

L'URANIUM

RÉSUMÉ

L'uranium est un élément chimique radioactif présent à l'état naturel en quantité significative sur Terre. Il est essentiellement utilisé comme combustible dans les centrales nucléaires. L'uranium est un métal gris argenté, le plus lourd présent naturellement sur Terre. Il est dur et très dense.

La croûte terrestre contient en moyenne 2 à 3 grammes d'uranium par tonne. Cet élément est bien plus abondant que les métaux rares comme l'or ou l'argent. L'eau de mer en contient environ 3,3 milligrammes par tonne.

Dans le sol, il est inégalement réparti mais des mines sont exploitées sur quasiment tous les continents. La production mondiale d'uranium s'est élevée à **60 000 tonnes** en 2022, répartie pour l'essentiel comme suit : Kazakhstan (43 %), Canada (14,9 %), Namibie (11,4 %), Australie (9,2 %), Ouzbékistan (6,7 %), Russie (5,1 %), Niger (4,1 %) et Chine (3,4 %).

La consommation d'EDF pour le parc français représente environ **8 000 tonnes** d'uranium naturel par an, soit environ 13 % de la consommation mondiale. Les ressources conventionnelles mondiales, estimées à 7,6 millions de tonnes, sont conséquentes puisque, aux conditions actuelles, elles permettraient d'alimenter tous les réacteurs pendant plus de 120 ans.

L'uranium naturel est constitué de **trois isotopes** :

- l'uranium 238, le plus lourd des atomes présent dans l'écorce terrestre, le plus stable des trois et le plus abondant (99,28 %) – période radioactive $4,47 \cdot 10^9$ an ;
- l'uranium 235 (0,7 %) – période radioactive $7,04 \cdot 10^8$ an ;
- enfin des traces d'uranium 234 (0,006 %) – période radioactive $2,45 \cdot 10^5$ an

L'isotope ^{235}U est le seul isotope fissile naturel. Sa fission libère une énergie de 202,8 MeV par atome fissionné. De ce fait, l'uranium est devenu la principale matière première utilisée par l'industrie nucléaire. L'uranium 238, bien que beaucoup plus stable et très peu fissile, est dit fertile car il peut être transformé, par absorption d'un neutron, en plutonium 239 encore plus fissile que l'uranium 235.

Les différentes catégories de l'uranium mises en œuvre dans le « **cycle du combustible nucléaire** » sont :

- Uranium naturel (teneur en ^{235}U égale à 0,71 %) : minerais
- Uranium faiblement enrichi (teneur en ^{235}U supérieure à 0,71 % et strictement inférieure à 20 %) : exploité dans le secteur électronucléaire (dénommé UNE)
- Uranium hautement enrichi (teneur en ^{235}U supérieure ou égale à 20 %) : exploité dans les secteurs de la Défense, des réacteurs de recherche et de la médecine nucléaire.
- Uranium appauvri (teneur en ^{235}U inférieure à 0,71 %) : exploité dans les réacteurs à neutrons rapides et dans l'armement conventionnel (dénommé Uapp)
- Uranium de retraitement (dénommé URT)
- Uranium de retraitement ré-enrichi (dénommé URE)

Applications :

L'utilisation la plus répandue de l'uranium est la production d'électricité. L'uranium faiblement enrichi (UNE) sous la forme d'oxyde d'uranium (UO₂) est l'élément de base du combustible alimentant les réacteurs nucléaires du monde entier.

L'uranium appauvri, associé au plutonium issu du retraitement des combustibles irradiés, sert à fabriquer le combustible MOX (Oxyde mixte d'uranium et de plutonium) qui permet de réalimenter les réacteurs à eau légère (REP). Le MOX contribue ainsi au recyclage du plutonium.

L'uranium de retraitement et l'U appauvri peuvent être ré-enrichis et recyclés. L'uranium de retraitement ré-enrichi est recyclé dans certains REP actuels et l'U appauvri sera recyclé dans les réacteurs RNR de 4^{ème} génération.. Cette stratégie permettrait de valoriser notre stock de matières premières dans une perspective de nucléaire durable.

1. INTRODUCTION

À l'origine, un combustible était une substance qui, en se combinant avec l'oxygène lors d'une réaction chimique, produisait de la chaleur (feu de bois), la forme la plus classique de l'énergie. Par similitude, l'uranium, qui produit de l'énergie lors des réactions de fission est appelé « **combustible nucléaire** ».

Partout présent dans la croûte terrestre à l'état de traces (2 ppm¹) ou dans l'eau des océans (3 ppb²) l'uranium peut atteindre des concentrations allant jusqu'à ±1% dans les roches primaires (granites & schistes) ou tertiaires (calcaires), qui constituent les gisements miniers répartis sur tous les continents, dont la pechblende est l'une des formes les plus répandues. Mais il faut rappeler que la première utilisation de l'uranium a été la faïence et la céramique où il servait à la préparation de pigments jaune, orange et vert par extraction d'oxydes (uraninite, vanadate, carnotite) ou de phosphates (autunite).

Comme pour le charbon ou le pétrole, entre l'extraction et l'utilisation en combustible dans une centrale thermique, la production d'énergie par l'uranium est soumise à plusieurs étapes durant lesquelles l'uranium se trouve sous différentes formes physico-chimiques (voir chapitre 3 ci-après). Ces étapes sont :

- **Extraction** du minerai,
- **Concentration** en uranium des minerais sur les lieux d'extraction (le minerai d'origine ne contient généralement que ±1 % d'uranium),
- **Conversion** du concentré d'uranium sous forme d'hexafluorure (UF₆),
- **Enrichissement** de l'UF₆ en isotope ²³⁵U pour passer de la concentration naturelle de 0,71 % de ²³⁵U/²³⁸U à environ 3 à 4 % (en fonction du type de réacteur d'utilisation),
- **Fabrication** du combustible par conversion de l'UF₆ en pastilles frittées d'UO₂ empilées dans les crayons, lesquels sont regroupés en assemblage.

2. CARACTÉRISTIQUES DE L'URANIUM

Sur le plan chimique, l'uranium, élément de numéro atomique Z = 92 fait partie de la famille des actinides [qui compte quinze éléments de l'actinium (Z = 89) au lawrencium (Z = 103)]. C'est l'élément naturel le plus lourd.

L'uranium comprend de nombreux isotopes (voir tableau 1 ci-après), dont les plus importants sont l'²³⁸U (fertile) à raison de 99,27 %, l'²³⁵U (fissile) en proportion de 0,72 % et l'²³⁴U, en proportion de 0,005 %, plus quelques autres isotopes tels que ²³²U, ²³³U, ²³⁶U, ²³⁷U et ²³⁹U. Le tableau 1 ci-dessous fournit la chaîne complète de décroissance radioactive des isotopes de l'uranium.

