

LE CYCLE DU COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE



TABLE DES MATIÈRES

1	CYCLE OUVERT ET CYCLE FERME	3
2	LE CYCLE DU COMBUSTIBLE EN FRANCE	5
	<i>Valorisation des matières par le mono-recyclage</i>	7
	<i>Valorisation future des matières par le multi-recyclage</i>	10
3	ANNEXES	11
	<i>Évolution du besoin d'entreposage de combustible usé</i>	11
	<i>Concepts d'entreposage long terme dans le monde pour le combustible usé</i>	13

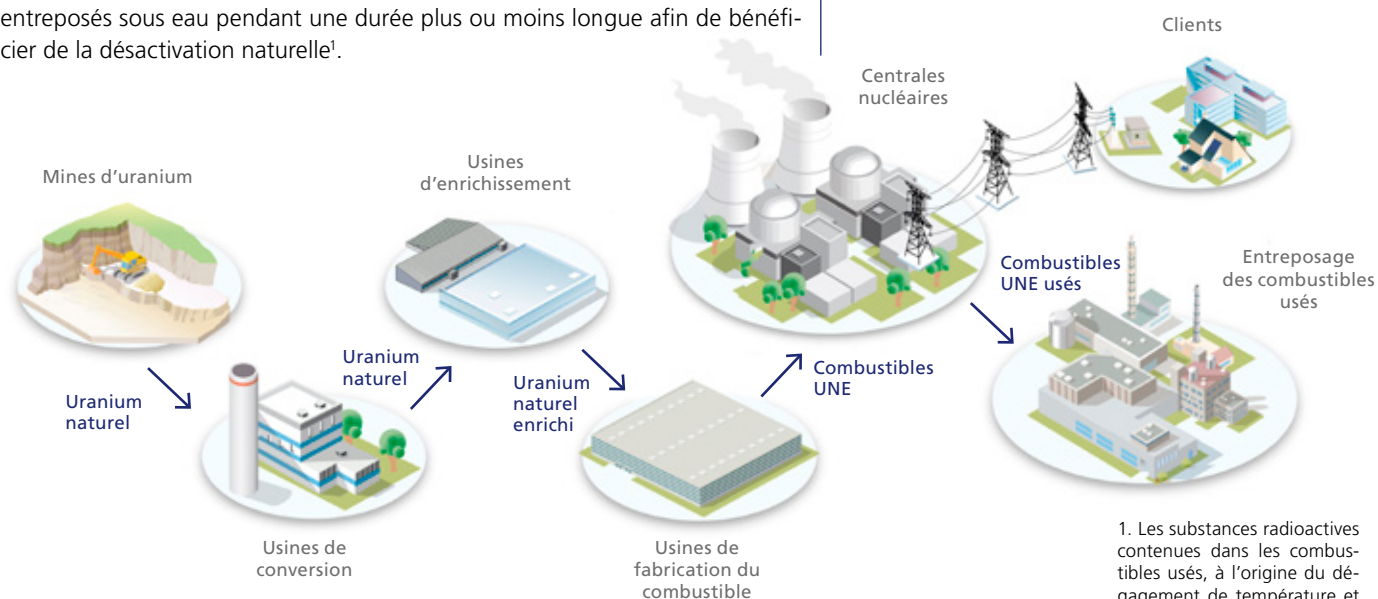
1

CYCLE OUVERT ET CYCLE FERMÉ

Une centrale thermique produit de l'électricité à partir d'un combustible qui chauffe de l'eau ; la centrale nucléaire utilise comme principal combustible de l'uranium, ressource naturelle, dont une partie des atomes produisent de la chaleur lorsqu'ils fissionnent.

On appelle « cycle du combustible » l'ensemble des étapes industrielles associées au combustible depuis l'extraction du minerai jusqu'au stockage des déchets radioactifs issus des combustibles usés.

L'uranium est extrait du sol puis dans un premier temps converti sous forme gazeuse par procédé chimique pour être ensuite enrichi. L'enrichissement de l'uranium consiste à augmenter la proportion d'isotope fissile (^{235}U) de 0,7 % à l'état naturel à des valeurs autour de 4 % pour l'utilisation dans les réacteurs des centrales nucléaires. Cette matière est alors intégrée sous forme de pastilles dans des tubes métalliques étanches qui sont assemblés pour former des assemblages combustible dits UNE (Uranium Naturel Enrichi). Ces assemblages sont chargés dans les réacteurs et utilisés pendant quelques années pour produire de l'électricité. Après utilisation, ils sont définitivement déchargés puis entreposés sous eau pendant une durée plus ou moins longue afin de bénéficier de la désactivation naturelle¹.



