

## LE TRAITEMENT POUR RECYCLAGE DU COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE USÉ

NB : Le terme « traitement pour recyclage » est désormais préféré à celui de « retraitement ».

Cette phase du cycle du combustible, qui permet le recyclage du combustible utilisé conformément aux principes du développement durable, de la maîtrise des déchets et de la sûreté de leur gestion, et de l'économie du combustible, a résulté d'un choix politique national grâce à la maîtrise d'un procédé dont les moyens techniques étaient qualifiés et disponibles.

### 1. OBJECTIFS

La Loi de juillet 1975, modifiée en 1992, définit le déchet ultime comme un déchet qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques ou économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable et/ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux.

Cette même loi précise deux principes clés :

- responsabilité du producteur ou du détenteur pour l'élimination des déchets
- contrôle par l'Administration

et fixe deux objectifs principaux :

- prévenir ou réduire la production et la nocivité des déchets
- valoriser les déchets par réemploi, et recyclage, pour obtenir des matériaux réutilisables ou de l'énergie

Pour répondre à ces objectifs, un procédé industriel de génération d'énergie en grande quantité exige donc, outre la disponibilité d'un élément énergétique et d'une machine de génération d'énergie, des procédés de diminution de la production de déchets, de leur valorisation et de réduction de leur caractère polluant ou dangereux.

Le retraitement des combustibles nucléaires usés est une technologie industrielle qui répond à cette dernière exigence par récupération des matières énergétiques, uranium et **plutonium** (voir [fiche argumentaire GAENA N° 21](#)) et, par transformation des produits de fission et d'activation formés lors de la libération d'énergie dans les réacteurs, en déchets ultimes compatibles avec un mode de stockage agréé.

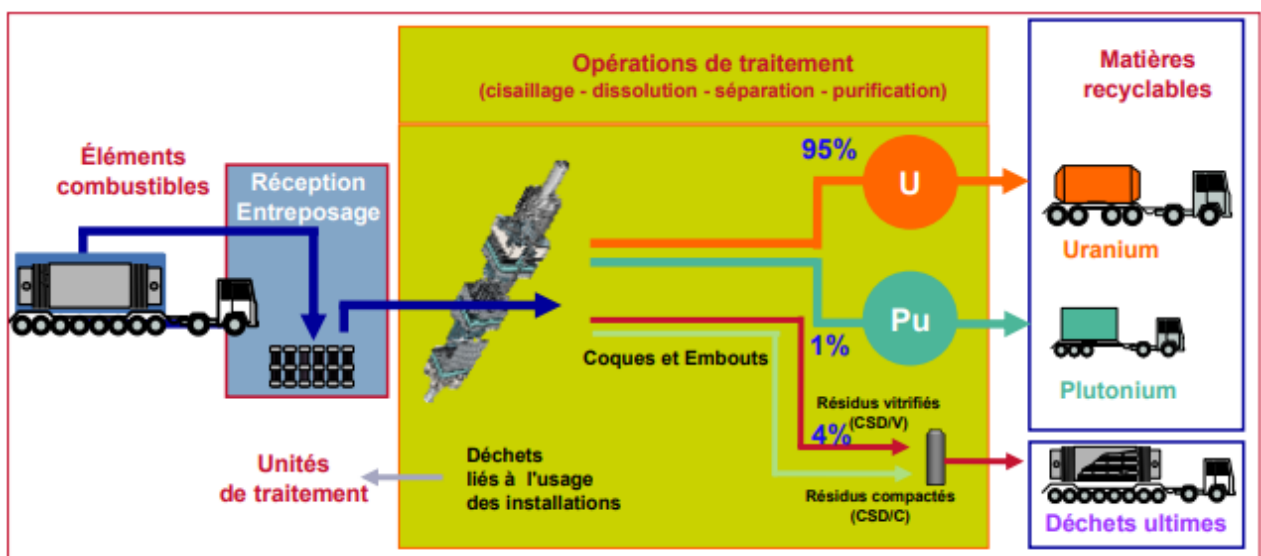
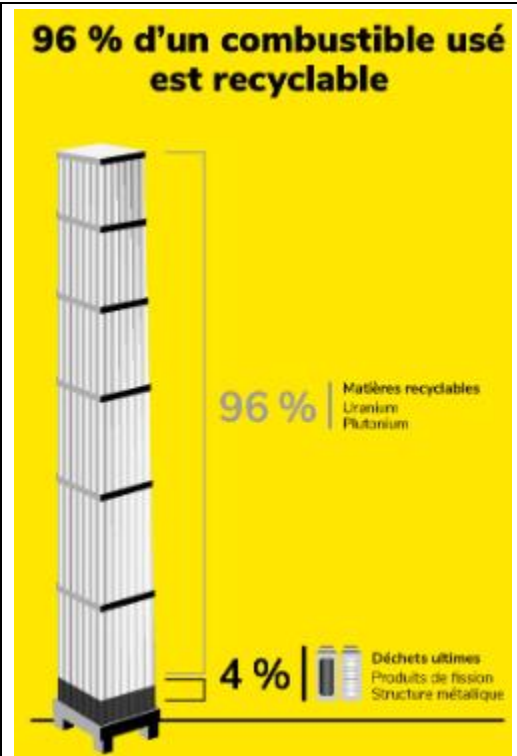


