

# L'enfouissement géologique des déchets nucléaires de haute activité en France : quels types de déchets, quelles quantités ?

Jean Claude Zerbib, André Guillemette

## Sommaire

### 1 - La transmutation et ses contraintes

#### *1.1 Les limites de la transmutation*

### 2 - Combustibles usés et matières nucléaires produits

#### *2.1 Combustibles usés et matières nucléaires produits*

#### *2.2 Flux annuels de combustibles nucléaires*

#### *2.3 Volumes de déchets du retraitement accumulés fin 2010*

### 3 - Périmètre des déchets et combustibles nucléaires dédiés à l'enfouissement profond

#### *3.1 Les déchets prévus dans CIGEO, version ANDRA*

#### *3.2 Les déchets prévus dans CIGEO, version HCTISN*

#### *3.3 Le cycle du combustible jusqu'en 2017, version officielle présentée par les exploitants EDF, AREVA et ANDRA à l'ASN*

#### *3.4 La position du gouvernement en matière de politique électronucléaire*

### 4 - Choix de la présente étude

#### *4.1 Données thermiques après trois ans de refroidissement*

#### *4.2 Données thermiques, jusqu'à 300 ans de refroidissement*

### 5 - Synthèse de données sur les colis matières EDF devant être stockés en site profond dans le projet CIGEO

#### *5.1 Bilan matières fin 2010- 2012*

#### *5.2 Bilan matières prospectif*

#### *5.3 Répercussions sur le cycle du combustible consécutives aux arrêts de réacteurs*

#### *5.4 Calculs des tonnages de combustibles et des volumes de déchets*

##### *5.4.1 Bilan du cycle en 2030*

##### *5.4.2 Le bilan de l'ANDRA pour une durée d'exploitation des réacteurs de 40 ans*

##### *5.4.3 Bilan à 50 ans selon l'ANDRA*

### 6- Conclusions

### 7- Bibliographie

**Annexe 1 : Focus sur la production française d'électricité d'origine nucléaire**

**Annexe 2 : Classement des réacteurs PWR de 900 MWe**

**Annexe 3 : Tonnages de combustibles retraités dans les usines de La Hague**

## Résumé

Plusieurs stratégies ont été envisagées pour gérer les déchets de haute activité produits par le fonctionnement des réacteurs nucléaires producteurs d'électricité. Elles concernent soit les combustibles usés laissés en l'état, soit les produits résultant du retraitement (produits de fission, actinides mineurs et déchets de structure).

La première solution consiste en un stockage définitif en surface (ou entreposage à sec dans l'attente d'une autre solution) des différents « colis<sup>1</sup> », dans des installations dont l'espérance de vie varie de 50 à 100 ans. Le choix d'un tel stockage suppose la pérennité des institutions chargées de la gestion de ces déchets durant des millénaires. Il permet également d'attendre la mise au point d'une nouvelle technique de gestion après un long refroidissement des combustibles « usés ».

La seconde solution consiste, après une période de refroidissement de 60 à 90 ans, en l'abandon des déchets dans une formation géologique profonde, peu perméable à l'eau, afin d'assurer la protection à long terme des colis contre la dégradation par des eaux souterraines. La pollution des eaux qui en résulterait deviendrait en effet très dangereuse pour les êtres vivants.

Dès la première loi « Bataille<sup>2</sup> » de 1991 sur la gestion de déchets, une 3<sup>e</sup> solution consistant en une séparation-transmutation des radionucléides à vie longue avait été envisagée. Cette voie de recherche, qui a également été retenue dans la loi de 2006, n'a de sens qu'en accompagnement du recyclage du plutonium qui constitue, au bout de quelques siècles, la première nuisance potentielle du combustible UOX.

Les travaux effectués sur la transmutation montrent que cette voie est inopérante pour les produits de fission de longues périodes. S'agissant des actinides mineurs principaux (américium et curium), la séparation est possible, mais les faibles rendements de transmutation<sup>3</sup> nécessitent plusieurs recyclages, ce qui rend cette option longue et coûteuse. Le développement industriel de cette technique est donc peu probable.

Dans la double hypothèse d'une réduction à 50 % de l'énergie électrique d'origine nucléaire en 2025 et d'une durée d'exploitation des réacteurs fixée à 40 ans, nous observons que la réduction, annoncée par le Président de la République, est obtenue fin 2022 après l'arrêt du 23<sup>e</sup> réacteur de 900 MWe. Parmi ces réacteurs, 17 fonctionnent avec des combustibles MOX.

Une fois la réduction réalisée, 11 réacteurs de 900 MWe resteront en fonctionnement, dont 7 avec des chargements de combustibles MOX et 4 avec des combustibles à base d'uranium de retraitement (URT). Comme huit réacteurs, fonctionnant avec du MOX, devraient être arrêtés en 2021, sept autres en 2022 et deux en 2023, les besoins en plutonium et en combustible MOX diminueront alors drastiquement (17 réacteurs utilisant du MOX arrêtés sur 24 en 3 ans), ce qui entraînera une forte réduction du tonnage retraité.