1. Les substances radioactives contenues dans les combustibles usés, à l'origine du dégagement de température et de la radioactivité, décroissent naturellement dans le temps. On parle de désactivation ou de refroidissement du combustible. Au fil du temps, les combustibles usés perdent de leur radioactivité et dégagent moins de chaleur.

Suite à cet entreposage, deux stratégies de gestion de ces combustibles usés sont envisagées dans le monde :

- Leur stockage direct en profondeur, dit « cycle ouvert » du combustible, le combustible usé étant considéré comme un déchet ;
- Leur recyclage après un traitement consistant à extraire les matières recyclables du combustible usé (plutonium et uranium) et ne conserver comme déchets que ce qui n'est pas valorisable, dit « cycle fermé » du combustible.

La France a opté pour le « cycle fermé », c'est-à-dire le recyclage des matières que sont le plutonium et l'uranium dans ses réacteurs².

Cette option technique de gestion des combustibles usés est également celle retenue par exemple par la Russie, le Japon ou les Pays-Bas et constitue aussi la stratégie choisie par la Chine.

D'autres pays, comme la Suède ou la Finlande, ont fait le choix du cycle du combustible ouvert.

Enfin, de nombreux pays n'ont pas encore choisi entre ces deux options.

2. Les réacteurs d'EDF en exploitation sont du type réacteur à eau légère sous pression, dit REP.

2

LE CYCLE DU COMBUSTIBLE EN FRANCE

EDF exploite 58 réacteurs à eau sous pression, répartis sur 19 sites sur l'ensemble du territoire.

Le besoin en combustible s'élève à environ 1 200 tML³ par an. À l'heure actuelle, 90 % (soit environ 1 100 tML/an) sont fabriqués à partir d'uranium naturel (EDF fait enrichir⁴ environ 8 000 t d'uranium naturel par an pour cette fabrication).

Les 10 % restants sont fabriqués à partir de matières issues du traitement des combustibles usés et recyclés.



Après leur utilisation, environ 1 200 tML de combustibles usés sont déchargées chaque année définitivement des réacteurs. En parallèle, environ 1 100 tML de combustibles UNE usés sont traitées annuellement. Dans les faits, le traitement⁵ intervient après quelques années de refroidissement sur les sites des centrales nucléaires puis sur celui de l'usine de traitement Orano de La Hague.

58

RÉACTEURS À EAU SOUS PRESSION

répartis sur 19 sites sur l'ensemble du territoire sont exploités par EDF.

3. Tonnes de Métal Lourde. Cette unité se rapporte à la matière combustible contenue dans les assemblages.

4. Le procédé industriel le plus utilisé est l'ultracentrifugation. Il est également adapté à l'enrichissement de l'uranium de retraitement.

5. Le traitement est réalisé dans l'usine Orano de La Hague.



L'opération de traitement du combustible UNE utilisé consiste dans un premier temps à séparer les éléments de structure de l'assemblage du combustible puis à trier dans le combustible les 96 % de matières valorisables (95 % d'Uranium de ReTraitement (URT) et 1 % de plutonium) des 4 % de déchets ultimes⁶, en vue du recyclage des matières et de l'entreposage puis du stockage définitif en profondeur des déchets.

Après vitrification des déchets les plus radioactifs et compactage pour les moyennement actifs, les déchets sont conditionnés de manière sûre dans des conteneurs standards facilement manutentionnables, puis entreposés dans des installations de La Hague dans l'attente de leur stockage définitif dans CIGEO⁷.

À quantité de combustible utilisée équivalente, le volume des déchets est ainsi réduit d'un facteur 3 à 5 par rapport à un cycle ouvert où l'ensemble du combustible utilisé est considéré comme déchet.

Le plutonium issu du traitement est utilisé dans des combustibles MOX⁸ et l'Uranium de ReTraitement (URT) est recyclé dans des combustibles URE (Uranium de ReTraitement Enrichi⁹). Aujourd'hui, une fois ces nouveaux combustibles utilisés, leur matière n'est pas recyclée dans les réacteurs actuels : les combustibles usés ne sont donc recyclés qu'une fois, il s'agit d'un mono-recyclage. La stratégie nationale à long terme est celle du multi-recyclage qui permet de recycler la matière de tous les combustibles usés.