Figure 1 : Synoptique du procédé de retraitement du combustible nucléaire

Le combustible nucléaire retraité peut être soit de l'uranium naturel enrichi (**UNE**), de l'uranium appauvri ou provenir du recyclage de combustibles usés (uranium de recyclage issu du traitement des combustibles usés, dit **URT**).

Le choix d'une stratégie de recyclage pour la fin du cycle du combustible nucléaire répond ainsi à plusieurs principes :

- **Économie des ressources et indépendance énergétique** : Le recyclage des combustibles usés permet une économie d'uranium naturel allant jusqu'à environ 25 % lorsque l'uranium de retraitement et le plutonium sont recyclés. Cette économie est d'environ 10 % lorsque seul le plutonium est recyclé.
- **Facilitation de la gestion des déchets** : Une fois les matières uranium et plutonium extraites du combustible usé, les déchets les plus radioactifs (produits de fission [PF] et actinides mineurs [Am, Cm, Np]) sont concentrés et conditionnés de manière sûre, et stable. Quant aux déchets de structure des combustibles usés, ils sont compactés, ce qui permet de réduire le volume total des déchets ultimes à stocker d'un facteur de l'ordre de 5.
- **Réduction de la toxicité des déchets** : Le recyclage diminue jusqu'à 10 fois la toxicité intrinsèque des déchets, grâce au recyclage du plutonium présent dans le combustible usé (voir la [fiche argumentaire GAENA N° 3](#)).



Le retraitement correspond à l'article 1 de la Loi de Décembre 1991 (dite Loi Bataille) concernant les déchets radioactifs : assurer la gestion des déchets radioactifs de haute activité et à vie longue dans le respect de la protection de la nature, de l'environnement et de la santé, en prenant en considération les générations futures, qui sont les principes du développement durable.

## 2. PROCÉDÉ DE RETRAITEMENT

Après un demi-siècle d'expérience industrielle continue, la France a fait la preuve qu'elle maîtrise la technologie du retraitement des combustibles usés. Cette maîtrise a été obtenue par une montée en puissance de cette partie du cycle qui a su s'adapter à l'évolution des éléments combustibles et surtout à l'augmentation du taux d'énergie dégagée dans le réacteur, conduisant à un accroissement des contraintes industrielles. Ce procédé comprend les principales étapes suivantes.