La capacité de fission spontanée de l'²³⁵U peut conduire à des réactions très dangereuses : la criticité, lorsqu'il est concentré sous une géométrie sphérique avec un réflecteur d'eau. Les masses critiques conduisant au déclenchement de la réaction sont de 22,8 kg pour l'²³⁵U métal, 11 kg pour ²³⁵UO₂ et 0,810 pour l'²³⁵U en solution aqueuse.

À l'état élémentaire, l'uranium est un métal avec une masse volumique très élevée : ρ = 19,04 kg/dm³. Ayant des similitudes avec le chrome et le tungstène, en contact avec l'eau et l'air, il produit des réactions pyrophoriques extrêmement violentes.

Isotope	Période de fission spontanée	Période de désintégration (T1/2)	Désintégrations mode, énergie en MeV (%)
²³² U	8.10 ¹³ an	68,9 an	α 5,32 (68,6 %) ; α 5,26 (31,2 %) ; γ 0,058
²³³ U	1,7.10 ¹⁷ an	1,6.10 ⁵ an	α 4,82 (82,7 %) ; α 4,78 (14,9 %) ; γ 0,097
²³⁴ U	2.10 ¹⁶ an	2,5.10 ⁵ an	α 4,77 (72 %) ; α 4,72 (23%)
²³⁵ U	3,5.10 ¹⁷ an	7,0.10 ⁸ an	α 4,40 (57 %), α 4,38 (18 %), γ 0,19
²³⁶ U	2.10 ¹⁶ an	2,3.10 ⁷ an	α 4,49 (74 %) ; α 4,46 (14,9 %)
²³⁷ U		6,75 jours	β ⁻ 0,52 ; g 0,06
²³⁸ U	8,2.10 ¹⁵ an	4,5.10 ⁹ an	α 4,20 (77 %) ; α 4,15 (23 %)
²³⁹ U		23,5 minutes	β ⁻ 1,29 ; γ 0,075

Tableau 1 : Caractéristiques des isotopes de l'uranium

¹ Deux parties par million, 2.10⁻⁶ ou encore 2 milliardièmes de la masse de matériau observée.

² Trois parts par billion, soit 3 milliardièmes ou 3.10⁻¹².

Chaînes de décroissance											
^{238}U							^{235}U				
^{238}U 4,2 MeV 4,5.10 ⁹ a		^{234}U 4,8 2,4.10 ⁵ a				Z 9 2	^{235}U 4,4 7.10 ⁸ a				
□	$^{234}\text{Pa}^{\square}$ 0,5 6,7 h	□				9 1	□	^{231}Pa 5,0 3,3.10 ⁴ a			
$^{234}\text{Th}^{\square}$ 0,2 24 j		^{230}Th 4,7 7,5.10 ⁴ a				9 0	$^{231}\text{Th}^{\square}$ 0,3 25,5 h	□	^{227}Th 6 18,7 j		
		□				8 9		$^{227}\text{Ac}^{\square}$ 0,04 21,8 a	□		
		^{226}Ra 4,8 1600 a				8 8			^{223}Ra 5,7 11,4 j		
		□				8 7			□		
		^{222}Rn 5,5 3,8 j				8 6			^{219}Rn 6,8 3,96 s		
		□				8 5			□		
		^{218}Po 6 3 min	^{214}Po 7,7 164 ms	^{210}Po 5,3 138 j		8 4			^{215}Po 7,4 1,8 ms		
		□	$^{214}\text{Bi}^{\square}$ 1,5 19,9 min	□	$^{210}\text{Bi}^{\square}$ 1,2 5 j	8 3			□	^{211}Bi 6,6 2,2 min	
		$^{214}\text{Pb}^{\square}$ 0,7 26,8 min	$^{210}\text{Pb}^{\square}$ 0,02 22,3 a		^{206}Pb Stable	8 2			$^{211}\text{Pb}^{\square}$ 1,4 36,1 min	□	^{201}Pb Stable
						8 1				$^{207}\text{Tl}^{\square}$ 1,4 4,8 min	

^{238}U = isotope - 4,2 = énergie en MeV- 4,510⁹ a = période (T1/2) - désintégrations □ = α, □ = β⁻

Tableau 2 : Chaînes de décroissance des isotopes de l'uranium

3. EXTRACTION MINIÈRE

L'uranium naturel est un élément naturel (Unat), relativement répandu dans l'écorce terrestre, dont l'extraction s'effectue soit dans des mines à ciel ouvert, soit dans des mines souterraines ou par la technique de lixiviation in situ. Comme la plupart des minerais, l'uranium n'est pas extrait sous sa forme pure, mais dans des roches, combinées à d'autres éléments chimiques.

Dans la nature, l'élément uranium, naturellement radioactif se trouve en combinaison avec des oxydes, des nitrates, des sulfates ou des carbonates. Il est présent dans des couches géologiques, solides ou liquides. L'uranium à son état naturel est composé de 3 isotopes :

- 99,3 % d'uranium 238 (aussi noté 238U)

- 0,72 % d'uranium 235 (235U)
- de l'uranium 234, à l'état de traces

Des mines d'uranium ont été exploitées en France. Il a été décidé de mettre fin à leur exploitation au début des années 90, pour des raisons de rentabilité économique. La production mondiale d'uranium s'est élevée à 60 000 tonnes en 2022.

Les principaux gisements aujourd'hui exploités dans le monde, y compris pour les besoins du parc nucléaire français, se répartissent pour l'essentiel entre le Kazakhstan, le Canada, la Namibie, l'Australie, l'Ouzbékistan, la Russie, le Niger et la Chine. Le tableau 3 ci-dessous donne la répartition 2022 de la production mondiale d'uranium.

Pays	(%)
Australie	9,2
Kazakhstan	43
Canada	14,9
Russie	5,1
Namibie	11,4
Ouzbékistan	6,7
Niger	4,1
Chine	3,4
Reste du monde	2,2

Tableau 3 : Ressources mondiales en uranium disponibles

4. CONCENTRATION DES MINERAIS

La faible concentration en uranium des minerais conduit à les traiter sur le site de la mine, afin de réduire les coûts de transport, de laisser les « stériles » sur leur lieu de production et de fournir un produit marchand, le « yellow-cake ». Après concassage et broyage du minerai, l'uranium est extrait par réactions chimiques (acides ou basiques) dans une solution aqueuse.

La solution uranifère, avec un taux de récupération d'uranium supérieur à 90 % est ensuite traitée par précipitation ou extraction sur des résines échangeuses d'ions afin de purifier et de concentrer l'uranium.

Ce concentré est alors précipité sous forme d'uranate qui constitue finalement le « yellow-cake » $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$ titrant entre 65 et 70 % en masse d'uranium stable. Cet aggloméré de poudre, chimiquement très stable, est alors mis en conteneurs aisément transportables



Echantillon de poudre de « yellow-cake »

5. CONVERSION EN UF6

Les opérations de conversion consistent à transformer les concentrés miniers en hexafluorure d'uranium (UF_6) tout en lui donnant la pureté indispensable à la fabrication du combustible nucléaire. Ces opérations constituent une étape essentielle dans le cycle du combustible, entre les activités minières et l'enrichissement de l'uranium.