6. Ils sont constitués pour les plus radioactifs de produits de fission et d'actinides mineurs (américium, curium...).

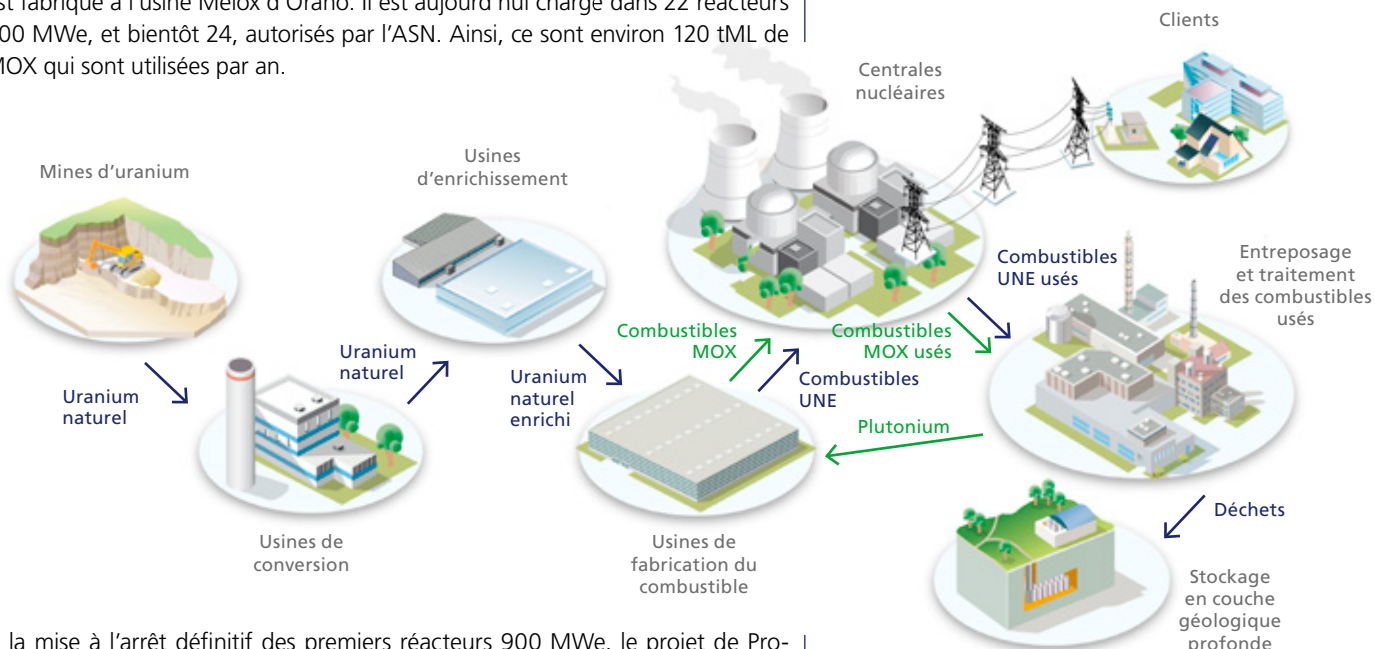
7. Projet de Centre industriel de stockage géologique de déchets nucléaires développé par l'Andra à la demande de la loi du 28 juin 2006.

8. Mixed Oxyde : la poudre d'oxyde de plutonium est mélangée à de la poudre d'oxyde d'uranium appauvri issu de l'opération d'enrichissement de l'uranium naturel. La teneur en oxyde de plutonium est d'environ 8 %. Il constitue le combustible MOX. Il est extérieurement identique à un assemblage UNE et produit la même énergie.

9. L'uranium issu de l'opération de traitement (URT) à La Hague a une teneur en isotope ²³⁵U de l'ordre de 0,8 % à 0,9 %. Il doit être enrichi en isotope ²³⁵U (un peu plus que l'UNE) afin d'être chargé en réacteur. Ce combustible est dit URE.