La réduction de la production électrique d'origine nucléaire s'accompagnera d'un impact significatif sur les mailons aval et amont du cycle du combustible car la majorité des réacteurs arrêtés utilisent du combustible MOX (17/23), ce qui entraîne la réduction du tonnage retraité et de la fabrication de ces combustibles.

Nos évaluations ont porté sur les déchets de très haute activité (THA) et moyenne activité à vie longue (MAVL) constitués des produits vitrifiés issus du retraitement des combustibles des réacteurs à eau pressurisée (PWR) d'EDF, des matériaux métalliques compactés (éléments d'assemblages combustibles), conditionnés dans des conteneurs standards de déchets ou des combustibles usés laissés en l'état dans deux scénarios : retraitement limité aux besoins de MOX, retraitement intégral de tous les combustibles.

Le retraitement intégral des combustibles usés conduit à utiliser des surfaces de stockage géologique inférieures à celles nécessaires au retraitement adapté aux seuls besoins de la production de combustible MOX, car le stockage des combustibles usés, particulièrement celui des MOX, est très pénalisant du fait de sa forte dissipation thermique<sup>4</sup>. Cependant, le retraitement intégral produit une quantité de plutonium qui se mesure en centaines de tonnes, une masse considérable que les réacteurs du futur, qui restent à concevoir et à construire, auront peut-être du mal à épuiser. Or aucune étude connue n'envisage de considérer, qu'une fraction plus ou moins grande de ce stock de plutonium, devra être considérée comme un déchet et conditionnée de manière sûre vis-à-vis du risque de toxicité potentielle et de prolifération qu'il présente.

Les évaluations faites dans le cas d'une durée d'exploitation des réacteurs de 40 ou de 50 ans, associée au retraitement intégral, montrent que les tonnages de plutonium obtenus sont supérieurs à 400 tonnes. Nos calculs des tonnages de combustibles usés mis en jeu dans le cas des deux hypothèses de durée de vie des réacteurs sont très proches des estimations publiées par l'ANDRA. En prenant les critères de stockage de l'ANDRA, les surfaces occupées par ces déchets THA, dans un site en profondeur géologique, varient entre 2,7 et 4,5 kilomètres carrés.

1 - Le nom de « colis » a été donné aux conteneurs qui renferment les déchets radioactifs.

2 - La loi du 30 décembre 1991, connue sous le nom de son rapporteur, Christian Bataille, est relative aux recherches à conduire en matière de gestion des déchets de haute et moyenne activité.

3 - Pour un séjour des cibles durant 5 ans en réacteur, la transmutation concerne 30 % de l'américium et 50 % du curium [CEA2012b].

4 - Guillemette A et Zerbib JC, Les combustibles MOX d'EDF, production et stockages, bilans 2011, Global Chance, N° 33, mars 2013.

Pour assurer la gestion à long terme des déchets ultimes de haute activité, la Commission Castaing<sup>5</sup> avait noté que deux stratégies pouvaient être envisagées :

- La première est fondée sur la *pérennité du contrôle* des déchets. Si elle est acquise, le stockage peut alors se faire en surface et se trouve en situation de reprise permanente possible. Ce n'est plus la stabilité du stockage qui est requise dans ce cas mais celle de l'institution humaine chargée de la surveillance. Mais il est difficile d'assurer un tel système sur des milliers d'années. Ce choix permet également un entreposage sûr dans l'attente de la mise au point d'une autre technique de gestion des déchets.
- La seconde stratégie consiste à *abandonner les déchets* stockés définitivement en profondeur, après une phase opérationnelle et une phase de surveillance. Cette option implique que l'on puisse définir la sûreté et la garantir sur des échelles de temps qui peuvent se compter en millions d'années en s'appuyant sur la tenue à long terme des colis et des diverses barrières technologiques et naturelles.

Les barrières technologiques, qui s'emboîtent comme des poupées russes, sont constituées du déchet conditionné lui-même (verre, bitume, coques compressées<sup>6</sup> ou l'assemblage combustible), des conteneurs qui l'enferment, des barrières géochimiques ajoutées et de la roche d'accueil. L'objectif de ces barrières est d'éviter le contact du déchet avec l'eau qui finit par attaquer et dissoudre les matières.

Plusieurs familles de roches se présentent : l'argile, le granit et le sel<sup>7</sup>. Le sel avait été exclu du choix par la Commission Castaing, car ce type de roche a déjà été utilisé pour entreposer du combustible liquide. La cavité est en pratique creusée par une injection d'eau (avec récupération de la saumure) et une telle opération serait catastrophique si elle survenait au niveau d'un site de stockage dont on aurait perdu la mémoire.

Le granit a été choisi par la Suède<sup>8</sup>, la Finlande<sup>9</sup> et le Canada. La Belgique<sup>10</sup> et la France ont choisi l'argile.