Le procédé de conversion se déroule en deux étapes :

- **Transformation de l'uranium en tétrafluorure d'uranium (UF_4)**

Le concentré minier est dissout par de l'acide, puis purifié. Après précipitation-calcination, on obtient de la poudre de trioxyde d'uranium (UO_3) qui est ensuite hydrofluorée à l'aide d'acide fluorhydrique. L'uranium se transforme ainsi en une substance de couleur verte à l'aspect granuleux, appelée tétrafluorure d'uranium (UF_4). Ces opérations sont réalisées dans l'usine COMURHEX-Malvési

- **Transformation du tétrafluorure d'uranium (UF_4) en hexafluorure d'uranium (UF_6)**

L' UF_4 est, dans un second temps, converti en hexafluorure d'uranium (UF_6) par fluoration, à l'aide de fluor obtenu par électrolyse d'acide fluorhydrique. L' UF_6 est fabriqué par contact de fluor gazeux avec la poudre

d'UF₄. La réaction chimique se fait à très haute température dans un réacteur à flammes. Une dernière étape consiste à faire passer l'UF₆ obtenu de l'état solide à l'état gazeux. Il est alors possible de l'enrichir. Ces opérations sont réalisées dans l'usine COMURHEX du Tricastin.

L'UF₆ a l'avantage de se présenter sous forme solide à une température et à une pression ambiantes et de se gazéifier à température modérée (60 °C). Le fluor est un élément naturel mono-isotopique (¹⁹F) ce qui limite l'UF₆ à seulement trois molécules isotopiquement différentes (²³⁴UF₆, ²³⁵UF₆, et ²³⁸UF₆) particulièrement bien adaptées aux opérations de séparation pour obtenir l'enrichissement.

6. ENRICHISSEMENT

Il existe plusieurs méthodes d'enrichissement (voir fiche argumentaire [GAENA "Procédés industriels d'enrichissement de l'uranium"](#)). Les techniques les plus répandues sont la **diffusion gazeuse** et l'**ultracentrifugation**. Toutes deux reposent sur la légère différence de masse entre uranium 235 et 238. La séparation par laser exploite les différences de spectre électromagnétique. Elles nécessitent également la mobilité des atomes individuels, donc l'utilisation d'uranium sous forme de vapeur, de gaz d'hexafluorure d'uranium UF₆, voire de liquide pour la diffusion thermique.

L'industrie de l'enrichissement est concentrée sur le plan mondial entre quatre grandes entités cumulant la quasi-totalité des capacités d'enrichissement : Rosatom (Russie) : 44,8 % des capacités, Orano (anciennement Areva, France) à travers la *Société d'Enrichissement du Tricastin*, dont elle détient 88 %, qui exploite l'usine Georges-Besse II : 12,8 %, Urenco (Royaume-Uni, Pays-Bas, Allemagne, États-Unis) : 32,6 % et CNNC (Chine) : 8,8 %. Les États-Unis ne possèdent plus qu'une usine d'enrichissement exploitée par Urenco. Les décisions prises en 2024 d'interdire l'importation d'uranium de retraitement ré-enrichi en provenance de la Russie va probablement contribuer à stimuler les investissements sur le marché intérieur américain.

6.1. LA DIFFUSION GAZEUSE

Le procédé est basé sur la différence de masse, très faible, existant entre les molécules d'hexafluorure d'uranium 235, plus légères que celles d'hexafluorure d'uranium 238. En les faisant filtrer à travers des membranes adaptées, on arrive en multipliant suffisamment le nombre de cycles à obtenir de l'uranium enrichi.

6.2. L'ULTRACENTRIFUGATION

Ce procédé consiste à utiliser des centrifugeuses tournant à très grande vitesse. Les molécules les plus lourdes (²³⁸UF₆) se retrouvent projetées à la périphérie, alors que les plus légères (²³⁵UF₆) migrent vers le milieu de la centrifugeuse. Comme pour la diffusion gazeuse, le traitement doit être appliqué de nombreuses fois pour obtenir un enrichissement suffisant. Les centrifugeuses sont donc montées en cascades, le gaz passant de l'une à la suivante en augmentant progressivement sa teneur.

La firme Urenco exploite trois usines d'enrichissement de l'uranium par ultra-centrifugation ; Capenhurst au Royaume-Uni, Almelo aux Pays-Bas et Gronau en Allemagne. L'ultracentrifugation est utilisée en Russie (4 usines, dont l'usine de Seversk habilitée à ré-enrichir l'uranium de retraitement, plus radioactif que l'uranium naturel.), aux États-Unis (Eunice), au Japon (Rokkasho-Mura), ainsi qu'en Chine (Shaanxi) qui dispose des deux technologies. Areva a racheté des brevets à Urenco pour construire l'usine d'enrichissement Georges-Besse-II. En décembre 2022, Orano a relancé le projet d'extension de son usine Georges-Besse II d'enrichissement d'uranium qui vise une augmentation de ses capacités de production d'uranium enrichi de 30 % ; les travaux débuteront fin 2024 pour une fourniture des premiers clients en 2028.

Ce projet, à l'étude chez Areva en 2004, avait été arrêté à la suite de l'accident nucléaire de Fukushima, mais redevient opportun à la suite de l'invasion de l'Ukraine par la Russie en 2022, qui cause une désaffection croissante pour des commandes d'uranium enrichi russe. En 2024, les États-Unis ont décidé d'interdire à terme l'importation d'uranium de retraitement ré-enrichi en provenance de la Russie.

7. FABRICATION DU COMBUSTIBLE

La préparation des combustibles pour réacteurs électrogènes à eau légère repose sur des techniques de métallurgie des poudres. Ces poudres sont comprimées dans des presses pour former de petites pastilles qui sont ensuite frittées à haute température (1973 K) sous atmosphère réductrice (argon/hydrogène).

Après rectification les pastilles d'UO₂ se présentent sous forme de cylindres : h = 15 mm, \varnothing = 8,2 mm. Elles sont alors empilées dans des tubes de zircaloy 4, longs de 4 mètres, placés sous pression d'hélium et forment ainsi les aiguilles combustibles. Ces aiguilles sont rassemblées dans des assemblages de 17 x 17 selon le standard d'EDF.

La fabrication des assemblages de combustible est répartie sur 6 sites en Europe et aux États-Unis, approvisionnant les électriciens du monde entier :

- **Allemagne** (sites de Karlsruhe et de Lingen ; ce dernier produisant de la poudre d'oxyde d'uranium, des pastilles de combustible, des crayons et des assemblages pour réacteurs REP et REB).
- **Belgique** (site de Dessel, qui fabrique notamment les assemblages de combustible MOX).
- **Etats-Unis** :
 - site d'Erwin qui assure la conversion de nitrate d'uranyle faiblement enrichi en oxyde d'uranium (fissile) et le livre à l'usine de Richland aux fins de mise en pastille pour la fabrication du combustible).
 - site de Richland qui produit de la poudre d'oxyde d'uranium, des pastilles de combustibles, des crayons et des assemblages pour réacteurs REP et REB, ainsi que des crayons de poison consommable (B_4C).
- **France** (site FBFC de Romans qui produit de la poudre d'oxyde d'uranium, à partir de l'UF6 livré par Orano-GB2, des pastilles de combustible, des embouts, des crayons et des assemblages pour réacteurs REP, site de Pierrelatte qui fabrique des grilles et des grappes de commande pour assemblages).