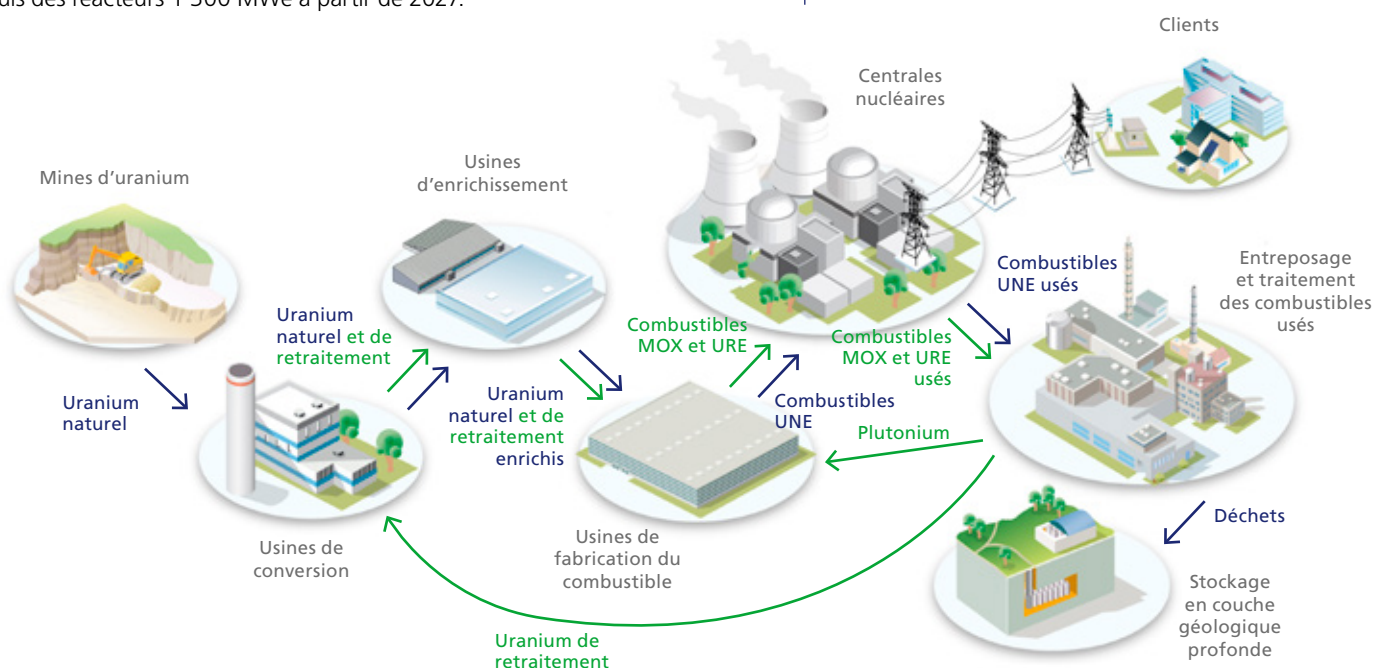
VALORISATION DES MATIÈRES PAR LE MONO-RECYCLAGE

Le plutonium, matière concentrant un potentiel énergétique très important, est recyclé sous forme de MOX (Mixed Oxyde), combustible fabriqué à partir d'un mélange de plutonium et d'uranium appauvri (partie de l'uranium issue de la phase d'enrichissement non intégré dans les UNE). Ce nouveau combustible est fabriqué à l'usine Mélox d'Orano. Il est aujourd'hui chargé dans 22 réacteurs 900 MWe, et bientôt 24, autorisés par l'ASN. Ainsi, ce sont environ 120 tML de MOX qui sont utilisées par an.

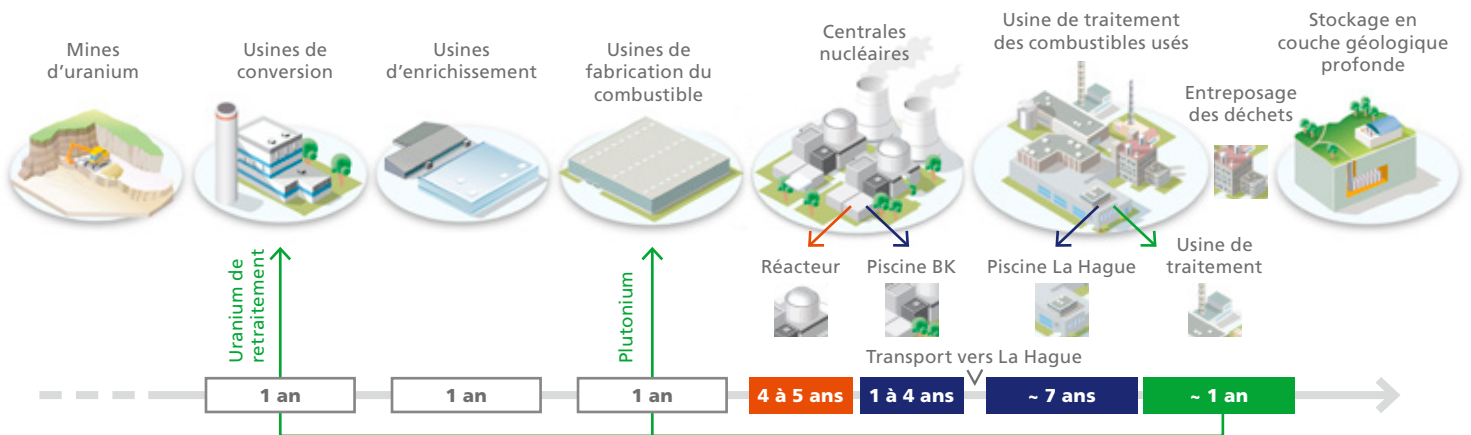


À la mise à l'arrêt définitif des premiers réacteurs 900 MWe, le projet de Programmation Pluriannuelle de l'Énergie envisage de développer le recyclage du plutonium sous forme de MOX dans des réacteurs 1 300 MWe.