### 2.1. Déchargement et entreposage

Après quelques années de refroidissement dans les piscines du bâtiment réacteur (les durées de décroissance radioactive des combustibles UNE et URE sont d'environ 18 mois et 30 mois pour le combustible MOX), les combustibles usés sont acheminés vers l'usine Orano la Hague, par route, par voie ferroviaire ou par mer.

Le transport s'effectue dans des emballages spécifiques répondant à toutes les exigences réglementaires (voir la [fiche argumentaire GAENA N° 8](#)).

La première opération réalisée sur le site d'Orano la Hague est le déchargement de ces emballages. Les combustibles sont entreposés dans des piscines, sous eau refroidie et contrôlée en permanence afin de poursuivre une seconde décroissance radioactive, d'une durée comprise entre cinq et dix ans après déchargement du réacteur.

Les usines UP2-800 et UP3 disposent de quatre grandes piscines d'une capacité totale de 14.000 tonnes de combustible. À noter que le traitement du combustible usé pratiqué dès le début du développement industriel nucléaire français a permis d'éviter l'entreposage d'attente sur les divers sites des réacteurs nucléaires de plus de 35.000 tonnes de combustible usé.



**Figure 2 : Piscine de désactivation du combustible irradié à l'usine de retraitement de La Hague**

**NOTE** : Un projet de construction d'une nouvelle piscine centralisée à La Hague est à l'étude par EDF (voir la [fiche argumentaire GAENA N° 66](#)). Elle est destinée à recevoir les combustibles usés MOX et URE (incluant ceux actuellement entreposés à La Hague), dont le traitement n'est pas envisagé à court ou moyen terme. EDF envisage également que cette piscine permette, si besoin, l'entreposage des combustibles RNR usés issus du fonctionnement du réacteur Superphénix, ainsi que l'entreposage transitoire de combustibles UNE usés.

## 2.2. Cisailage et dissolution

Dans les assemblages de combustible usé, la matière radioactive est contenue dans une gaine métallique. Après l'entreposage, la seconde étape du traitement des combustibles usés consiste à découper ces gaines en tronçons de quelques centimètres. Ces tronçons tombent dans une cuve, appelée dissolvant, remplie d'acide nitrique et dans laquelle la matière radioactive est dissoute. Les éléments de structure de l'assemblage (pieds et têtes, appelés **embouts**) et de gainage de la matière fissile (**coques**), débarrassés des traces de matières nucléaires, constituent des déchets radioactifs. Ils sont évacués vers une unité de conditionnement.

La solution de dissolution qui contient la matière radioactive est ensuite clarifiée par centrifugation, pour retirer les particules insolubles qu'elle contient : d'une part les « fines » de cisailage (copeaux de gaine) ; d'autre part les produits de fission insolubles.

## 2.3. Séparation des matières valorisables et des produits de fission

La solution d'acide nitrique contenant la matière radioactive est transférée vers une installation de séparation chimique, afin d'isoler l'uranium et le plutonium des autres composants des combustibles usés, en particulier les produits de fission. La séparation s'effectue en deux temps : les produits de fission sont d'abord séparés du mélange uranium/plutonium, concentrés par évaporation, puis entreposés dans des cuves où ils sont brassés et refroidis en permanence avant d'être vitrifiés. Dans un second temps, le même principe est utilisé pour séparer l'uranium et le plutonium.

En fin d'opération, l'uranium recyclable est disponible en solution de nitrate d'uranyle et le plutonium est conditionné sous forme d'oxyde en poudre dans des conteneurs. Les produits de fission sont entreposés en solution nitrique dans des cuves avant leur vitrification. Lors de ces opérations, les éléments volatils présents en faible quantité sont rejetés soit sous forme gazeuse soit sous forme liquide. Ces rejets sont pris en compte dans l'impact du retraitement (voir § 5).