## 1. La transmutation et ses contraintes

Avant de nous concentrer sur la question du stockage des déchets nucléaires, il est intéressant de nous arrêter un instant sur une voie qui avait soulevé des espoirs importants dans les dernières décennies du vingtième siècle, celle de transformer des déchets à vie très longue (plusieurs dizaines de siècles, en déchets à vie inférieure à quelques centaines d'années), la « séparation transmutation » et de réduire ainsi les contraintes temporelles du stockage des déchets.

La séparation-transmutation a été inscrite comme l'un des trois axes de recherche prescrits par la loi du 30 décembre 1991. Afin d'assurer la gestion des déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue<sup>11</sup> (HA-MAVL), la loi du 28 juin 2006, relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs, a repris ces trois axes : le stockage réversible en couche géologique profonde, l'entreposage, la séparation et la transmutation des isotopes à vie longue.

La transmutation a pour objectif de transformer les radionucléides de période longue que sont les trois actinides mineurs (neptunium, américium, curium) en isotopes à vie courte au moyen d'un bombardement neutronique. Cette option, qui vise à réduire la toxicité des déchets à long terme, ne constitue donc pas, à elle seule, une solution pour tous les déchets produits.

Il découle, de la mise en œuvre de la transmutation, une triple contrainte, car il est nécessaire, après avoir procédé au retraitement des combustibles usés<sup>12</sup> :

5 - Commission Castaing, *Rapport du groupe de travail sur la gestion des combustibles irradiés*, Conseil supérieur de la sûreté nucléaire, décembre 1981-Novembre 1982, 84 pages.

6 - Les tronçons de gaines (coques) sont compressés car si leur fusion aurait permis une plus grande réduction de volume, elle conduisait aussi à un relâchement du tritium fixé.

7 - Les allemands ont stocké depuis 1967, à titre expérimental, des déchets de faible activité (126 000 fûts) et moyenne activité (4 300 fûts) dans l'ancienne mine de sel d'Asse. Des mouvements de terrain ont conduit à des écoulements d'eau et 12 m<sup>3</sup> sont extraits journalièrement du site qui a été fermé.

8 - En 2009, la Suède a choisi le site de Forsmark, à 200 km au nord de Stockholm, parmi deux sites candidats pour abriter un stockage en profondeur (500 m) de combustibles « usés ». Depuis 1985, la Société suédoise de gestion du combustible et des déchets nucléaires (SKB), entrepose plus de 5 000 tonnes de combustibles usés dans des piscines situées sous 50 mètres de roche.

9 - Le site devrait se situer sur l'île d'Olkiluoto, à 230 km au nord-ouest d'Helsinki. Le stockage qui concerne les assemblages de combustibles usés, insérés dans un cylindre de fonte encapsulé dans un fourreau de cuivre, se fera à environ 400 mètres de profondeur. Dès 2004, un laboratoire souterrain avait été construit (sur le site d'Oncalo), en vue de la réalisation du stockage géologique. C'est une entreprise (Posiva), créée par deux exploitants nucléaires, qui a demandé en décembre 2012 à l'État finlandais l'autorisation de construire le site.

10 - Dès 1983, la Belgique a créé un laboratoire creusé sous le Centre nucléaire de Mol.

11 - De manière arbitraire, il a été décidé de qualifier de « longues » les périodes radioactives d'environ 30 ans et plus. Ce choix vise à prendre en compte les principaux produits de fission tels que le strontium 90 ( $T = 28,15$  ans) et le césium 137 (30,15 ans).

12 - Le retraitement actuel des combustibles usés sépare en trois familles les éléments radioactifs produits dans les réacteurs : l'uranium, le plutonium et les produits de fissions (PF) mêlés aux actinides mineurs.

- D'extraire des solutions de produits de fission (PF) les actinides mineurs<sup>13</sup> à vie longue. À l'échelle du laboratoire, la séparation des trois actinides mineurs a été démontrée ainsi que l'extraction du césium et de l'iode (actuellement rejeté en mer) des solutions de produits de fission.
- Confectionner des « cibles » solides<sup>14</sup> qui seront soumises à un flux neutronique.
- Réaliser un réacteur à neutrons rapides qui permettra les transmutations. Les réacteurs de type REP donnent, par capture neutronique, des actinides de rang plus élevé, ce qui ne résout pas le problème. Comme la production d'actinides mineurs est bien plus importante dans les combustibles MOX<sup>15</sup> que dans les combustibles UO<sub>2</sub>, l'option transmutation devrait logiquement conduire au retraitement des combustibles MOX.

Pour passer au niveau industriel, la séparation nécessite des opérations technologiquement et financièrement très lourdes. Compte tenu des délais de mise au point au niveau industriel des techniques et des appareillages, la greffe de ces moyens sur les usines de La Hague est exclue, compte tenu de la durée de vie des installations existantes (2030 ?) et des difficultés d'insertion de nouvelles installations de grande taille.