L'uranium de retraitement est quant à lui recyclé par une filière industrielle similaire à celle de l'uranium naturel (conversion, enrichissement, fabrication). Les 4 réacteurs 900 MWe de Cruas ont fonctionné avec de l'URE (Uranium de Retraitement Enrichi) de 1994 à 2013. Après une suspension de ce recyclage pour des raisons industrielles, EDF a décidé de relancer une filière afin de reprendre le recyclage en réacteur dès 2023 pour alimenter les réacteurs 900 MWe de Cruas puis des réacteurs 1 300 MWe à partir de 2027.



Le temps caractéristique du recyclage des matières est d'environ 15 ans pour tenir compte des temps de refroidissement des combustibles usés ainsi que des durées des procédés industriels des usines du cycle.



Une économie de ressources naturelles jusqu'à 25 %

Chaque élément combustible issu du recyclage des matières qu'il soit MOX ou URE produit annuellement autant d'énergie qu'un élément combustible UNE, soit la consommation d'électricité nécessaire à plus de 3 000 foyers en France. Le parc utilise actuellement 120 tML de MOX sur les 1 200 tML de combustible utilisées au total annuellement. Le recyclage du plutonium permet donc une réduction de 10 % des besoins en uranium naturel. Depuis le début de l'utilisation progressive du combustible MOX soit maintenant plus de trente ans, environ 5 200 assemblages MOX (soit 2 400 tML) ont été chargés en réacteurs. Ce recyclage a ainsi préservé 18 000 t de ressources naturelles, soit un peu plus de deux ans de consommation du parc français actuel d'EDF.

De 1994 à 2013, la filière URE a permis de son côté le recyclage de plus de 4 000 tML d'uranium de retraitement soit une économie d'autant d'uranium naturel. À partir de 2023, en prenant l'hypothèse de la reprise de ce recyclage dans 4 réacteurs de 900 MW et 3 réacteurs 1 300 MW, ce seront environ 1 000 t d'uranium naturel soit environ 12 % du besoin annuel du parc qui seront économisés par an ; cette quantité pourra augmenter si l'URE est utilisé dans davantage de réacteurs. Ce recyclage permettra aussi d'utiliser progressivement le stock d'uranium de retraitement constitué depuis le début du traitement.

Une réduction du besoin en entreposage de combustibles usés d'un facteur 10

Les 1 200 tML de combustible utilisées tous les ans dans les réacteurs actuels pour la production d'électricité sont entreposées pour décroissance naturelle. En cycle ouvert, elles correspondraient à un besoin d'entreposage supplémentaire annuel. Ces combustibles usés sont aujourd'hui entreposés dans les piscines des bâtiments combustibles attenants aux réacteurs dans un premier temps, puis dans les piscines des installations Orano de La Hague. Avec le recyclage, environ 1 100 tML sont prélevées annuellement des entreposages de La Hague et traitées pour répondre au besoin de fabrication de combustible MOX. L'augmentation annuelle de la quantité de combustible usé à entreposer correspond à l'écart entre ces deux flux, soit de l'ordre de 100 tML/an.

Le flux annuel de combustibles usés à entreposer actuellement est donc aujourd'hui réduit d'un facteur 10 par rapport à un cycle ouvert (environ 100 tML/an au lieu de 1 200 tML/an). À date, la mise en œuvre progressive du recyclage a déjà permis un gain cumulé de 23 000 tML (soit environ 46 000 assemblages) sur les quantités de combustibles usés à entreposer.

De manière plus précise, la quantité de combustible usé à entreposer chaque année peut varier selon les flux exacts d'assemblages combustibles entrants en entreposage et sortants pour être traités selon les besoins de recyclage.

- Le flux entrant est fonction du nombre de réacteurs en exploitation. Considérant que l'ensemble du combustible est évacué au cours des 5 ans après la mise à l'arrêt définitif d'un réacteur, le flux entrant annuel baisse 5 ans après la mise à l'arrêt, soit par exemple à partir de 2034 pour un réacteur mis à l'arrêt en 2029.
- Le flux sortant est ajusté au besoin de MOX 3 ans avant le chargement de ce MOX, compte tenu des délais industriels. La mise à l'arrêt définitif d'un réacteur moxé en 2029 entraînerait une réduction du flux sortant dès 2026.

