

## ÉLÉMENTS POUR LE CHOIX D'UNE POLITIQUE DE GESTION DU COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE USÉ : RECYCLAGE OU ENTREPOSAGE DIRECT

### 1. DIFFÉRENTS MODES DE GESTION DU COMBUSTIBLE USÉ

Il existe différentes stratégies de gestion des combustibles usés selon les pays et les types de réacteurs :

**Le cycle ouvert** : dans certains pays, comme les **États-Unis, la Finlande ou la Suède**, le combustible usé est considéré comme un déchet et est destiné à être stocké définitivement dans des installations souterraines profondes, après une période d'entreposage à sec ou en piscine. Cette option ne permet pas de valoriser les matières fissiles (uranium et plutonium) présentes dans le combustible usé, ni de réduire le volume et la radioactivité des déchets ultimes.

**Le cycle fermé** : dans d'autres pays, comme **la France, le Royaume-Uni, la Russie, l'Inde...**, le combustible usé est traité dans des usines spécialisées, où les matières valorisables (uranium et plutonium) sont séparées des déchets ultimes. Les matières valorisables peuvent être réutilisées dans des combustibles neufs, à base de plutonium comme le MOX (mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium) ou d'uranium de retraitement ré-enrichi en isotope 235 (URE) qui alimentent certains réacteurs à eau pressurisée. Les déchets ultimes (produits de fission et actinides mineurs : Am, Cm, Np) sont vitrifiés et conditionnés en vue de leur stockage définitif. Cette gestion permet de réduire le volume et la radioactivité des déchets ultimes, ainsi que la consommation d'uranium naturel, dont seul l'isotope 235 (qui ne représente que 0,7% de l'uranium naturel) est fissile.



Figure 1 : Principaux modes de gestion du combustible usé

**Le cycle renouvelable** : Dans les réacteurs à neutrons rapides, l'uranium 238 est transformé plus efficacement en plutonium-239 que dans les réacteurs à neutrons thermiques, ce qui permet de régénérer, le stock d'isotopes fissiles. Le réacteur français Phénix (voir [article GAENA N° 3](#)) a permis d'obtenir un taux de régénération de 16 %, c'est-à-dire qu'au bout de 6 recyclages du combustible, on a formé assez de plutonium pour fabriquer un cœur supplémentaire. Et, contrairement aux réacteurs à neutrons thermiques, les réacteurs à neutrons rapides permettent de fissionner les actinides mineurs en éléments à vie plus courte. Mais avec les technologies actuelles, ces derniers sont plus coûteux que les réacteurs à neutrons thermiques, ce qui fait différer leur construction à une époque où le prix de l'uranium naturel aura augmenté de façon significative.

Le choix du procédé dépend de plusieurs facteurs, tels que la politique énergétique du pays concerné, le coût économique, l'impact environnemental ou les risques de prolifération. L'annexe 1 résume les stratégies des principaux pays étrangers.

## 2. RECYCLAGE DU COMBUSTIBLE USÉ

Dans la philosophie du développement durable, c'est le choix effectué par la France de récupérer les 96 % de matière valorisable d'un combustible usé (uranium appauvri et plutonium), pour ne garder comme déchets finaux que les produits de fission et les actinides mineurs qui représentent 4 % de la masse du combustible avant irradiation.

Le traitement du combustible nucléaire consiste en un ensemble de procédés visant à séparer les éléments réutilisables qui sont recyclés, des déchets radioactifs contenus dans le combustible nucléaire après son utilisation dans le réacteur. Les principales étapes du processus de retraitement (voir [fiche argumentaire GAENA N° 7](#)) sont les suivantes :

- Entreposage en piscine de refroidissement pour réduire la radioactivité du combustible et la chaleur émise (pour une durée comprise entre 2 et 5 ans).
- Cisaillage du combustible en tronçons de quelques cm (appelées coques) et séparation des embouts exempts de matière valorisable.
- Dissolution dans un bain d'acide nitrique concentré des coques pour séparation de la matière nucléaire des autres constituants.
- Extraction dans une solution de solvant (TBP) pour séparation des matières nucléaires (uranium et plutonium) des produits de fission.
- Purification l'uranium et le plutonium des produits de fission et des actinides mineurs.