Si l'option « transmutation » était choisie, elle nécessiterait donc la conception d'une nouvelle usine de retraitement du combustible irradié qui ajoutera, à la séparation de l'uranium et du plutonium, l'extraction d'un ou plusieurs actinides mineurs (Np, Am, Cm) des solutions de produits de fission et leur conditionnement, en phase solide, dans des cibles. Ces cibles nécessiteront des expérimentations préalables afin de valider leur tenue à l'irradiation et aux gaz produits en interne (hélium et PF gazeux).

### 1.1 Les limites de la transmutation

La faisabilité technique de la transmutation des actinides mineurs, émetteurs alpha, en noyaux plus légers de périodes plus courtes, a été démontrée lors d'expériences conduites au CEA dans le réacteur Phénix à Cadarache. Ce n'est cependant pas le cas des produits de fission (PF) à vie longue (césium 135, chlore 36, iode 129, technétium 99) pour lesquels la réalisation de l'extraction et de la transmutation est difficile voire impossible [CEA2012b]. Aussi, depuis 2006, le CEA a arrêté les recherches sur la transmutation des PF. Les travaux ne portent plus que sur les actinides mineurs.

Comme la transmutation des actinides est un processus lent, il faut retraiter les cibles et recycler plusieurs fois les actinides non-transmutés. Si la charge thermique des déchets sera allégée d'une fraction plus ou moins importante des actinides, cela ne signifie pas que l'on pourra se passer du stockage géologique, qui portera sur la fraction non-transmutée, le plutonium et les produits de fission formés.

La transmutation réduit les masses d'actinides mineurs et leur charge thermique, mais laisse un résiduel de plusieurs dizaines de % associé au plutonium et aux produits de fission (PF).

Suivant la cible (neptunium, américium ou curium) il reste, après un séjour de 5 ans dans un réacteur à neutrons rapides, 30 % (cas de l'américium 241 et 243) à 50 % (curium 244) de l'actinide tandis que du plutonium (38 % pour l'<sup>241</sup>Am, 11 % pour le <sup>244</sup>Cm) et des produits de fission (24 % pour l'<sup>241</sup>Am, 28 % pour le <sup>244</sup>Cm) ont été formés [CEA2012b].

La transmutation des actinides mineurs qui visait à produire des PF, a donc un rendement de 28 % au maximum, après 5 années d'irradiation.

La transmutation est dite homogène lorsque l'actinide est mélangé de manière uniforme au combustible. Mais la présence de cibles d'actinides mineurs dans un réacteur peut poser des problèmes de sûreté, si la teneur est élevée (limitées à 2 ou 3 % environ). Afin de réduire ces difficultés, il est possible de placer les cibles en périphérie du cœur, mais le flux de neutrons est réduit ainsi que les taux de transmutations. Dans ce cas, la transmutation est dite hétérogène. Les actinides sont dans une matrice inerte (oxyde de magnésium).

La transmutation peut aussi être découplée des réacteurs électronucléaires où aux fissions s'ajoutent des réactions de capture neutronique qui produisent d'autres actinides mineurs. Cette option nécessite la réalisation d'un réacteur souscritique sans uranium et d'une source de neutrons (accélérateur de protons de plusieurs centaines de MeV couplé à une cible de spallation) dédiés aux opérations à réaliser. L'arrêt du faisceau éteint la réaction en chaîne.

Ce système hybride ou ADS (Accelerator Driven System) est une idée développée par Carlo Rubbia (Prix Nobel de physique, 1983) dans les années 1990. En 1995 et 1996, une approche expérimentale du procédé a été réalisée

13 - Si une adaptation simple du procédé PUREX permet d'extraire le neptunium, il faut des procédés de séparation sélectifs pour séparer l'américium et le curium, qui sont chimiquement très proches. Comme ce sont les isotopes de l'américium (<sup>241</sup>Am, T = 432,7 ans) qui pèsent le plus sur la thermique et la toxicité à long termes, des procédés chimiques spécifiques ont été étudiés pour extraire, en priorité, cet actinide des solutions de PF (Am seul ou Am + Pu) [CEA2012b].

14 - Dans le cas du recyclage homogène, le neptunium 247 (émetteur  $\alpha$  de période = 2,14 millions d'années) est mélangé de manière homogène au matériau combustible (UO<sub>2</sub> + PuO<sub>2</sub>). Cette opération nécessite la mise en œuvre de technologies proches de celle des combustibles MOX, qui augmentent les coûts de fabrication.

15 - Pour un même taux de combustion (45GWj/t), le MOX usé renferme une masse d'actinides mineurs 4,9 fois supérieure et une activité 10,8 fois supérieure à celle d'un combustible UO<sub>2</sub> [Guillemette2013].

au CERN, à Genève. Le 6<sup>e</sup> programme (2007-15) consiste en un couplage entre un réacteur souscritique (réacteur Vénus du SCK-CEN de Mol en Belgique) sans uranium et une source de neutrons de 14MeV générés par un accélérateur de deutons. Cette installation, terminée début 2010, est expérimentée depuis avril 2012.