Au vu des capacités opérationnelles actuelles d'entreposage et des flux considérés, un besoin de nouvelles capacités intervient rapidement après les premières mises à l'arrêt définitif des réacteurs moxés, soit à l'horizon 2030 en cas de mise à l'arrêt à partir de 2029 (hypothèse cohérente avec les nouvelles orientations de la PPE – voir annexe 1).

DANS LE MONDE

IL EXISTE DEUX TYPES D'ENTREPOSAGE.

l'entreposage sous eau (dans des piscines) ou à sec (dans des emballages ou des canisters¹⁰). L'entreposage sous eau est particulièrement adapté pour les combustibles usés à forte puissance thermique ; il apporte par ailleurs une garantie pour la tenue des assemblages dans la durée, et une facilité d'accès aux assemblages pour leur surveillance.

L'entreposage à sec est possible pour les combustibles usés suffisamment refroidis, il est pour cela toujours précédé d'une phase plus ou moins longue (en fonction de la puissance thermique des combustibles) d'entreposage sous eau. En France, compte tenu de la dimension du parc et des types de combustibles utilisés, c'est un entreposage sous eau qui est adapté pour les nouvelles capacités d'entreposage nécessaires à l'horizon 2030 (voir annexe 2).

10. Les emballages sont des emballages métalliques lourds proches des emballages actuels de transport des combustibles usés. Les canisters sont des cylindres métalliques fermés par soudage, qui sont placés dans des structures d'entreposage en béton.

VALORISATION FUTURE DES MATIÈRES PAR LE MULTI-RECYCLAGE

Une fois utilisés, les combustibles MOX et URE sont entreposés sous eau en vue d'une valorisation ultérieure.

En effet, les combustibles MOX et URE usés ne peuvent pas être recyclés facilement dans les réacteurs actuels à eau pressurisée (REP), du fait de la composition isotopique du plutonium et de l'uranium dont ils sont constitués, sans modifications majeures des installations existantes.

En revanche, ils pourront l'être dans des réacteurs de 4^e génération, dont des prototypes ont fonctionné ou fonctionnent en France, Russie, Chine ou Inde, et font l'objet d'un programme de R&D avancé au sein du CEA. Cette filière, qui n'utilise que de l'uranium appauvri et les matières recyclées, permettrait de s'affranchir de l'extraction des ressources naturelles et de réduire encore davantage les volumes de déchets produits.

Compte tenu des surcoûts qu'il engendre par rapport aux réacteurs REP, le déploiement d'un parc de réacteurs à neutrons rapides multi-recyclant les matières n'est aujourd'hui envisagé qu'à l'horizon de la fin du siècle ou pour faire face à une crise mondiale prolongée d'approvisionnement en ressources énergétiques.

D'ici là, l'intérêt et la faisabilité d'un recyclage en réacteur REP des combustibles MOX et URE usés sera instruit. A cet effet, un programme de R&D comprenant études et expérimentation est engagé conformément à la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie.

3

ANNEXES

1- ÉVOLUTION DU BESOIN D'ENTREPOSAGE DE COMBUSTIBLE USÉ

• Un besoin de nouvelles capacités d'entreposage à l'horizon 2030

Le combustible usé, une fois déchargé des réacteurs, continue à émettre de la chaleur et doit donc être refroidi. Il est ainsi entreposé sous eau, dans un bâtiment combustible (appelé BK) adjacent au bâtiment réacteur.

À fin 2016¹¹, 4 040 t de combustible usé étaient entreposées dans les 58 piscines des BK. Cette quantité est relativement stable dans le temps car EDF s'attache à transférer chaque année vers les installations Orano de La Hague une quantité de combustible usé au moins équivalente à celle qui est déchargée définitivement des réacteurs. La quantité de combustible usé entreposé dans les BK est maintenue à un niveau présentant suffisamment de marge pour ne pas générer de contraintes sur l'exploitation des réacteurs.

Après quelques années de refroidissement en BK (1 à 4 ans selon le type de combustible), le combustible est transféré sur le site de La Hague où il est à nouveau entreposé avant traitement.

La quantité de combustible usé en attente de traitement entreposé sur le site Orano de La Hague au 31 décembre 2016 était de 9 778 tML (à 99,6 % de propriété française).