L'uranium extrait du combustible usé (URT : uranium de retraitement) peut être ré-enrichi (URE : uranium de retraitement enrichi). Le plutonium est recyclé sous la forme de combustible MOX<sup>1</sup> qui est employé dans un tiers des réacteurs du parc nucléaire français (modifiés pour introduire un nombre supérieur de barres de contrôle).

Dans les réacteurs REP actuels, le combustible n'est recyclé qu'une seule fois (mono-recyclage). Un programme d'études CEA-EDF-ORANO vise à valider le multi-recyclage en REP, pour les années 2040 (on vise un maximum de 4 recyclages, après quoi le combustible sera trop pollué en poisons neutroniques). En attendant il est entreposé en piscine dans l'attente de nouveaux recyclages, réalisables dans les réacteurs à neutrons rapides<sup>2</sup>, dits de « 4<sup>ème</sup> génération ».

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 (ex AREVA) 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.

Les conteneurs sont entreposés, une fois remplis, dans des puits ventilés avant d'être retournés aux compagnies d'électricité étrangères propriétaires. En ce qui concerne les colis propriété d'EDF, les colis ont vocation à rejoindre à terme le site de stockage géologique profond CIGEO pour leur stockage définitif.

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



**Figure 2 : Echantillon de verre borosilicate contenant les déchets radioactifs**



**Figure 3 : Colis CDS-V de déchets vitrifiés AREVA ©**

<sup>1</sup> Le combustible MOX est un mélange d'oxyde d'uranium (environ 93 %) et d'oxyde de plutonium (environ 7 %) issu du retraitement ; un réacteur qui fonctionne avec 30 % de combustible MOX consomme autant de plutonium qu'il en produit ; il contribue ainsi à la stabilisation des stocks de matières nucléaires et permet des économies d'enrichissement.

<sup>2</sup> En cours de développement, ces réacteurs seraient capables de « multi-recycler » le combustible usé et même d'utiliser presque tout l'uranium appauvri (résidu de la fabrication du combustible) présents sur notre territoire, avec à la clé plusieurs milliers d'années de ressource énergétique. Sur le long terme, ils permettraient d'envisager le recyclage de certains éléments radioactifs à vie longue, réduisant ainsi la toxicité globale des déchets.

### 3. ENTREPOSAGE DIRECT DU COMBUSTIBLE USÉ – STOCKAGE

C'est le choix opéré par plusieurs pays (USA, Suède, Finlande et depuis une quinzaine d'années Allemagne). Comme pour le premier mode de traitement des combustibles usés (retraitement pour recyclage des matières valorisables) des entreposages intermédiaires sont nécessaires (plusieurs entreposages éventuellement de type différent pouvant être utilisés successivement) avant leur stockage définitif. Les solutions techniques auxquelles ont recours les différents pays peuvent être (voir [fiche argumentaire GAENA N° 66](#)) :

- un entreposage intermédiaire sous eau dans la piscine associée aux réacteurs
- un entreposage intermédiaire sous eau dans une piscine de site ou centralisés (communs à plusieurs sites)
- un entreposage intermédiaire à sec sur site ou centralisés (communs à plusieurs sites).

**L'entreposage en piscine** est particulièrement adapté aux combustibles présentant une forte puissance thermique unitaire, et donc ne pouvant rester sous air sans dégradation des gaines de combustibles. L'eau a en effet un pouvoir caloporteur élevé et les systèmes actifs de refroidissement l'utilisant permettent de maintenir à des valeurs basses les températures des gaines des combustibles. De plus, une piscine offre une inertie thermique importante, facilitant la mise en œuvre de moyens de secours en cas de perte des systèmes de refroidissement.

**L'entreposage à sec** est réservé aux combustibles suffisamment refroidis (environ 2 kW en moyenne par combustible pour les concepts actuels). Il présente, de ce fait, l'intérêt de se satisfaire de systèmes de refroidissement passifs, ce qui limite les contraintes d'exploitation, et se prête particulièrement bien à une construction modulaire, s'adaptant aux besoins, voire permettant le remplacement de modules anciens au cours du temps. Les exigences de sûreté sont le maintien du refroidissement passif et la qualité des barrières de confinement entre les matières radioactives et l'environnement. Ce type d'entreposage présente l'avantage d'une conception plus simple et robuste et limite les opérations d'exploitation.