## 2.4. Purification et conditionnement des matières valorisables

a) **L'uranium** séparé se présente sous forme de nitrate d'uranyle (liquide). Sa purification, qui se déroule en plusieurs étapes d'extraction en phases liquides, a pour but d'éliminer les reliquats d'émetteurs gamma (zirconium, thorium, ruthénium) et alpha (plutonium, neptunium) pour parvenir aux caractéristiques recherchées pour une réutilisation. Après concentration, la solution de nitrate d'uranyle purifiée est contrôlée et conditionnée dans des conteneurs d'expédition. L'uranium concentré sous forme liquide pourra être converti soit en gaz UF<sub>6</sub> (hexafluorure d'uranium) en vue de son ré-enrichissement pour une utilisation immédiate, soit simplement transformé en oxyde pour une utilisation différée.

b) **Le plutonium** séparé se présente sous forme de nitrate de plutonium (liquide). Sa purification, par extraction en phases liquides, permet d'éliminer les traces d'uranium et de produits de fission résiduels. Une fois purifiées, les solutions de nitrate de plutonium sont précipitées en oxalate de plutonium. Le précipité obtenu est filtré, essoré, séché puis calciné à plus de 500°C pour donner de l'oxyde de plutonium.

Après homogénéisation, la poudre d'oxyde de plutonium est conditionnée dans des boîtes qui, après pesage et sertissage, sont mises dans des conteneurs étanches. Cette poudre est utilisée pour la fabrication du combustible MOX, mélange d'oxyde de plutonium issu du traitement des combustibles usés et d'oxyde d'uranium (naturel ou appauvri). Le MOX est utilisé depuis près de 50 ans dans les centrales nucléaires car il économise les ressources naturelles d'uranium. La fabrication de ce combustible est réalisée dans l'usine Melox, dans le Gard.

### Orano la Hague, à la pointe de la technologie de recyclage

Le site d'Orano la Hague, qui dispose des technologies de traitement - recyclage les plus avancées, a pour mission de traiter les combustibles usés provenant des centrales nucléaires et des réacteurs de recherche français et étrangers.

Ainsi, les usines UP3-A et UP2-800 sont capables de recycler des combustibles à taux de combustion élevé, des combustibles de réacteurs de recherche ainsi que des combustibles MOX. Le site d'Orano la Hague est la plus grande installation de traitement - recyclage de combustibles usés du monde. Après la mise en service de l'usine UP3-A en 1990 et les travaux d'extension de l'usine UP2-800, la capacité de production autorisée est de 1 700 tonnes par an.



### 3. GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS INDUITS

Les produits de fission et les actinides mineurs constituent les déchets « ultimes ». Ces derniers sont extrêmement actifs et représentent 99,8 % de la radioactivité totale de l'assemblage usé. ORANO procède à leur vitrification : mélangés à de la fritte de verre, chauffés à 1100 °C, ils forment une pâte coulée dans des conteneurs en acier inoxydable. Une fois refroidi, le matériau se présente sous la forme d'une sorte d'obsidienne (pierre volcanique) qui est réputée piéger les particules radioactives pendant plus de 100 000 ans.

La vitrification met en œuvre un procédé continu, développé et exploité depuis 1976 au Centre de Marcoule.

Actuellement, la vitrification des produits de fission contenus dans une tonne de combustible usé génère 130 litres de déchets sous forme de verre radioactif coulé dans un conteneur standard CDS-V (voir figure ci-contre).

Les déchets de procédé (**coques et embouts**) sont compactés sous forme de galettes et conditionnés dans un conteneur CDS-C identique au précédent qui peut recevoir ces rebuts compactés dans le rapport de 180 litres par tonne de combustible retraité.



**Figure 3 : Verre borosilicate contenant les déchets radioactifs**



**Figure 4 : Conteneur de déchets vitrifiés (CDS-V) et compactés (CDS-C) AREVA ©**

Les conteneurs CDS-V et CDS-C sont entreposés, une fois remplis, dans des puits ventilés. Ils ont vocation à rejoindre à terme le site de stockage géologique profond CIGEO pour leur stockage définitif (voir [fiche argumentaire GAENA N° 64](#)).