8. RECYCLAGE DES MATIÈRES NUCLÉAIRES VALORISABLES

On distingue différents types de matières nucléaires valorisables (voir Figure 1). Elles concernent :

- l'uranium appauvri (Uapp) résultant du processus d'enrichissement de l'uranium naturel (0,2 – 0,3 % d' ^{235}U),
- l'uranium de retraitement (URT) provenant du recyclage des combustibles usés,
- le plutonium, issu du retraitement, associé à l'uranium appauvri, servant à la fabrication du combustible MOX (voir [fiche argumentaire GAENA "Plutonium"](#)).

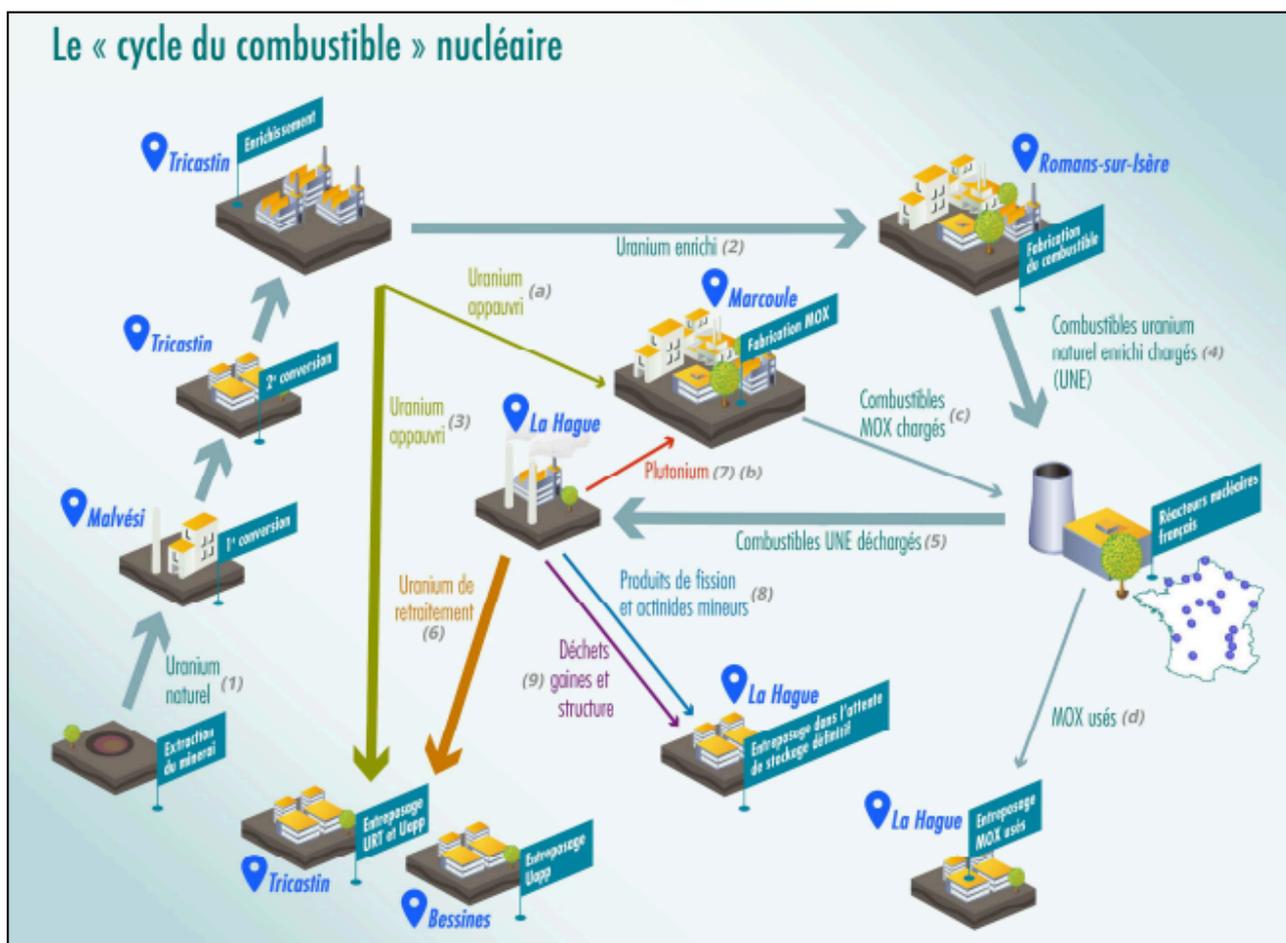


Figure 1 : Synoptique du cycle du combustible nucléaire en France

Les utilisations actuelles ou projetées de ces matières valorisables dans les différents types de réacteurs nucléaires à partir des années 2040/2050 sont résumées dans le tableau 4 ci-après.