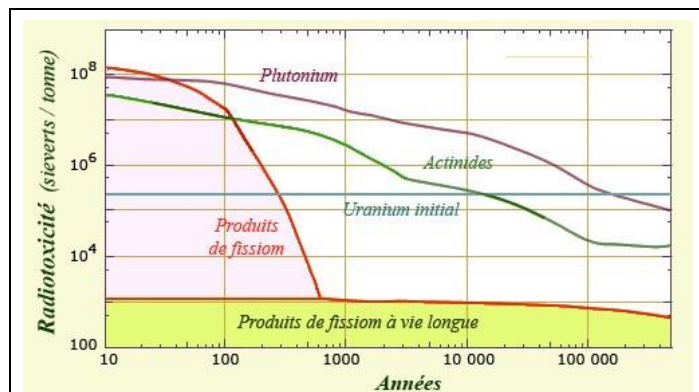
## 4. ÉLÉMENTS POUR LE CHOIX D'UN MODE DE GESTION

### 4.1. Critères sociétaux - économiques

#### 4.1.1. Solution recyclage des combustibles usés

Elle 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.



Cependant, le cycle du combustible fermé présente aussi des facteurs limitant liés :

- à la complexité et la haute technicité du cycle, qui nécessite des étapes d'enrichissement, de retraitement et de fabrication de combustible recyclé.
- aux risques de prolifération nucléaire, puisque le plutonium produit par la fission est séparé du combustible usé et peut être détourné à des fins militaires.

<sup>3</sup> Pour atteindre le bruit de fond de l'uranium naturel : il faut 100.000 ans en conservant le plutonium dans les colis de déchets, 10 000 ans en l'extrayant.

- aux coûts de gestion du cycle, qui impliquent des investissements dans des installations de retraitement ou de fabrication de combustible recyclé.

#### 4.1.2. Solution entreposage – stockage définitif des combustibles usés

Cette stratégie présente certains avantages, tels que :

- La simplicité et la faible complexité du cycle, qui ne nécessite pas d'étapes d'enrichissement ou de retraitement.
- La réduction des risques de prolifération nucléaire, puisque le plutonium produit par la fission n'est pas séparé du combustible usé.
- La diminution des coûts de gestion du cycle, qui évite les investissements dans des installations de retraitement ou de fabrication de combustible recyclé.

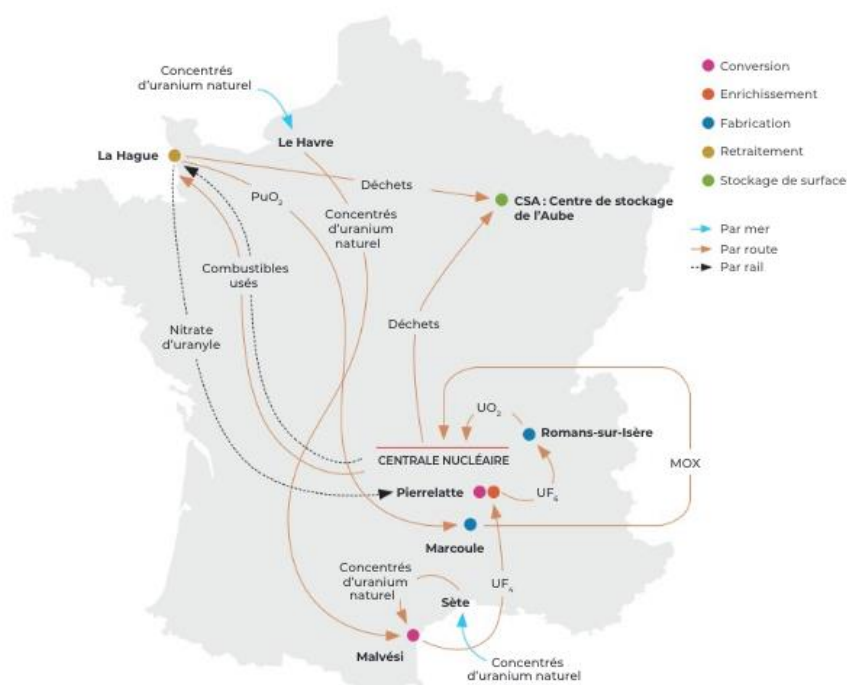
Il convient aussi de mentionner le récent développement du concept d'emballage de transport et d'entreposage, dit à « **double usage** » (*dual purpose cask*) qui permet de limiter les ruptures de charge. Avec les versions précédentes, des conteneurs distincts devaient être utilisés à chaque étape, ce qui augmentait le risque d'accident de manipulation. Ces dispositifs à double usage, peuvent être remplis, transportés et entreposés provisoirement, puis transportés à nouveau jusqu'au lieu de stockage définitif ou jusqu'à l'installation de retraitement, sans que le combustible doive être manipulé ou transféré à plusieurs reprises.