## 2. Combustibles usés et matières nucléaires produits

L'évaluation du volume de déchets produits par le retraitement du combustible, et celle du tonnage des différents types de combustibles usés gardés en l'état, dépendent notamment des hypothèses faites, sur l'échéancier de mise à l'arrêt des réacteurs et sur les prévisions des tonnages à retraiter, décidées par AREVA et EDF. Ces volumes et tonnages s'ajouteront à ceux cumulés à ce jour.

### 2.1 Combustibles usés et matières nucléaires déjà produits

A partir des données disponibles, nous pouvons décrire les tonnages de combustibles usés retraités et entreposés, les volumes de déchets issus du retraitement (déchets bitumés, produits vitrifiés, coques compactés, etc.), les tonnages de plutonium ouvragé ou non déjà produits, ainsi que les flux annuels des différents substances radioactives de haute et moyenne activité. Le tableau N° 1 suivant dresse un état des lieux, fin 2010. Il y avait à cette date un total 18914 tonnes de combustibles usés ou en charge dans le cœur des réacteurs d'EDF, au CEA et dans la propulsion navale militaire.

**Tableau 1 : Combustibles usés et matières issues du retraitement des combustibles irradiés (Tonnes de métal lourd)**

Matières	Fin 2010
Combustibles UOX en cours d'utilisation dans les réacteurs EDF	4477
Combustibles MOX en cours d'utilisation dans les réacteurs EDF	299
Combustibles URE en cours d'utilisation dans les réacteurs EDF	156
<b>Total tonnages en cours d'utilisation</b>	<b>4932</b>
Combustibles UOX usés <sup>a)</sup> , entreposés en piscine	12006
Combustibles MOX usés <sup>b)</sup> , entreposés en piscine	1287
Combustibles URE usés <sup>c)</sup> , entreposés en piscine	318
Combustibles usés des réacteurs civils de recherche <sup>d)</sup> , entreposés en piscine	53
Combustibles métalliques usés entreposés en piscine	15
Combustibles usés du réacteur à neutrons rapides <sup>e)</sup> Superphénix	104
Combustibles usés des réacteurs de recherche <sup>f)</sup>	53
Combustibles usés de la propulsion navale	146
<b>Total tonnages combustibles usés<sup>g)</sup></b>	<b>13982</b>
Uranium issu de combustibles usés après traitement URT <sup>h)</sup>	24100
Plutonium issus des combustibles usés après traitement <sup>i)</sup>	80
Uranium appauvri <sup>j)</sup>	271481

a) Dont 8380 tonnes (69,8 %) entreposées sur le site de La Hague fin 2010 et 3626 t dans les piscines des réacteurs d'EDF. Les tonnages de combustibles usés, fin 2010, proviennent de [Andra 2012], page 49/212.

b) 900 tonnes sont entreposées à La Hague (69,9 %), 387 t dans les piscines des réacteurs EDF (Blayais, Chinon B, Dampierre, Gravelines, St Laurent des Eaux B, Tricastin) et 299 t sont chargées dans les réacteurs fin 2010.

c) Environ 250 tonnes de combustible URE (uranium de recyclage enrichi à 4,1 %) sont entreposées à La Hague et 68 t dans la Centrale EDF de Cruas et 156 t sont chargées dans les réacteurs de Cruas. Ce type de combustible n'a pas encore été retraité à La Hague.

d) 43 tonnes du réacteur Phénix sont entreposées au CEA Cadarache, 2 tonnes à La Hague.

e) Ce combustible est entreposé sur le site de Creys-Malville.

f) A l'état neuf, ces combustibles étaient constitués d'uranium très enrichi (7 à 90 %). Leurs taux de combustion sont très élevés.

g) Sur ce total, 9539 tonnes (69,2 %) sont entreposées sur le site de La Hague fin 2010 (9709 t fin 2011 et 9790 t fin 2012). À l'ensemble des combustibles usés non retraités, il faudrait ajouter ceux des réacteurs de sous-marins nucléaires (146 t) fin 2010.

h) Dont 2070 tonnes appartiennent à des clients étrangers. La fraction du tonnage d'uranium de retraitement, entreposé à La Hague, n'est que de l'ordre de 1 % de la quantité produite (208 t en 2010, 333 t en 2011 et 293 t en 2012). Le reste se trouve sur les sites de Romans, du Tricastin et de Cruas. L'URT se trouve sous forme d'UF6 ou d'U<sup>3</sup>O<sub>8</sub>.

i) 60 tonnes sont entreposées à La Hague fin 2010 (dont 37,7 t appartiennent à la France), 8 t en cours de fabrication de combustible MOX, 10 t dans les MOX neufs et 2 t entreposées dans diverses installations du CEA. Fin 2011 il y avait 57 t entreposées (dont 36,2 t pour la France) et 56 t (dont 37,8 t) fin 2012.

j) Cet uranium est entreposé principalement sur les sites du Tricastin (165900 t) et de Bessines (104600 t).

Sources : [ANDRA2012] chapitre 2.3, [Global Chance 2013], [AREVA2011], [AREVA2012].