Les prévisions de l'évolution de la quantité de déchets vitrifiés à la Hague sont d'environ 630 colis/an à raison de 10-15 colis par réacteur pour 850 tonnes de combustibles français traités auxquels il faut rajouter 170 colis pour les clients étrangers. Il faut compter 0,74 colis par tonne de combustible usé retraité.

### 4. BILANS ET CAPACITÉ DE PRODUCTION DE L'USINE DE LA HAGUE

Démarrée en 1966, la première usine de la Hague, UP2, a traité de l'ordre de 5 000 tonnes de combustible de la filière UNGG (Uranium Naturel Graphite Gaz) principalement des réacteurs des centrales de Chinon, Saint-Laurent-des-Eaux, Bugey, à l'instar de l'usine UP1 de Marcoule (démarrée en 1958). Au début des années 1970, la France a décidé de se doter d'un parc électronucléaire de type eau légère, au combustible à l'uranium enrichi. L'usine UP2 a été adaptée à cette évolution, et sa capacité (portée à 400 t/an de combustible de réacteurs à eau légère) a permis de proposer un service de traitement de ce type de combustibles aux clients français et étrangers.

Avec le démarrage des usines UP3 (1990) et UP2-800 (1994) d'une capacité totale autorisée de 1700 t/an, ce sont plus de 35.300 tonnes de combustibles usés de type eau légère qui ont été traitées à la Hague à fin 2018, dont environ 68 % pour EDF, 17 % pour des clients allemands, 9 % pour des clients japonais, et le reste principalement pour des clients belges, suisses, néerlandais et italiens.

Des contrats ont ainsi été signés pour traiter des combustibles usés de réacteurs français, australiens et belges. Conformément à la réglementation française les déchets radioactifs issus du traitement des assemblages combustibles usés d'origine étrangère sont réexpédiés à leurs propriétaires. Cependant, il est impossible de séparer physiquement les déchets en fonction des combustibles dont ils proviennent. Afin de garantir une répartition équitable des déchets issus du traitement des combustibles de ses différents clients, l'exploitant a proposé un système comptable permettant le suivi des entrées et des sorties de l'usine de La Hague. Ce système, appelé système Exper (Expédition des Résidus), a été approuvé par les autorités compétentes.

Depuis mi-2005, Orano s'est par ailleurs doté de capacités de traitement des combustibles de réacteurs de recherche (RTR : Research and Test Reactors).

Les flux annuels de retraitement sont de l'ordre de 1.200 tonnes. Sur les 5 années calendaires 2013 à 2017, les capacités de production ont fluctué comme indiqué dans le tableau 1. Leur traitement et le retour des déchets et des matières nucléaires à leurs propriétaires, y compris étrangers, font l'objet d'un calendrier contractuel.

	2013	2014	2015	2016	2017
UNE traités ( <i>en tonnes</i> )	1172	1217	1205	1118	999
<i>dont combustibles français</i>	1152	1217	1180	1116	985
<i>dont combustible étranger</i>	20	0	25	2	14

**Tableau 1 : Capacité de production de l'Usine de La Hague entre 2013 et 2017**

Conformément aux encadrements légaux et réglementaires en matière de gestion des déchets issus de combustibles usés étrangers, les contrats signés par Orano avec ses clients étrangers garantissent, avec l'aval des autorités politiques de part et d'autre, l'expédition dans leur pays d'origine des déchets conditionnés issus de leur traitement-recyclage. Un rapport comportant l'inventaire des combustibles usés en provenance de l'étranger dont ceux issus des opérations de recherche, ainsi que des matières et des déchets radioactifs, qui en sont issus après retraitement ou traitement est publié chaque année par Orano.