À l'opposé, le cycle du combustible ouvert présente aussi des inconvénients, tels que :

- Le gaspillage des ressources d'uranium, qui ne sont utilisées qu'à hauteur de 0,7 % de leur potentiel énergétique.
- L'augmentation du volume et de la radiotoxicité des déchets nucléaires, qui doivent être stockés de manière sûre et durable.
- La dépendance vis-à-vis des importations d'uranium, qui peuvent être soumises à des fluctuations de prix ou de disponibilité.

#### 4.2. Risques de profération – sécurité et actes de malveillance

En raison du grand nombre de transferts de combustible usé occasionnés sur la voie publique, chacun des concepts présente des risques similaires de sécurité et de possibilité d'actes de malveillance au cours de ces transports (voir figure 5 illustrant les opérations de transport réalisées sur le territoire national).



Ceux propres à la solution « **cycle fermé** » entraînent quant à eux des mouvements supplémentaires de matières fissiles (Plutonium notamment) entre les usines de recyclage et de fabrication du combustible MOX, ce qui représente un facteur de risque accru de prolifération nucléaire.

La solution « **cycle ouvert** » est en revanche plus sensible aux risques de malveillance en raison de la multiplication des sites d'entreposages intermédiaires dédiés au refroidissement complémentaire du combustible usé, auprès des réacteurs de production, puis en site centralisé, avant leur transfert ultime vers un lieu de stockage géologique profond.

◀ **Figure 5 : Parcours opérés en France dû au concept recyclage**

#### 4.3. Coûts des différentes options de gestion

La comparaison du retraitement et de l'entreposage direct est un sujet complexe et controversé, qui dépend de nombreux facteurs, tels que le type de combustible, le procédé de traitement, le mode de gestion des déchets, etc. La principale source d'information disponible provient d'une étude OCDE de 1994 citée en [Réf 8].

Les bases de cette étude reposent sur les deux options :

- Option 1 : entreposage direct consistant à considérer le combustible comme un déchet et donc à l'entreposer en attente d'un conditionnement et d'un stockage définitif.
- Option 2 : retraiter le combustible pour valoriser l'uranium et le plutonium contenus dans le combustible.

L'écart de coût total entre les deux options, rapporté au kWh nucléaire, s'avère faible. Il est de l'ordre de 10 % au plus lorsqu'un taux d'actualisation de 5 % est appliqué.

Tableau : Détail du coût de la fin du cycle du combustible selon l'AEN-OCDE

centimes par kWh	retraitement	stockage direct
transport du combustible usé	0,10	0,10
entreposage du combustible usé	-	0,31
retraitement – vitrification	1,20	-
conditionnement du combustible usé	-	0,69
stockage des déchets	0,11	
sous-total fin de cycle	1,41	1,10
crédit uranium	-0,18	-
crédit plutonium	-0,07	-
sous-total crédit	-0,25	0
coût total	1,16	1,10

#### 4.4. Impact environnemental

Dans le cadre de la révision du Plan National de Gestion des Déchets Radioactifs (PNGMDR), l'ASN a initié une étude comparative des impacts sur l'environnement du cycle du combustible avec ou sans traitement [Réf. 9]. Un groupe de travail, mis en place en février 2017, réunissant AREVA, EDF et le CEA, en liaison avec l'ANDRA, a été chargé de définir les critères à retenir pour cette analyse des impacts pour l'environnement d'une stratégie de retraitement des combustibles usés en comparaison de celle qui résulterait de l'absence de retraitement, en considérant l'ensemble du cycle de vie du combustible depuis l'extraction de l'uranium jusqu'au stockage des déchets induits.