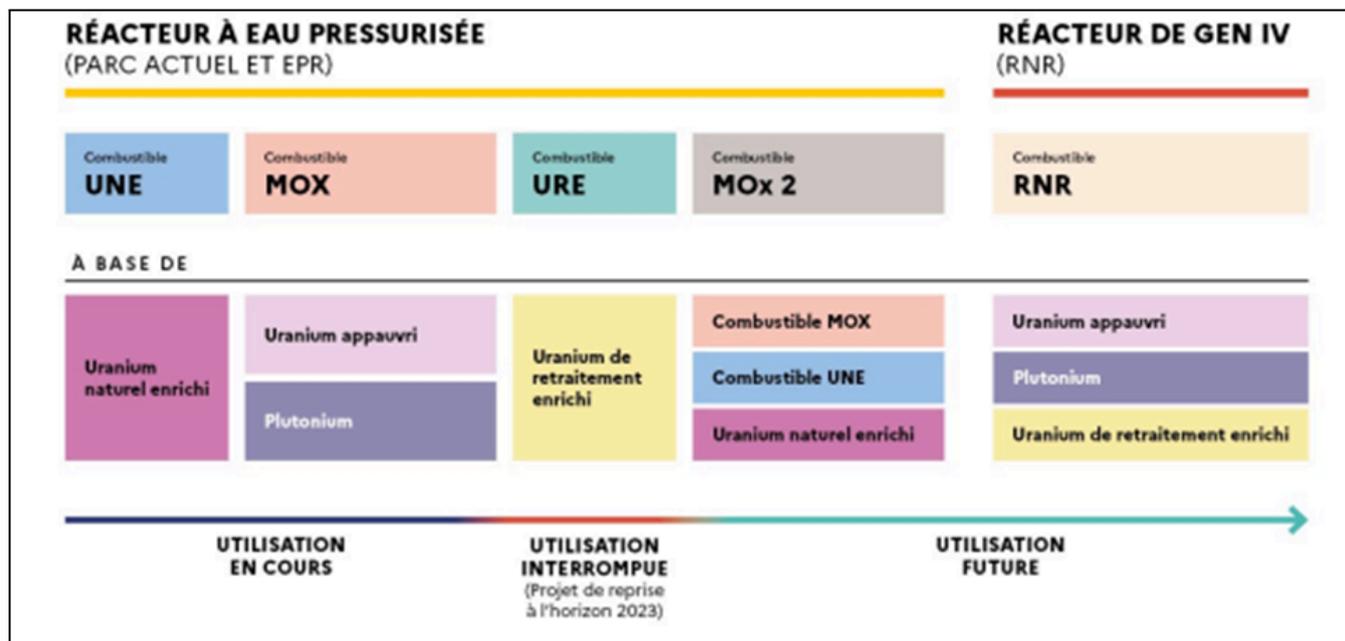


Tableau 4 : Utilisation des matières valorisables dans les réacteurs nucléaires

8.1. VALORISATION DE L'URANIUM APPAUVRI

L'uranium appauvri (Uapp) est un sous-produit du processus d'enrichissement de l'uranium. Il possède typiquement une teneur en ^{235}U de l'ordre de 0,2 à 0,3 %. Il est entreposé sous forme de d' U_3O_8 ou d' UF_6 . L' U_3O_8 se présente sous la forme d'une poudre gris-noir de densité 2 à 3,7 suivant son compactage. Cette poudre stable jusqu'à 1 300 °C, non corrosive, est tout à fait comparable à l'oxyde d'uranium présent dans les gisements exploités. L'uranium appauvri est plus faiblement radioactif que l'uranium naturel.

Il est possible de produire de l'uranium enrichi à partir d'uranium appauvri, en acceptant bien sûr une augmentation des coûts de production. Pour satisfaire le besoin annuel du Parc EDF, soit 1 000 tonnes d'uranium enrichi chaque année, il faudrait puiser dans le stock national qui s'élève à fin 2012 à 324 000 tonnes (550 000 tonnes à l'horizon 2050). Ceci offrirait une autonomie de 15 ans ce qui serait un délai suffisant pour basculer sur un parc de réacteurs à neutrons rapide (RNR), indépendamment des tensions internationales.

Les réacteurs à neutrons rapides constituent un outil unique du nucléaire durable. Ils tirent parti de 99 % de la matière énergétique en utilisant les neutrons de la fission sans les ralentir comme c'est le cas d'un réacteur classique. Ce système permet aux RNR de consommer l' ^{238}U contenu dans l'uranium naturel ou appauvri ce qui économise de la ressource et minore la production de déchets.

Ce stock d'uranium appauvri représente un gisement précieux qui pourrait être exploité avantageusement (voir annexe 1 « Perspectives de valorisation de l'uranium appauvri »).

8.2. VALORISATION DE L'URANIUM DE RETRAITEMENT

L'**uranium de retraitement** (URT) est produit par le traitement des combustibles UOX irradiés, issus du cycle d'un réacteur à eau légère. Le combustible nucléaire usagé de ces filières contient principalement de l'uranium (de l'ordre de 95 % de la masse), dont la proportion d'uranium 235 (^{235}U) est supérieure à la teneur naturelle, de l'ordre de 1 %.

Cet uranium de retraitement était peu utilisé, d'une part à cause des inconvénients associés à sa composition isotopique, et d'autre part parce que les cours de l'uranium naturel étaient relativement bas, rendant l'uranium de retraitement peu compétitif. Mais cette situation pourrait évoluer en fonction du cours de de l'uranium sur le marché international. Une alternative serait une utilisation en l'état, comme matière première dans un cycle surgénérateur au plutonium.

L'URT peut être ré-enrichi pour produire de l'uranium de retraitement enrichi (URE). Cependant la présence d' ^{236}U neutrophage et enrichi avec l' ^{235}U , impose d'enrichir à des teneurs supérieures à celles nécessaires pour l'uranium naturel, de manière à compenser la perte de réactivité. En France, les 4 réacteurs de 900 MWe de la centrale nucléaire de Cruas sont autorisés à fonctionner avec du combustible URE.

Ce ré-enrichissement de l'URT français a été effectué à l'étranger (entreprise Russe Tenex principalement et entreprise Urenco implantée aux Pays-Bas) à partir d'un procédé d'ultracentrifugation, car la technologie de diffusion gazeuse mise en œuvre dans l'installation française de George Besse I (Tricastin) n'était pas conçue pour. .

Compte tenu de la situation géopolitique actuelle, la France a relancé au premier semestre 2024 le projet de construction d'un complexe complet « Conversion – Enrichissement » de l'URT sur le territoire national. Les principaux intérêts procurés par le recyclage de l'URT sont détaillés dans l'Annexe 2 : « *Perspectives de valorisation de l'Uranium de retraitement* ».

8.3. FABRICATION DU COMBUSTIBLE MOX

Environ 10,8 tonnes de plutonium issues du traitement des combustibles UNE usés, associées à de l'uranium appauvri (celui-ci entrant à plus de 90 % dans la composition du combustible) sont mises en œuvre chaque année pour la fabrication d'assemblages combustible dits « MOX » (Mélange d'Oxydes de plutonium et d'uranium naturel ou appauvri).

Les principaux avantages d'une valorisation du plutonium et de l'uranium appauvri dans la fabrication du combustible MOX sont décrits dans les fiches argumentaires **GAENA "Cycle du combustible"** et **"Éléments pour le choix d'un mode de gestion des combustibles usés"**. La fiche **argumentaire GAENA "Plutonium"** décrit de façon détaillée le processus de fabrication de ce combustible MOX.

Dans les conditions d'utilisation actuelle du parc nucléaire français, le recyclage du plutonium contenu dans les combustibles MOX usés n'est pas réalisé car ce plutonium présente un potentiel énergétique moindre que celui du plutonium extrait du combustible UNE usé. De plus, l'activité radioactive des MOX usés est plus élevée que celle du combustible UO₂ usé, les installations et procédés d'extraction du plutonium présent dans le MOX nécessiteraient des modifications substantielles pour la prise en compte de ce niveau de radioactivité. Par ailleurs, cette activité supérieure nécessiterait une durée d'entreposage plus longue avant que le MOX usé ait suffisamment refroidi.

Un programme de multi-recyclage de Pu en REP est envisagé à partir des années 2040.

9. RESSOURCES ET MARCHÉ DE L'URANIUM NATUREL

■ Coût de l'uranium

La demande en uranium a connu un pic dans les années 1950 pendant la course aux armements entre les États-Unis et l'URSS. Elle a repris dans les années 1970 avec le démarrage du nucléaire civil pour ensuite se stabiliser au début des années 1980 à la suite de la fin de la construction des centrales nucléaires de 2^{ème} génération.