\* Dont 8380 tonnes (69,8 %) entreposées sur le site de La Hague fin 2010 et 3626 t dans les piscines des réacteurs d'EDF. Les tonnages de combustibles usés, fin 2010, proviennent de [Andra 2012], page 49/212.

## 2.2 Flux annuels de combustibles nucléaires

Les cœurs des 58 réacteurs nucléaires du parc EDF, qui renferment 4 932 tonnes de combustible, produisent environ **1 200 t/an** (1 162 t/an sur 3 ans de 2010 à 2012), de combustibles irradiés. Selon EDF, ce tonnage de combustibles irradiés regroupe trois types de combustibles [EDF2013], soit environ<sup>16</sup> :

- 1 010 t/an de combustible UOx, enrichi de 3,1 à 4,0 % en 235U à partir d'uranium naturel [CEA2012],
- 70 t/an de combustible produit à partir de l'uranium du retraitement<sup>17</sup> enrichi (URE) à 4,1 %, utilisés dans les 4 réacteurs de 915 MWe de la Centrale de Cruas (18,5 t/an par réacteur),
- 120 t/an de combustible MOX (mélange d'oxyde d'uranium appauvri et d'oxyde de plutonium) fabriqués à partir du plutonium extrait des UOx usés retraités dans les usines de La Hague. Ces combustibles peuvent être utilisés dans 28 des 34 réacteurs<sup>18</sup> de 900 MWe du parc EDF. L'enrichissement moyen en plutonium a varié de 7,08 % à 8,65 %.

Comme les usines de La Hague retraitent pour EDF de l'ordre de 1 050 t par an (1 039 t/an sur 3 ans de 2010 à 2012), pour un parc de réacteurs inchangé, le stock de combustibles usés s'accroît d'environ 150 t/an, dont 120 t de MOX.

Fin 2012, il y avait à La Hague 9 790 t de combustibles usés entreposés [AREVA2012], dont environ 1 140 t de MOX et 110 t de MOX neufs rebutés. En ajoutant à cela le combustible entreposé dans les piscines de refroidissement des réacteurs EDF, *le tonnage total des combustibles en cours d'utilisation et des combustibles usés entreposés*<sup>19</sup> s'établit, fin 2012, à environ 18 543 t (bilan de 2010) + 2 années à 150 t/an = **18 843 tonnes**.

Comme le retraitement du combustible MOX est long<sup>20</sup> et n'a pu être démontré qu'en mélangeant les solutions avec une forte proportion de combustibles oxydes, il est vraisemblable que l'EDF renoncera, à l'échéance de 2017, à retraiter ce combustible, qui devra donc être stocké en l'état.

Compte tenu des surcoûts (ces données ne sont pas publiées) relatifs au retraitement des combustibles MOX, déjà eux-mêmes de fabrication fort coûteuse<sup>21</sup>, de l'important tonnage de combustibles (de tous types) entreposés et de l'importance du stock de plutonium actuel (qui n'est pas autorisé à s'accroître), les scénarios de retraitement de l'ensemble des combustibles sont irréalistes.

## 2.3 Volumes de déchets du retraitement accumulés fin 2010

Nous considérons les deux principaux types de déchets produits par le retraitement :

- les déchets de haute activité (HA), qui comprennent les « colis standard de déchets vitrifiés » (CSD-V) à La Hague et à Marcoule et les « déchets compactés » (CSD-C) qui renferment les coques et embouts de combustible PWR retraités à La Hague,
- les déchets de moyenne activité renfermant des radionucléides à vie longue<sup>22</sup> (MA-VL),

Le rapport de l'ANDRA [ANDRA 2012] (fiches 01-HA) indique un total de 2 707 m<sup>3</sup> de déchets vitrifiés<sup>23</sup> pour la fin 2010 sans donner le volume des déchets compactés. AREVA fournit, dans ses rapports sur le retraitement des combustibles étrangers, les volumes de déchets vitrifiés (CSD-V) et compactés (CSD-C) dans les ateliers R7, T7 et ACC des usines de La Hague, en précisant la part qui revient à la France.

16 - Les données publiées par EDF [EDF2013] (1 250 t/an) et déduites de celles du CEA [CEA2012a] (1 468 t/an) ne correspondent pas exactement avec celles de l'ANDRA [ANDRA2012] qui décrivent les tonnages entreposés pour chaque famille de combustible (fin 2010). Aussi nous avons été contraints d'évaluer au mieux les tonnages moyens réellement utilisés dans le parc nucléaire (1 200 t/an) afin d'être en cohérence avec le bilan de l'ANDRA : 17,3 t/an pour les 900 MWe (12,3 t/an d'UOx et 5 t/an de MOX), 25 t/an pour les 1300 MWe et 27,9 t/an pour les 1450 MWe.

17 - Cet uranium, qui présente les pollutions résiduelles en PF et actinides, est enrichi en Russie à une teneur de 4,1 %, au lieu de 3,7 % du fait de la présence d'isotopes neutrophages de l'uranium du retraitement. L'usage de l'URE nécessite l'emploi, dans les réacteurs, de 4 grappes de contrôle supplémentaires.