Cette analyse, de **type ACV**, a été remise au 30 juin 2018. En parallèle, l'IRSN a réalisé une étude similaire, remise à l'ASN le 31 décembre 2017. Les résultats figurent dans un rapport cité en [Réf.10]. La figure ci-dessous donne les principaux écarts observés. À noter que le principal écart significatif, lié au volume de déchets HA produits par les deux systèmes, est favorable au processus actuel.

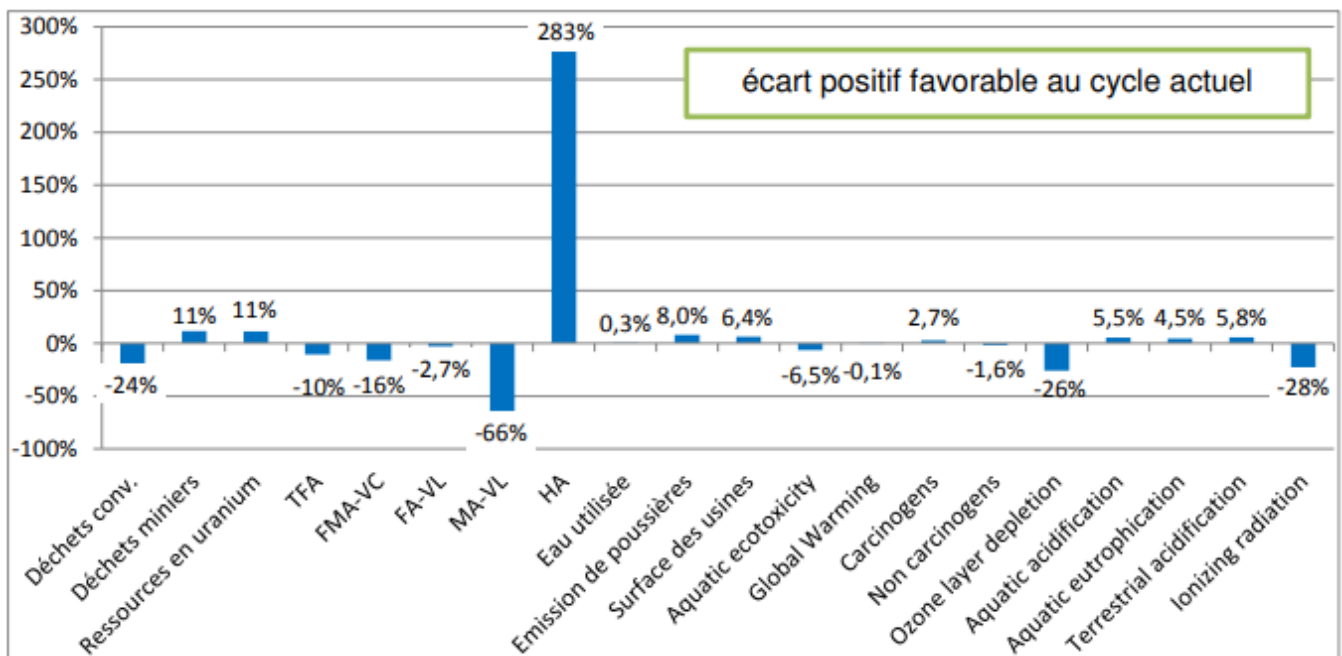


Figure 6 : Ecart relatif entre le cycle actuel et un cycle ouvert

NOTE : À ce stade, il est important de rappeler que le bilan environnemental, tel que traité dans le cadre de cette étude, ne constitue qu'un des aspects utiles à une comparaison entre deux options industrielles. En effet, une comparaison au titre des critères **du développement durable** nécessite de procéder à une évaluation prenant en compte les aspects économiques, sociaux et sociétaux, afin de pouvoir fournir un panorama complet.