## 5. RECYCLAGE DES MATIÈRES VALORISABLES : URANIUM ET PLUTONIUM

Le recyclage du combustible usé permet de récupérer 96 % de matières nucléaires recyclables (uranium et plutonium). Après séparation et purification, l'uranium, appelé **URT** (pour Uranium de Recyclage issu du Traitement des combustibles usés), est entreposé et destiné à être ré-enrichi pour pouvoir être recyclé sous la forme d'un nouveau combustible, appelé **URE** (Uranium de Recyclage Enrichi).

Sa valorisation a débuté dès les années 1980, dans 74 réacteurs dans le monde, y compris des réacteurs français. Orano tient l'URT à disposition de ses clients, pour un recyclage éventuel en fonction du marché de l'uranium et de considérations stratégiques d'approvisionnement.

Le plutonium est quant à lui recyclé sous la forme de combustible appelé MOX (Mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium). Au total, en Europe, 38 réacteurs ont été chargés depuis 1972 en combustibles MOX : 10 en Allemagne, 3 en Suisse, 2 en Belgique, 1 au Pays-Bas et les autres en France (22). Au Japon, suite à l'accident de Fukushima, consécutif à la catastrophe naturelle du 11 mars 2011, la totalité du parc nucléaire avait été mise à l'arrêt.

Au Japon 4 des 9 réacteurs en service au Japon utilisent du combustible MOX. En 2018, une campagne de fabrication de combustibles MOX a été réalisée pour les Pays-Bas. Au total, environ 8.300 assemblages combustibles MOX ont été livrés dans le monde à fin 2018.

## 6. IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU RETRAITEMENT

Toute installation industrielle a un impact sur l'environnement. Une politique rigoureuse de réduction des rejets radioactifs lors du retraitement s'est développée dès les années 1960. Les opérations menées au sein de l'usine de retraitement conduisent à deux types de rejets radioactifs :

- **Effluents gazeux** : Ceux-ci se dégagent principalement lors du cisailage des assemblages et pendant l'opération de dissolution. Le traitement de ces effluents gazeux s'effectue par lavage dans une unité de traitement des gaz. Les gaz radioactifs résiduels, en particulier le krypton et le tritium, sont contrôlés avant d'être rejetés dans l'atmosphère.
- **Effluents liquides** : Ceux-ci sont traités et généralement recyclés. Certains radionucléides, tels que l'iode et le tritium, sont dirigés, après contrôle, vers l'émissaire marin de rejet en mer. Cet émissaire, comme les autres émissaires du site, sont soumis à des limites de rejets. Les autres effluents sont dirigés vers des unités de conditionnement du site (matrice solide de verre ou de bitume).

La radioactivité de ces rejets est contrôlée en permanence, soit par des mesures automatiques en continu, soit par des mesures différées effectuées en laboratoire sur des prélèvements continus. Les effluents gazeux radioactifs provenant de la ventilation des ateliers et des appareils de procédé subissent divers traitements successifs d'épuration, en fonction de la nature physico-chimique des éléments :

À partir de l'activité rejetée dans les effluents liquides et gazeux et de sa dispersion dans le milieu, la radioactivité dans l'environnement (eau de mer, faune, flore, air, sols, ...) est évaluée, et l'impact dosimétrique calculé en envisageant toutes les voies par lesquelles la radioactivité peut atteindre l'homme. Cette évaluation a été effectuée sur deux groupes de populations identifiés comme étant les plus exposés. Ce dernier s'élève à moins de 0,02 mSv/an, ce qui est inférieur à 0,5 % de l'exposition de la population française à la radioactivité naturelle.