La capacité opérationnelle des piscines du site de La Hague est exprimée en nombre d'emplacements autorisés à recevoir des paniers contenant du combustible usé. On définit de façon conservatoire une capacité opérationnelle qui ne tient pas compte d'un certain nombre d'emplacements disponibles autorisés mais nécessaires à l'exploitation ; cette capacité opérationnelle est d'environ 2 830 emplacements (correspondant à une capacité d'environ 12 500 t de combustible irradié tel qu'utilisé par EDF)¹². La « valeur repère » de 100 tML/an d'augmentation de combustible irradié d'EDF à entreposer, correspond à environ 20 emplacements par an.

Sur cette capacité opérationnelle, environ 210 emplacements étaient disponibles à fin 2016 pour recevoir du combustible usé supplémentaire¹³, les autres étant occupés principalement par :

- des éléments combustibles usés français : aujourd'hui majoritairement des combustibles usés REP EDF (environ 2 210 emplacements) mais aussi quelques combustibles de recherche,
- des éléments combustibles usés étrangers (REP, REB, RTR¹⁴),
- des assemblages de rebuts MOX,
- de déchets qu'il est prévu de conditionner à court terme, libérant ainsi de l'ordre de 200 emplacements d'ici 2030 ; cette valeur est à comparer à la « valeur repère » du besoin d'environ 20 emplacements par an.

EN FRANCE

LA MISE EN SERVICE

d'une piscine centralisée à l'horizon 2030 et la gestion optimisée des piscines de La Hague permettent de répondre aux besoins supplémentaires d'entreposage de combustible usé en France.

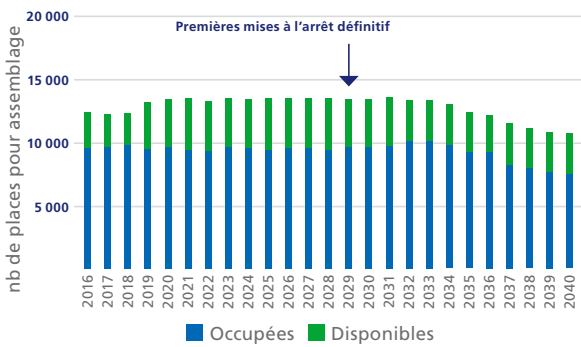
11. Date de référence utilisée dans la publication de l'Inventaire national ANDRA.

12. À titre d'illustration, un panier REP sur un emplacement peut contenir jusqu'à 9 assemblages combustibles irradiés EDF soit environ 4,4 tML en moyenne et environ 4,9 tML au maximum.

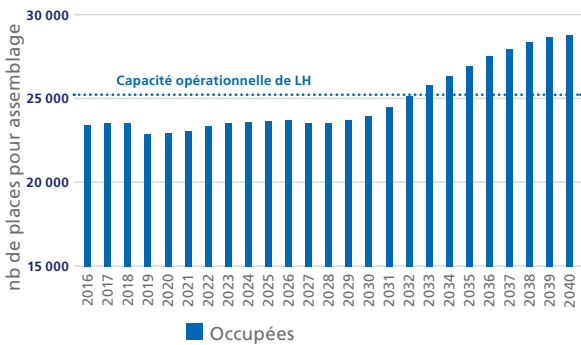
13. Cette valeur ne tient pas compte d'un certain nombre d'emplacements disponibles autorisés mais nécessaires à l'exploitation.

14. Réacteurs de test et de recherche.

Évolution de l'occupation des BK



Évolution de l'occupation des piscines hors BK



Pour évaluer le moment où des capacités d'entreposage de combustible utilisé complémentaires deviennent nécessaires, il faut mener des études prospectives sur les flux annuels entrants et sortants. À titre d'illustration, les 2 figures suivantes représentent l'évolution des besoins d'entreposage sur la base d'un scénario¹⁵ de l'Inventaire National. Ce scénario, élaboré tout début 2017, considérait la mise à l'arrêt définitive de la moitié des réacteurs 900 MWe après 50 ans de fonctionnement, en plus de ceux de Fessenheim ; 15 réacteurs 900 MWe étaient ainsi mis à l'arrêt entre 2029 et 2035.

- EDF s'assure que la quantité de combustible utilisé dans les BK n'augmente pas voire diminue, pour ne pas contraindre l'exploitation.
- Les premiers réacteurs 900 MWe sont mis à l'arrêt après 50 ans de fonctionnement (2029). L'évacuation de l'ensemble du combustible utilisé des tranches mises à l'arrêt nécessite quelques années.
- D'ici 2029, l'occupation des piscines de La Hague reste stable, la libération des emplacements actuellement occupés par des déchets compensant globalement l'apport de combustible utilisé supplémentaire à entreposer.
- À partir de la mise à l'arrêt des réacteurs, le flux de traitement doit s'adapter aux besoins de MOX (réduction d'environ 50 t/an par réacteur MOXé arrêté) ; la quantité supplémentaire de combustible à entreposer chaque année s'accroît sensiblement (environ 240 t/an en moyenne dans ce scénario)¹⁶.