## 4. CONCLUSION

La présente fiche montre qu'il existe deux modes de gestion parallèlement opposés, qui dépendent principalement de la politique énergétique du pays concerné :

Le cycle fermé (recyclage) qui vise à préserver les ressources énergétiques d'uranium ce qui n'est pas négligeable tant au plan économique que géopolitique, à cause des tensions pesant sur certains pays producteurs d'uranium. Elle contribue à une plus grande indépendance énergétique et favorise ainsi une meilleure souveraineté nationale.

Le cycle ouvert (entreposage direct) qui a l'avantage d'être plus simple, moins sujet à des risques de prolifération et moins dispendieux en matière d'investissement dans des processus de retraitement et de fabrication de combustible recyclés. Mais son inconvénient majeur réside en une plus grande quantité de déchets radioactifs produits, puisque l'intégralité du combustible utilisé est considérée comme un rebut.

Globalement les atouts de l'un représentent les inconvénients de l'autre et vice versa. En guise de synthèse il convient de noter que les deux options nécessitent un stockage définitif profond des déchets ultimes de haute activité et de moyenne activité à vie longue. Ceux-ci sont constitués :

- soit de combustibles usés entiers
- soit, après traitement du combustible usé, de produits de fissions et d'actinides mineurs vitrifiés, qui ne représentent que 5 % de la masse des métaux lourds des combustibles usés.

Avant de procéder au retraitement ou au stockage définitif des combustibles usés, il faut attendre leur décroissance thermique dans des piscines de désactivation, en général sur les sites des réacteurs.

Après décroissance in situ, les combustibles en attente de retraitement sont entreposés en piscine dans l'usine de retraitement ; ceux en attente de stockage définitif peuvent être entreposés dans des casemates ou des emballages à sec, solution moins coûteuse qu'une piscine.

## 5. RÉFÉRENCES

- [Réf. 1] [Fiche argumentaire GAENA N° 7](#) : *Le traitement par recyclage du combustible irradié*
- [Réf. 2] [Fiche argumentaire GAENA N° 66](#) : *Entreposage du combustible nucléaire usé – Stockage*
- [Réf. 3] 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. 4] 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. 5] 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/>
- [Réf. 6] <https://www.orano.group/fr/> : *Traitement & recyclage des combustibles usés : ce qu'il faut retenir*
- [Réf. 7] <https://www.cea.fr/> : *Le cycle du combustible nucléaire*
- [Réf. 8] <https://www.irsn.fr/> : *Entreposage du combustible nucléaire usé : Concepts et enjeux de sûreté – Rapport IRSN n°2018-00003*
- [Réf. 9] <https://www.irsn.fr/pngmdr/> : *Etude de comparaison des impacts sur l'environnement du cycle du combustible avec ou sans traitement – Périmètre et critère*
- [Réf. 10] <https://www.irsn.fr/pngmdr/> : *Analyse comparée du bilan environnemental d'un cycle électronucléaire « mono-recyclage Pu et d'un cycle ouvert*

**Annexe 1****La gestion du cycle du combustible : Les stratégies en vigueur dans les principaux pays étrangers à fin 2018 (source HCTISN, DGE)****1. Stratégie « cycle fermé » recyclage du plutonium**

Jusqu'à aujourd'hui, sept pays autres que la France ont chargé des combustibles MOX dans les réacteurs à Eau Légère (REP et REB) : L'Allemagne, la Belgique et la Suisse : à ce jour ces pays ont arrêté le retraitement, à titre temporaire ou définitif, pour des raisons politiques. Les Etats Unis ont également par le passé chargé des combustibles MOX dans des réacteurs mais dans des quantités très limitées. Le Japon et les Pays Bas : ces pays en poursuivent l'utilisation.

Par ailleurs, peu de pays disposent de capacités de retraitement sur leur territoire. C'est le cas de la Russie, de l'Inde et du Royaume Uni. Le Japon possède une usine de retraitement, mais elle n'est toutefois pas opérationnelle à ce jour. Quant à la Chine, elle ne dispose pas encore d'installation industrielle.