La pression des groupes d'opinion antinucléaires accentue cette tendance dès 1986 après la catastrophe de Tchernobyl. Le graphe 1 ci-dessous présente l'évolution du coût de l'uranium pour la période 2016-2024.



L'accident de Fukushima en mars 2011 a ouvert une nouvelle période d'incertitudes avec toutefois une pression accrue de la demande énergétique des pays émergents.

En janvier 2024, le prix de la livre d'uranium a dépassé la barre symbolique des 100 \$. En l'espace d'un an, les prix du combustible nucléaire ont plus que doublé en raison des programmes de construction de réacteurs et des problèmes de production rencontrés par les principaux acteurs miniers.

Cependant, cela ne devrait pas compromettre la rentabilité de l'énergie nucléaire. La courbe ci-jointe montre les variations du prix de l'uranium sur la période 2010-2024.

◀ **Graphe 1 : Evolution du coût de l'uranium**

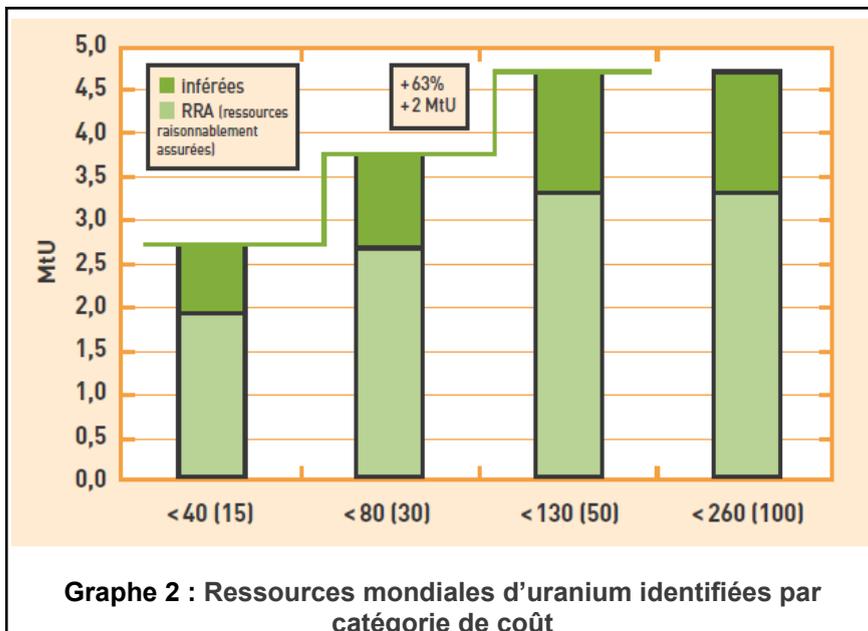
■ Evolution des ressources disponibles en fonction du coût de l'Uranium

Les ressources mondiales d'uranium exploitables dépendent des coûts d'accès.

À titre d'exemple, pour un coût inférieur à 80 \$/kg, elles sont évaluées à environ 2,5 Mt (millions de tonnes). Ces ressources peuvent être portées à 3,3 Mt pour un coût de 130 \$/kg (cf. graphe 2 ci-contre).

À ce jour environ 1,2 millions de tonnes ont été utilisés, 0,800 millions de tonnes constituent les stocks et le parc électronucléaire actuel consomme environ 50.000 t par an.

La production mondiale d'uranium doit passer du niveau actuel d'un peu plus de 40 ktU par an à un niveau d'au moins 60 ktU/an à l'horizon 2030.



■ Quelles sont les ressources disponibles à long terme ?

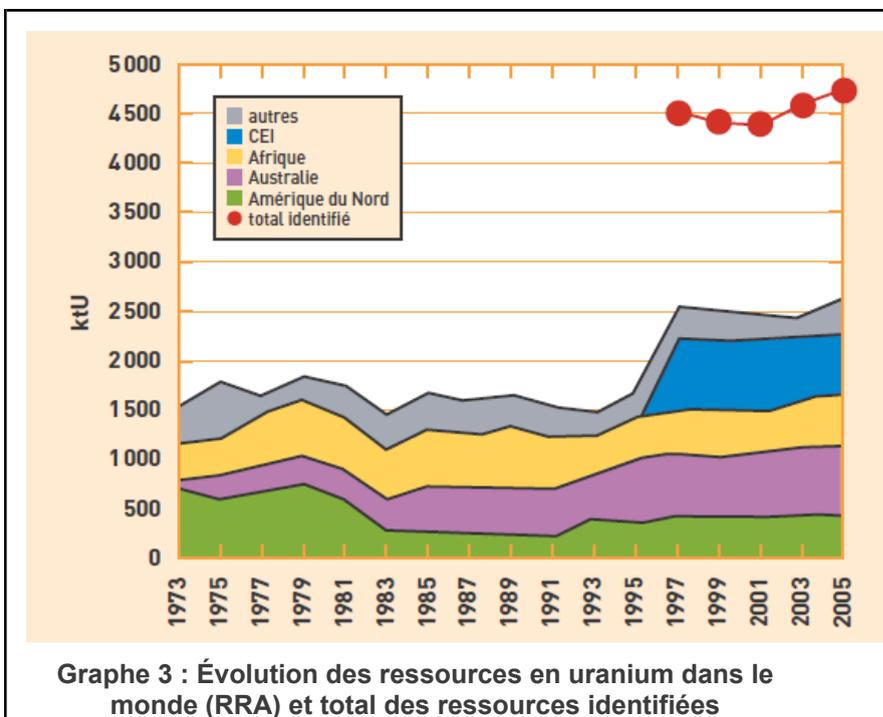
Les données sur les "ressources" se subdivisent en diverses catégories par degré de connaissance géologique et par catégorie de coût de récupération de l'uranium. Elles comportent **des ressources identifiées**, regroupement de ressources raisonnablement assurées (**RRA**, statistiquement proches des "réserves") et de **ressources "inférées"**, autrement dit les gisements découverts, étudiés et correctement évalués, ainsi que leurs prolongements immédiats. Le monde dispose aujourd'hui d'un total de 4,75 MtU de ressources identifiées, assez pour alimenter un parc de réacteurs de la taille de l'actuel pendant plus de 70 ans (voir graphe 4)

S'y ajoutent potentiellement 10 MtU de "ressources non découvertes", sans même mentionner des ressources non conventionnelles représentant des quantités très significatives.

La réduction des arsenaux nucléaires stratégiques américains et russes libère d'importantes quantités d'U très enrichi, tandis que l'évolution des technologies des réacteurs en permet une meilleure utilisation.

Mais c'est surtout la perspective d'accéder à la technologie des réacteurs à neutrons rapides (RNR) (voir [fiche GAENA "Génération IV"](#)) qui offre la possibilité d'accéder à des nouvelles ressources de combustibles.

Cette perspective porte la disponibilité des ressources d'énergie nucléaire à plusieurs milliers d'années, c'est-à-dire bien supérieures au pétrole, au gaz et au charbon réunis, tout en évitant leurs nuisances pour l'environnement.