18 - Les 4 réacteurs de la centrale de Cruas (915 MWe) qui utilisent du combustible URE et les 2 réacteurs de Fessenheim (890 MWe) ne sont pas autorisés à utiliser du combustible MOX.

19 - Ce bilan ne prend pas en compte les 104 t de Superphénix et les combustibles métallique de la filière UNGG.

20 - Du fait de la forte teneur résiduelle en plutonium du MOX usé (6,66 % pour du MOX neuf à 8,65 %), le risque de criticité est élevé en phase aqueuse. Cette teneur se traduit par des procédures spécifiques, qui augmentent la durée des opérations. En outre, la forte activité alpha (8,1 fois supérieure à celle d'un Uox) de l'ensemble des actinides dénature rapidement le TBP utilisé pour séparer les produits de fission de l'uranium et du plutonium.

21 - L'OCDE chiffre le coût de la fabrication du MOX à 5 fois celui du combustible UOx [OCDE2005], page 218. Le quotidien Asahi, citant des sources japonaises, donne des coûts de combustible MOX, 6 à 7 fois supérieurs dans ses publications 2013.

22 - Cette appellation vise les radionucléides de demi-vie supérieure à 30 ans.

23 - Dont 2 111 m<sup>3</sup> de La Hague, 570 m<sup>3</sup> de Marcoule et 26 m<sup>3</sup> de combustible de la pile EL4 (Brennilis).

**Tableau 2 : Nombre de colis de déchets vitrifiés et compactés, réalisés à La Hague par AREVA  
(Volume des déchets en m<sup>3</sup>)**

Année	CSD-V	Part française	France (m <sup>3</sup> )	CSD-C	Part française	France (m <sup>3</sup> )
2007	9088	87,7%	7970 (1435)	6089	46,3%	2819 (507)
2008	9573	90,9%	8702 (1536)	7631	47,8%	3648 (657)
2009	10412	91,2%	9496 (1709)	9010	49,4%	4451 (801)
2010	10828	94,1%	10189 (1834)	10270	52,1%	5351 (963)
2011	11138	96,8%	10782 (1941)	11308	55,0%	6219 (1119)
2012	11665	97,8%	11408 (2053)	11941	57,4%	6854 (1234)

Sources : Rapports AREVA 2007 à 2012

Notas : Le volume unitaire des colis est de 0,18 m<sup>3</sup>

CSD-V = Colis standard de déchets vitrifiés, CSD-C = Colis standard de déchets compactés

Nous observons, pour l'année 2010, de petites différences entre le bilan ANDRA et AREVA (2707 m<sup>3</sup> en 2010 pour l'ANDRA et 1834 m<sup>3</sup> pour AREVA). Elles sont dues au fait que l'Andra prend en compte la totalité des volumes vitrifiés, incluant notamment 180 m<sup>3</sup> de CSD-V relatives à des solutions de produits de fission issues du retraitement des combustibles en uranium naturel (1966-85) contenant du molybdène (qui doivent être conditionnées<sup>24</sup> entre juin 2011 et 2017) alors que les bilans d'Areva ne portent que sur la vitrification réalisée des solutions provenant du retraitement des réacteurs à eau légère.

### 3. Périmètre des déchets et combustibles nucléaires dédiés à l'enfouissement profond

Nous allons examiner les différentes options, prévues par les organismes impliqués dans la production d'énergie électrique d'origine nucléaire, pour le retraitement des combustibles usés et la gestion des déchets radioactifs produits dans le cycle.

« De quoi va-t-on débattre ? »

• *Pour quels déchets, dans différentes hypothèses d'évolution du secteur énergétique ? »*

À cette première des neuf questions auxquelles la Commission Nationale du Débat Public entend répondre sur le projet Cigéo<sup>25</sup>, le dossier présenté par l'ANDRA ne présente qu'une seule hypothèse d'évolution du secteur énergétique en matière de production d'électricité d'origine nucléaire : fonctionnement uniforme du parc de réacteurs actuels durant cinquante ans et retraitement intégral de tous les combustibles usés.

La seule variante évoquée est une possibilité d'arrêt du retraitement à une date indéterminée, ce qui amène à une comparaison théorique biaisée des solutions retraitement/non-retraitement. En effet, la solution « non retraitement » étudiée, qui est présentée comme plus pénalisante au niveau espace occupé en solution de stockage en profondeur, intègre tous les combustibles produits, alors qu'environ la moitié des combustibles usés était déjà retraitée<sup>26</sup> en 2012.

