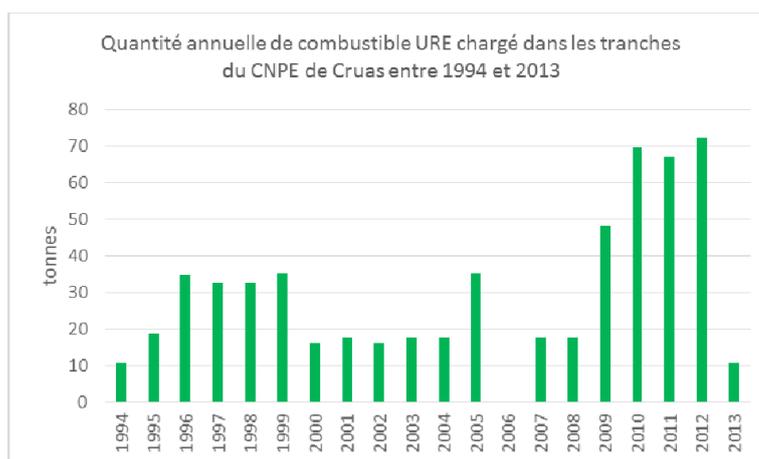


Figure 1 : Quantité annuelle de combustible URE chargée à Cruas (de 1994 à 2013) [HCTISN 2018]

L'URT susceptible d'être enrichi, est celui des premières années de retraitement²⁸, 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 ^{235}U 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.

4.3 Evolution du stock d'uranium de retraitement (URT)

Le tableau N°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

²⁸ Notamment avant 1997, lorsque les taux de combustion étaient inférieurs à 30 GWj/t.

moyenne au lieu d'environ 1 047 t/an attendu. 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 N°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	1 118	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-Pétersbourg les 20 janvier et 12 février 2021 [Greenpeace 2021].

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

4.4 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*. 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*** [Le Billon 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 réenrichissement étaient en fait directement injectés dans le sous-sol des installations sous forme liquide.

Selon Greenpeace, il n'y a aujourd'hui, aucune garantie que cette procédure ait cessée [Greenpeace 2021]. Les investigations dans ce complexe industriel sont impossibles, car il est situé dans la ville de Seversk, qui est une ville *fermée*²⁹ de la région (oblast en russe) de Tomsk. Elle n'est accessible qu'à des visiteurs munis de permis spéciaux [Wikipédia 2019].

²⁹ 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.

Lors d'une réunion du HCTISN en janvier 2020, Mme Emmanuelle VERGER, Directrice de la Division combustible nucléaire d'EDF [Verger 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 URE³⁰, 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 [Greenpeace 2021], [Quevrain 2021].

Puis le 24 août 2022, Greenpeace constate sur le port de Dunkerque, que 52 conteneurs de type 30B³¹ 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 [Greenpeace 2022a], [Reporterre 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.

Le Parlement européen a adopté le 1^{er} mars 2022 une *résolution* en 52 points [PE 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.*

5. CONCLUSIONS

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, devenue 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'UF₆ avant d'arriver en France. De 2000 à 2012, cela a concerné **11 713** tonnes d'U_{nat} (qui représentent **1 880** tonnes d'uranium enrichi ou 1,8 année de chargement).
- 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 **56 078** d'uranium *appauvri*, de 2000 à 2010, afin de l'enrichir pour

³⁰ EDF veut relancer l'usage des combustibles URE en 2023 dans les 4 réacteurs de 900 MWe de Cruas et à partir de 2027 dans 3 ou 4 réacteurs de 1300 MWe 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 **1 300** tonnes d'URT par an [Le Billon 2018].

³¹ Les conteneurs 30B sont utilisés pour le transport de l'uranium enrichi en phase gazeuse (UF₆).

l'utiliser dans ses réacteurs. Un tonnage qui a dû permettre à EDF, d'importer de Russie, environ **2 370** tonnes d'uranium enrichi à 3,7% en ²³⁵U.

- Areva et EDF ont également importé de Russie, **7 296** tonnes d'*uranium naturel enrichi*, de 2000 à 2012, pour fabriquer les combustibles des réacteurs d'EDF. Avec cet importation *directe* d'U_{nat} enrichi, l'U_{nat} enrichi à partir de la reprise de l'U_{nat} appauvri français (**2 370** t) et les **1 880** t d'UNE produites à partir de l'U_{nat} *indirectement importé*, c'est un total de plus de **11 500** tonnes d'uranium naturel enrichi qui ont été importées de 2000 à 2012

Orano et EDF ont exporté de 2000 à 2012, à parts pratiquement égales, **4 804 tonnes** d'uranium de retraitement (URT) en Russie afin de l'enrichir puis de l'importer (environ **650** tonnes d'URT enrichi) 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 plus de 1 000 tonnes d'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 MWe de la centrale de Cruas à partir de 2023, puis dans 3 à 4 réacteurs de 1300 MWe à partir de 2027.

Nous avons vu que, tant pour l'uranium naturel que l'uranium enrichi, les bilans des exportations directes et indirectes sont complexes. Ils méritent d'être clarifiés et officiellement publiés.

Références

[AFP 2018], Lefigaro.fr avec l'AFP, "*Une filiale de Rosatom signe un contrat avec EDF*", 25 mai 2018.

[AIEA 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).

[ANDRA 2012], Andra, "*Rapport de synthèse 2012, Inventaire national des matières et déchets radioactifs*", 212 pages, juin 2012.

[ANDRA 2016], Andra, "*Bilan à fin 2015, Inventaire national des matières et déchets radioactifs*", 16 pages, décembre 2016.

[ANDRA 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.

[AREVA 2015], Areva, "*Traitement des combustibles usés provenant de l'étranger dans les installations d'AREVA NC La Hague, Rapport 2014*", 50 pages, juin 2015.

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

[Castaing 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.

[Cogema 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.

[Compère 2017], Sylvain Compère, "*La grande aventure de l'uranium en Limousin*", Le Populaire, 9 décembre 2017. http://www.lepopulaire.fr/gf/PC_gf_uranium/

[DGEC 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.

[DGEC 2022], 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, 8 mars 2022

[Gaspar 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.

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

[Greenpeace 2022], Greenpeace, "*L'industrie nucléaire française, une alliée du régime de V. Poutine*", 7 pages, mars 2022.

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

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

[IRSN 2017], IRSN, "*L'extraction de l'uranium en France : données et chiffres clés*", février 2017.

[Jules 2022], Robert Jules, "*Nucléaire : la Russie menace d'arrêter de vendre son uranium enrichi aux Etats-Unis*", latribune.fr, 25 mars 2022.

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

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

[Louet 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.

[Louet 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.

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

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

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

[Orano 2019], Orano, "*Point sur le gisement de Kanjugan au Kazakhstan*", Orano, 2 septembre 2019

[PE 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 mars 2022 \(europa.eu\)](https://www.europa.eu/press-room/media/30611/fr)

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

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

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

[Verger 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.