10. CONCLUSION

Le recyclage des matières valorisables (plutonium, uranium de retraitement, uranium appauvri) offre des perspectives intéressantes que la France met déjà à profit. Ce processus sera amplifié dans les décennies à venir.

Environ 10,8 tonnes de **plutonium** issues du traitement des combustibles UNE usés, associées à de l'uranium appauvri (celui-ci entrant à plus de 90 % dans la composition du combustible) sont mises en œuvre chaque année pour la fabrication d'assemblages combustibles dits « MOX » (Mélange d'Oxydes de plutonium et d'uranium appauvri) recyclés dans les REP.

L'uranium de retraitement ré-enrichi peut être recyclé dans les REP. Les premières tranches qui seront chargées en combustible URT ré-enrichi seront progressivement les tranches de Cruas, puis à partir de 2027 jusqu'à 3 tranches de réacteurs 1300 MWe.

L'uranium appauvri, associé au plutonium peut être utilisé dans les réacteurs EPR-2 dès l'instant que le multi-recyclage deviendra opérationnel et de manière continue dans les réacteurs de 4^{ème} génération du type RNR (réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium). Cette technologie offre les avantages mentionnés ci-après.

Utilisation de l'uranium appauvri

Les réacteurs à neutrons rapides sont un outil unique du nucléaire durable. Grâce à la surgénération, les RNR permettent la consommation de l'uranium appauvri comme combustible et d'économiser par la même occasion les ressources et minorer la production de déchets radioactifs.

Les RNR sont donc indispensables au nucléaire durable et c'est même la seule façon d'accéder à cette étape de maturité de la production d'électricité nucléaire.

Ces RNR ne sont pas une lointaine possibilité ou un mirage puisqu'ils ont été en fonction en France, mais le développement du nucléaire durable a systématiquement été empêché par les écologistes pour des raisons politiques.

Si la France décidait de déployer industriellement les RNR à partir de 2050, le stock actuel d'uranium appauvri permettrait à la France une autonomie énergétique de plusieurs milliers d'années. Loin d'être un déchet, ce stock d'uranium appauvri est une ressource stratégique pour notre pays.

11. FICHES GAENA LIÉES

Fiche argumentaire GAENA : "[Génération IV](#)". Index de classement : ACB 03

Fiche argumentaire GAENA : "[Procédés industriels d'enrichissement de l'uranium](#)". Index de classement : ACD 05

Fiche argumentaire GAENA : "[Le Plutonium](#)". Index de classement : DDB 01

Fiche argumentaire GAENA : "[Cycle du combustible](#)". Index de classement : ACD 01

Fiche argumentaire GAENA : "[Choix d'un mode de gestion du combustible usé](#)". Index de classement : ACD 04

12. SOURCES

[Réf. 1] **OCDE** : Organisation de Coopération et de Développement Economique

[Réf. 2] **CEA** : Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

[Réf. 3] **WIKIPEDIA**

[Réf. 4] Rapport N° 1359 sur l'aval du cycle nucléaire par Christian Bataille et Robert Galley
<https://www.assembleenationalefr.rap-oecst/nucleaire/r1359-16.asp>

[Réf. 5] Rapport de la Cour des comptes du 4 juillet 2019 : L'aval du cycle du combustible nucléaire – Les matières et les déchets radioactifs, de la sortie du réacteur au stockage <https://www.ccomptes.fr/>

[Réf. 6] Rapport du HCTISN (Haut Comité pour la Transparence et l'Information sur la Sécurité Nucléaire) : Présentation du « Cycle du combustible français en 2018 » <http://www.hctisn.fr/>

Annexes

Annexe 1 : Perspectives de valorisation de l'uranium appauvri (Uapp)

La valorisation de l'uranium usé issu du retraitement par ré-enrichissement a été largement mise en œuvre, notamment en Russie (Rosatom), principalement pour ses besoins propres mais également pour le compte de clients étrangers, en s'appuyant sur ses capacités dédiées d'enrichissement. Orano a pratiqué le ré-enrichissement d'une partie de son stock d'uranium appauvri directement dans ses installations (usine Georges Besse, exploitée par Eurodif Production jusqu'en juin 2012) ou en ayant recours aux capacités russes.

Cette pratique a augmenté au milieu des années 2000 avec la flambée des cours de l'uranium. Elle a concerné de l'ordre de 60.000 tonnes d'uranium appauvri entre 2000 et 2010. Ces contrats se sont arrêtés progressivement à partir de 2010. Orano n'exclut cependant pas la possibilité d'un recours aux capacités d'enrichissement à l'étranger conjoncturellement sur capacités pour le ré-enrichissement de l'uranium appauvri de propriété Orano. À noter que

des enrichisseurs comme Rosatom et Urenco utilisent actuellement leurs capacités pour ré-enrichir leurs stocks d'uranium appauvri.

Pour Orano, le ré-enrichissement de l'uranium appauvri est ainsi considéré comme un projet national alternatif à un projet minier hors France qui nécessiterait des investissements et des développements. A partir des 300 000 tML d'uranium appauvri entreposés en France, il est possible de produire par ré-enrichissement près de 60 000 tonnes d'uranium naturel.

Cette ressource est par ailleurs facilement exploitable et sa mise en service pourrait être rapide : comparé à une durée moyenne de 10 ans de développement pour une mine classique, le temps nécessaire entre la date de décision du ré-enrichissement et sa mise en œuvre est de quelques mois seulement. Cette ressource domestique est l'un des piliers de la sécurité d'approvisionnement du parc nucléaire français.

• Valorisation dans les réacteurs RNR de 4^{ème} génération

Les réacteurs RNR de génération IV pourraient offrir la possibilité de valoriser plus complètement l'uranium appauvri, en transformant l'uranium 238 en plutonium 239 fissile. Ces systèmes sont donc particulièrement intéressants pour la valorisation d'uranium appauvri issu d'un second cycle d'enrichissement.

• Autres perspectives de valorisation de l'uranium appauvri

Un programme d'études et de recherche est mené par Orano pour évaluer les possibilités d'utilisation de l'uranium appauvri (l'uranium issu d'un second cycle d'enrichissement en particulier) à d'autres fins que la production électronucléaire : blindage radiologique (conteneurs, entreposages de substances radioactives), batteries, catalyseurs, convertisseurs thermoélectriques, stockage thermo-chimique réversible de chaleur, etc.

Annexe 2 : Perspectives de valorisation de l'uranium de retraitement (URT)

• Le recyclage de l'uranium issu du traitement des combustibles usés (URT) de 1994 à 2013

L'URT est plus irradiant que l'uranium naturel. Il contient encore une part d'uranium 235 (de l'ordre de 0,8 à 0,9 %) : on peut donc ré-enrichir cet uranium (après une conversion en UF₄ puis en UF₆) pour fabriquer du combustible à base d'uranium de retraitement enrichi (URE). En France, de 1994 à 2013, sur les environ 850 tonnes d'URT produites chaque année dans les usines de La Hague, de 300 à 600 tonnes étaient annuellement ré-enrichies pour être utilisées, sous forme de combustible URE, dans les tranches de 900 MW de la centrale nucléaire de Cruas.