Aujourd'hui, les pays qui affichent une politique de cycle fermé pour l'avenir sont, outre la France, le Japon, la Chine, la Russie et l'Inde.

**Le Japon** a depuis longtemps fait le choix du « cycle fermé » de gestion du combustible à eau légère. Dans le cadre de sa stratégie énergétique à l'horizon 2030, le METI (Ministère de l'Industrie) confirme l'engagement du Japon dans cette politique, Toutefois le pays rencontre des difficultés récurrentes dans le démarrage de ses installations de retraitement et de fabrication de combustibles MOX situé à Rokkasho-Mura. L'exploitant JNFL a annoncé, début 2018, un nouveau report de 3 à 6 ans de ces installations.

Par ailleurs, suite à l'accident de Fukushima, le redémarrage des réacteurs est soumis à une demande d'autorisation au cas par cas auprès de l'autorité de sûreté japonaise (Nuclear Regulatory Authority), sur la base d'exigences de sûreté renforcées. Plusieurs réacteurs en service sont en partie chargés de combustible MOX. En mars 2018, il a été envisagé de doter 16 à 18 réacteurs supplémentaires de combustible MOX.

**La Chine** s'est lancée dans un programme de développement significatif de sa production nucléaire installée avec l'ambition affichée de développer une capacité de 58 GW en 2020. En avril 2018, la Chine possède un parc de 39 réacteurs nucléaires en exploitation et 18 en construction La politique de « cycle fermé » est affichée clairement par les autorités chinoises comme un objectif, même si mes combustibles usés ne sont pas retraités à l'heure actuelle. Orano est en cours de discussion pour la fourniture à la CNNC (China National Nuclear Corporation) de capacités de traitement des combustibles usés et de recyclage du plutonium dont la mise en service est annoncée à l'horizon 2030.

**La Russie** développe des installations dans l'objectif de recycler le plutonium dans un parc comportant des réacteurs à neutrons rapides. Elle dispose à ce jour d'installations de traitement et de recyclage fonctionnels sur le site Mayak et de plusieurs réacteurs à neutrons rapides en service ou en développement. Les instituts de recherche français et russes coopèrent par ailleurs au développement de cette technologie.

**L'Inde** affiche une politique de « cycle fermé » dans une perspective à long terme d'utilisation de thorium, abondant dans le sous sol du pays, afin d'acquérir son autonomie dans le domaine de l'énergie nucléaire. Trois étapes sont visées : La première, qui arrive aujourd'hui à maturité est celle des réacteurs à eau pressurisée (PHWR) utilisant l'uranium naturel. La seconde vise à recycler du plutonium issu de ces réacteurs, avec en ligne de mire des réacteurs à neutrons rapides, dont un « prototype » de 500 MW à Kalpakkam devrait démarrer en 2024. La troisième consiste à produire à partir du thorium, de l'uranium 233 pour alimenter les réacteurs futurs (réacteur avancé à eau lourde (AHWR) de 300 MW dont la conception est achevée.

L'Inde possède déjà des usines de traitement-recyclage du combustible PWHR de capacité 50 et 100 tonnes/an, à Tarapur (en service depuis 1975) et Kalpakkam, et deux nouvelles installations sont en cours de construction sur ces 2 sites. La fabrication de combustible MOX pour le prototype à neutrons rapides est réalisée à Tarapur.\*

**2. Stratégie « cycle ouvert », entreposage intermédiaire – Stockage final**

Dans la stratégie dite « cycle ouvert », le combustible usé ne subit aucun traitement et est dirigé vers des stockages ou entreposages de conception variables selon les pays. Aujourd'hui, outre les pays listés précédemment (arrétant le retraitement de leur combustibles usés et l'utilisation de MOX), les Etats Unis ; le Royaume Uni, la Suède, la Finlande, ont par exemple, fait ou évoluent vers ce choix. On peut par ailleurs souligner que plusieurs pays ont décidé d'entreposer sur le long terme leurs combustibles usés sans avoir décidé clairement des modalités de leur gestion pérenne.