## 7. CONCLUSION

Le retraitement des combustibles nucléaires usés, qui relève du développement durable par le tri et le recyclage des déchets, est un élément important de la politique énergétique française. Il répond à la fois aux exigences des textes réglementaires sur la protection de l'environnement et la gestion des déchets et au principe de précaution, par une totale et réelle maîtrise du cycle du combustible. Cette option présente un triple intérêt :

- **le recyclage des matières énergétiques** (uranium, plutonium) encore contenues dans le combustible usé, dont 96 % sont valorisables sous forme de combustible MOX. Ce recyclage a l'avantage de préserver les ressources énergétiques d'uranium (et notamment d'U-235, seul élément fissile naturel), ce qui n'est pas négligeable tant au plan économique que géopolitique, à cause des tensions pesant sur certains pays producteurs d'uranium.
- la simplification de l'entreposage (provisoire) ou du stockage (définitif) des déchets non valorisables qui sont isolés afin de réduire leur **volume par 5** et leur **toxicité d'un facteur 10** (sur le long terme) grâce à des techniques de conditionnement pérennes et sûres.
- la diminution de la **ponction de l'industrie** sur les ressources naturelles : 10 % de la production d'électricité nucléaire française vient de matières recyclées. Une proportion qui est vouée à augmenter significativement jusqu'à 25 % avec le recyclage de l'uranium contenu dans les combustibles usés (MOX). Ce chiffre pourra techniquement augmenter pour atteindre 30 % grâce au MOX 2, nouveau type de combustible qui permettra le multi-recyclage des combustibles nucléaires.

C'est pourquoi la Commission Nationale d'Evaluation des travaux des acteurs du nucléaire milite pour ce mode de gestion du combustible usé, qui est à l'opposé du **mode stockage direct** qui présente des inconvénients majeurs (volumes de déchets plus conséquents, surfaces de stockage ultime en couches géologiques profondes plus importantes) et qui du fait de la non valorisation des matières énergétiques conduit en fait à un non respect du principe de **développement durable** (voir la [fiche argumentaire GAENA N° 66](#)).

Cette position est confortée par les programmes de R&D en cours :

- accroissement de la consommation de plutonium par les réacteurs actuels par développement du nouveau combustible nucléaire MOX
- confirmation de la faisabilité scientifique de la transmutation en produits à vie courte des actinides mineurs à vie longue
- consensus scientifique international sur la durabilité (> 10.000 ans) en stockage profond des déchets vitrifiés actuellement produits

La recherche et développement sur l'évolution du procédé actuel ou sur de nouveaux procédés de retraitement se poursuit pour le démarrage des réacteurs de **quatrième génération** (voir la [fiche argumentaire GAENA N°22](#)) et pour le traitement des combustibles usés qui sortiront de ces réacteurs.

## 8. RÉFÉRENCES

- [Réf. 1] [Fiche argumentaire GAENA N° 3](#) : Les déchets radioactifs
- [Réf. 2] [Fiche argumentaire GAENA N° 8](#) : Le transport des matières radioactives
- [Réf. 3] [Fiche argumentaire GAENA N° 21](#) : Le plutonium
- [Réf. 4] [Fiche argumentaire GAENA N° 22](#) : Génération IV
- [Réf. 5] [Fiche argumentaire GAENA N° 64](#) : Le stockage géologique des déchets nucléaires de haute et moyenne activité de longue durée : Le projet CIGEO
- [Réf. 6] [Fiche argumentaire GAENA N° 66](#) : Entreposage du combustible nucléaire usé – Stockage
- [Réf. 7] *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. 8] *Rapport du HCTISN (Haut Comité pour la Transparence et l'Information sur la Sécurité Nucléaire) : Présentation du « Cycle du combustible français en 2018 »* <https://www.hctisn.fr/>
- [Réf. 9] <https://www.orano.group/fr/> : Traitement & recyclage des combustibles usés : ce qu'il faut retenir
- [Réf.10] <https://www.cea.fr/> : Le cycle du combustible nucléaire
- [Réf.11] *Traitement des combustibles usés provenant de l'étranger dans les installations d'Orano La Hague, éditions 2018 et 2021.* <https://pngmd.debatpublic.fr>
- [Réf.12] *Orano Recyclage : Rapport d'information du site Orano La Hague. Edition 2021*