L'impact des nouvelles orientations de politique énergétique rendues publiques par les déclarations du gouvernement relatives à la PPE en novembre 2018 doit être précisé. En première approche, l'échéance du besoin complémentaire d'entreposage de combustible utilisé ne sera pas modifiée. L'utilisation de MOx dans d'autres réacteurs (1 300 MWe existant ou nouveaux réacteurs), compte tenu du délai pour sa mise en œuvre, aura un effet sur les besoins en entreposage ultérieurs à 2030.

15. Scénario avec une durée de vie des réacteurs entre 50 et 60 ans.

16. Cette analyse ne tient pas compte de la mise en service de nouveaux réacteurs ni du moxage d'autres réacteurs que ceux actuellement moxés.

ANNEXES

2- CONCEPTS D'ENTREPOSAGE LONG TERME POUR LE COMBUSTIBLE USÉ DANS LE MONDE

Deux principaux concepts d'entreposage long terme du combustible usé existent dans le monde, l'entreposage sous eau et l'entreposage à sec :

- **L'entreposage sous eau** exploite les bonnes qualités physiques de refroidissement de l'eau. Le contact direct de l'eau avec l'assemblage combustible favorise l'évacuation de la chaleur. Des systèmes actifs redondants et sécurisés refroidissent l'eau et assurent sa circulation afin de maintenir sa température et celle des gaines de l'assemblage combustible sous les 50 °C. L'importante quantité d'eau¹⁷ présente offre au système une grande inertie qui facilite la mise en œuvre de moyen de secours. Ce type de refroidissement est bien adapté aux combustibles chauds.

À cette température, une conservation sur 100 ans sous eau sans dégradation des assemblages combustible a été démontrée par le CEA. Les combustibles sont rangés verticalement dans des râteliers ou des paniers sous eau facilement accessibles ; leur état de conservation peut être ainsi aisément inspecté à tout moment.

La France dispose d'une grande expérience en matière d'entreposage sous eau : 58 piscines BK sont en exploitation dans les centrales nucléaires EDF et 4 piscines de grandes tailles le sont à La Hague.

- **L'entreposage à sec** utilise l'air ambiant pour évacuer la chaleur des combustibles. Les combustibles sont placés dans des emballages ou canisters métalliques, scellés hermétiquement. L'emballage ou le canister est refroidi par convection naturelle de l'air ambiant. L'évacuation de la chaleur du combustible chaud s'effectue par l'intermédiaire de l'emballage ou du canister, ce qui réduit l'efficacité du refroidissement. Il en résulte des limitations sur la puissance thermique des combustibles, communément inférieure à 2 kW par assemblage combustible, et une température des gaines du combustible nettement plus élevée qu'en entreposage sous eau.

La démonstration de la conservation sans dégradation des gaines des combustibles sur des dizaines d'années à une température initiale comprise entre 350 et 450 °C reste à produire.

Compte tenu du faible pouvoir caloporteur de l'air, les emballages doivent respecter un écartement minimal. De ce fait, à quantité de combustible égale, la surface d'un entreposage à sec est plus grande que celle d'un entreposage sous eau, d'un facteur environ 30 % (à moduler en fonction du concept d'entreposage à sec).

En cas de détection d'une anomalie, l'accès aux combustibles est possible, mais reste complexe car elle nécessite la réouverture de l'emballage ou du canister scellé.

Pour les deux concepts, le même niveau de sûreté est requis. Le refroidissement des combustibles ou des emballages doit être assuré y compris dans les situations accidentelles : refroidissement de l'eau pour le premier, non-obturation de la circulation naturelle de l'air pour le second. De même, les deux installations doivent présenter le même niveau de confinement des matières radioactives vis-à-vis de l'environnement. Le concept d'entreposage à sec demande un refroidissement préalable sous eau de l'ordre de 5 ans pour les combustibles UNE et pouvant aller jusqu'à 50 ans pour certains combustibles MOX.

MOINS DE
50°

C'EST LA
TEMPÉRATURE

des gaines de
l'assemblage
combustible
entreposées
sous eau.

À QUANTITÉ ÉGALE

LA SURFACE

D'UN ENTREPOSAGE À SEC

est plus grande que celle d'un entreposage
sous eau, d'un facteur environ 30 %.

17. La profondeur d'une piscine d'entreposage est de plus de 10 m pour des hauteurs d'assemblages de 4 à 5 m.