**Les Etats Unis** ont décidé d'arrêter le retraitement des combustibles usés en 1977, en particulier à cause des questions de prolifération. Le pays avait exploité des unités civiles de retraitement de combustibles dans les années 70. Depuis cette décision de 1977, les combustibles usés sont entreposés pour des durées longues.

Cependant le projet Yucca Mountain, désigné en 1987 comme l'unique solution pour le stockage ultime des déchets radioactifs en couches géologiques profondes, avait été suspendu par l'administration Obama après plus de 15 ans de consultations et de lois. Par la suite, malgré l'engagement du Président Trump à relancer le projet, les demandes répétées de la Maison Blanche et du DOE, aucun budget n'a été prévu pour l'exercice budgétaire de 2018. D'ici la mise en œuvre d'une solution de gestion finale, des initiatives privées ont été lancées afin de créer un site d'entreposage intermédiaire de combustibles usés, au Texas (JV WCS/Orano) et au Nouveau Mexique (Holtec) afin de soulager les électriciens de la charge d'entreposage.

**Le Royaume-Uni** a mis en service, sur le site de Sellafield, des installations de traitement des combustibles usés issus de ses réacteurs Magnox (réacteurs à l'arrêt définitif) et AGR (réacteurs en fonctionnement). Ces capacités de traitement devaient être arrêtées en 2018 (AGR) et 2020 (Magnox). Les combustibles usés issus des réacteurs Magnox devaient être intégralement traités. En revanche les combustibles usés des réacteurs AGR qui n'ont pas été traités à la date prévue, seront entreposés. Par ailleurs, l'unité de fabrication de combustible MOX, SMP n'a pas pu atteindre sa cadence industrielle et n'a produit que de faibles quantités de combustible avant sa fermeture définitive en 2011. L'agence britannique de gestion des matières nucléaires et des déchets radioactifs (NDA) étudie les options destinées à gérer le stock de plutonium séparé existant. Aucune décision n'est prise à ce jour.

À l'heure actuelle, **la Corée du Sud** entrepose sans traitement ses combustibles usés. Elle continue toutefois officiellement à investiguer la faisabilité d'options différentes avec, en particulier, le traitement des combustibles usés suivant la technologie du « pyroprocessing ».

### 3. Les projets de stockage dans différents pays (Données ANDRA)

**Allemagne** : L'Allemagne a réorganisé la structure industrielle consacrée aux déchets en créant le BGE, entité fédérale responsable de la gestion des déchets radioactifs. Le pays a aussi relancé sa recherche de sites de stockage pour les déchets HA/combustibles usés (aucune sélection n'est prévue avant 2031).

**Chine** : Site identifié pour un laboratoire souterrain, stockage de déchets HA (retraitement prévu), roche granitique. La Chine est en cours de réflexion pour la poursuite de son projet de centre de stockage sur le site de Beishan (province de Gansu). Le programme inclut les études pour un laboratoire, la sélection d'un site profond à l'horizon 2020, des essais souterrains in situ (2020-2040) et la construction du stockage (2041-2050).

**Etats-Unis** [Department of Energy (DOE)] : Site de stockage de Yucca Mountain abandonné en 2008. Le projet de stockage final des combustibles usés aux Etats-Unis est très retardé, sans issue identifiée. Deux autres projets d'entreposages à long terme des combustibles usés sont en cours de développement dans l'état du Texas.

**Finlande** : Pays le plus avancé au monde sur le stockage des déchets HA avec un projet en cours (Okiluoto) pour lequel il est prévu un démarrage des opérations dans la prochaine décennie (demande de License déposée en 2020).

**Japon** : Recherche de site prévue, stockage mixte de déchets HA/combustible usé, roche non spécifiée formellement. Le METI a publié une carte des sites possibles en août 2017. Le processus est retardé suite à l'accident de Fukushima.

**Suède** : Projet de stockage de combustibles usés en cours sur site identifié (Forsmark), roche granitique. La demande de License a été déposée auprès des autorités compétentes.

**Royaume-Uni** : Recherche de site prévue, stockage de déchets HA et MA et combustibles usés, roche non spécifiée formellement. Le gouvernement consulte à cet effet les autorités compétentes (communes, régions...). Une précédente recherche avait échoué.