Ce ré-enrichissement de l'URT français a été effectué à l'étranger (entreprise russe Tenex principalement et entreprise Urenco implantée aux Pays-Bas) à partir d'un procédé d'ultracentrifugation, car la technologie de diffusion gazeuse mise en œuvre dans l'installation française de George Besse I (Tricastin) ne l'autorisait pas (l'usine George Besse I était dédiée exclusivement à l'enrichissement de l'uranium naturel, elle a fonctionné de 1978 à 2012).

Comme le montre la figure ci-dessous, jusqu'en 2009, le flux de traitement à La Hague était d'environ 850 tML/an et EDF consommait entre 17 % et 34 % de la production annuelle d'URT selon les années. Entre 2010 et 2012 inclus, le recyclage a atteint 590 tonnes d'URT/an (60 % de la production annuelle). Ainsi sur l'ensemble de la période, 4 350 tonnes d'URT ont pu être ré-enrichies. Une seconde figure (Figure 3) indique les quantités d'URE qui ont alimenté les réacteurs de Cruas.

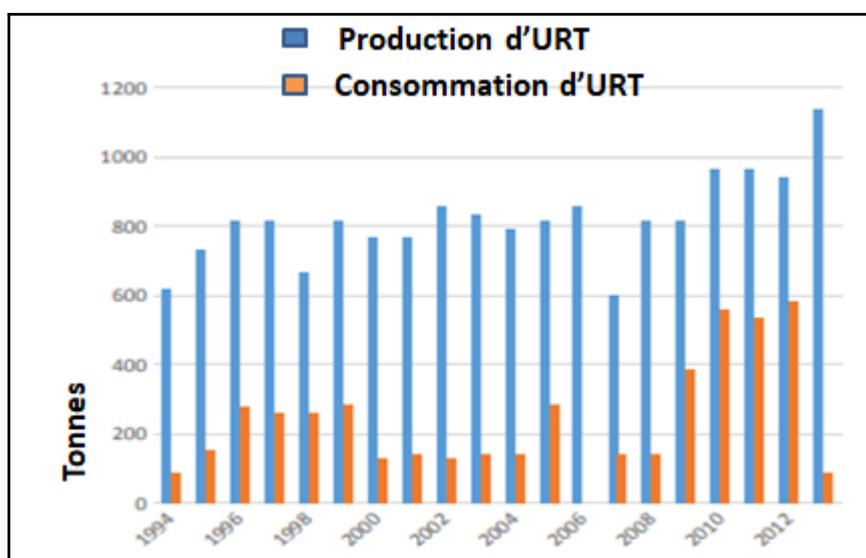


Figure 2 : Evolution de la production et de la consommation d'URT

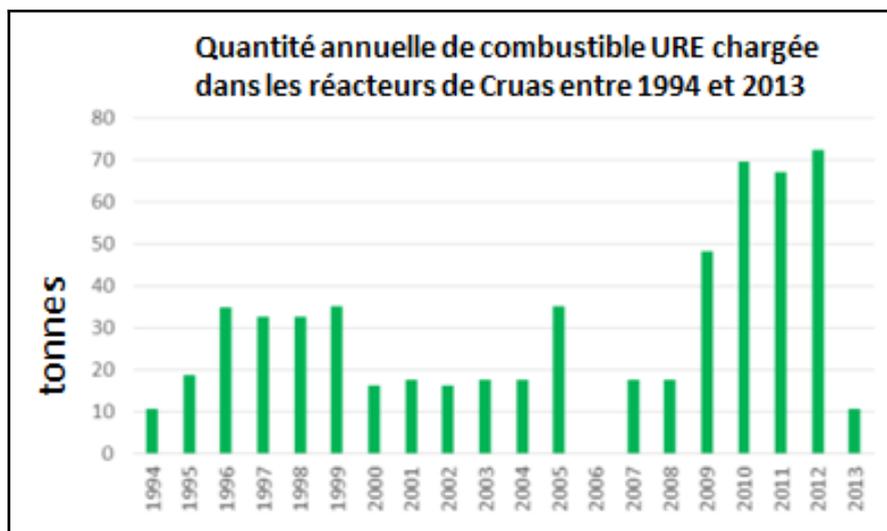


Figure 3 : Quantité annuelle de combustible URE chargée dans les réacteurs de Cruas

● Perspective de valorisation de l'URT : faisabilité technique du recyclage en France

L'usine Georges Besse II, mise en service en 2011, étant équipée d'une technologie d'ultracentrifugation, permettrait donc d'enrichir de l'URT dans l'un des modules de l'unité nord (en dédiant un nombre limité de centrifugeuses - installées en cascades - à l'enrichissement de l'URT).

Pour ce qui concerne la conversion (étape préalable à l'enrichissement), même si Orano dispose des compétences requises pour la conception et la réalisation d'un outil industriel de conversion de l'uranium de retraitement, la faiblesse conjoncturelle du marché sur ce segment d'activité a conduit Orano à différer l'adaptation de son outil industriel. Il est à noter que la nouvelle usine Comurhex II, dont les essais de mise en service ont débuté en 2018 pour atteindre une capacité nominale de production en 2021, n'est pas autorisée à convertir de l'URT.

Orano considère que ce service pourrait cependant être réalisé dans le cadre de contrats ou de partenariats avec des convertisseurs étrangers disposant de cette capacité en fonction des besoins clients. L'activité de recyclage de l'URT des combustibles usés dépend :

- de l'attractivité économique de l'URT par rapport à la filière de l'uranium naturel et appauvri ;
- d'un arbitrage entre utilisation actuelle et future, notamment en termes de sécurité d'approvisionnement.

● Décision d'EDF de reprendre le recyclage d'URT

EDF a décidé de reprendre à partir de 2023 le recyclage de l'URT dans certains de ses réacteurs. Cette reprise du recyclage de l'URT a pour objectif d'utiliser au mieux les matières nucléaires issues du traitement du combustible UNE usé (actuellement 1 080 tonnes/an produisant environ 1 026 tonnes d'URT) et de stabiliser puis réduire à terme le stock d'URT (à date, environ 26 930 tonnes). Le recyclage de l'URT nécessite trois étapes : la conversion de l'URT, son enrichissement (production d'URE) puis la fabrication du combustible URE. Les premières tranches qui seront chargées en combustible URE seront progressivement les tranches de Cruas, puis à partir de 2027 jusqu'à 3 tranches de réacteurs 1300 MWe.

Ainsi, en régime stabilisé, environ 138 tonnes de combustible URE seront chargées annuellement, correspondant à environ 1 100 tonnes d'URT recyclées soit un peu plus que la production annuelle d'URT issue du traitement. L'autre possibilité de recycler l'URT est d'en faire des MOX (multi-recyclage dans les REP).