Cette présentation univoque ne répond pas au principe recommandé par l'ASN dans son avis 2013-AV-0179 du 16 mai 2013, relatif au stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde :

« **Principes à retenir pour l'établissement de l'inventaire :**

*Toutefois, cet inventaire devrait prendre en compte l'ensemble des stratégies industrielles aujourd'hui envisagées par les producteurs, en particulier pour ce qui concerne la durée de fonctionnement des réacteurs et leur puissance ainsi que la gestion des combustibles usés du CEA, en intégrant les déchets résultant du traitement de ces combustibles et, s'il y a lieu, les combustibles qui ne seraient pas retraités. »*

Ce scénario ANDRA n'est pas enveloppe de l'évolution du secteur de production d'électricité. Un des quatre scénarios envisagé dans le débat national sur la transition énergétique, dit DEC (demande forte et décarbonation par l'électricité) prévoit en effet un doublement du parc nucléaire à l'horizon 2050 avec une croissance limitée des ENR et une stabilité des fossiles<sup>27</sup>.

Une autre « hypothèse » d'évolution du secteur énergétique a été proposée par l'actuel Président de la République, dans son discours d'introduction à la conférence de l'environnement du 14 septembre 2012 : « *La transition énergétique, c'est la sobriété, mais aussi la diversification des sources de production et d'approvisionnement. J'ai fixé*

24 - [ASN2012], Rapport ASN, Retraitement, chapitre XIII. Les installations du cycle du combustible nucléaire

25 - CNDP – Débat public Cigéo – Journal du débat, avril 2013, N° 1.

26 - Fin 2010, les usines de La Hague avaient retraité 26513 tonnes de combustibles à eau légère dont 16318 t pour EDF. À cette date, 13611 tonnes (LWR) étaient entreposées et 4932 tonnes chargées dans les réacteurs, soit un total de 18543 t. Fin 2012, les usines de La Hague ont retraité plus de 28500 tonnes de combustibles usés, dont 18240 t pour EDF (64 %) [AREVA2012].

27 - Débat national sur la transition énergétique. Rapport du GT2 – Mix et scénarios énergétiques / CNTDE, séance plénière du 23 mai 2013.

*le cap : la part du nucléaire dans la production d'électricité sera ramenée de 75 % à 50 % à l'horizon 2025, et cela en garantissant la sûreté maximale des installations et en poursuivant la modernisation de l'industrie nucléaire ».*

C'est cette évolution du secteur énergétique que nous proposons d'étudier avec ses deux options, retraitement limité aux besoins des réacteurs dédiés actuellement à l'utilisation du combustibles MOX (22 des réacteurs 900 MWe du parc électronucléaire), ou retraitement intégral de tous les types de combustibles.

Afin d'étudier les hypothèses qui permettent de ramener la *production électrique d'origine nucléaire de 75 % à 50 %* il nous faut définir la valeur de référence. Pour une capacité installée donnée, cette production est liée au « rendement » du parc, appelé « facteur de charge<sup>28</sup> », paramètre qui illustre le fonctionnement réel de l'outil de production. Or ce taux, calculé sur tout le parc EDF, varie d'une année sur l'autre (70,97 % en 2010, 75,27 % en 2011, 76,59 % en 2012). Ces variations observées sont importantes, aussi nous avons pris une référence stable : la « *puissance nette installée* ». En 2013, elle est égale à 63130 MWe et sera augmentée en 2017 de 1600 MWe avec la divergence de l'EPR de Flamanville, année où seraient déconnectés du réseau les 2 réacteurs de Fessenheim (2 x 880 MWe, âgés de 40 ans). C'est la réduction d'un tiers de cette puissance installée, par des mises à l'arrêt progressives de tranches nucléaires, que nous considérons dans cet article.

### **3.1 Les déchets prévus dans CIGEO, version ANDRA<sup>29</sup>**

*« Pour établir ces prévisions, il est pris comme hypothèse une poursuite de l'exploitation des installations actuelles avec une durée de fonctionnement de cinquante ans.*

*Cette hypothèse ne préjuge pas de la décision des autorités publiques d'autoriser ou non un allongement de la durée d'exploitation des réacteurs. Les déchets qui seront produits par les installations nucléaires en cours de construction sont également pris en compte (EPR de Flamanville, réacteur expérimental Jules Horowitz, installation de recherche ITER). »*

Avec un flux de retraitement retenu (1050 t d'UOX par an) et l'hypothèse de durée de vie uniforme de 50 ans pour les 59 réacteurs (mise à l'arrêt définitif entre 2027 et 2066), la quantité cumulée de combustibles REP déchargés serait alors voisine de 64000 t (58000 t d'UOX, 4000 t de MOX et 2150 t d'URE). [ANDRA2012, page 52].

Stockage en l'état de combustibles usés :

*« L'ANDRA continue, notamment en lien avec le CEA, à mener des études sur le stockage direct de combustibles usés conformément au plan national de gestion des matières et déchets radioactifs, qui lui demande de vérifier, par précaution, que les concepts de stockage retenus par CIGEO restent compatibles avec l'hypothèse de stockage direct si ceux-ci étaient un jour considérés comme des déchets. »*

### **3.2 Les déchets prévus dans CIGEO, version HCTISN**

*« Pour les déchets issus du fonctionnement du parc de centrales nucléaires actuel, l'inventaire de référence est construit sous l'hypothèse d'une durée de fonctionnement des réacteurs de 50 ans, et du recyclage complet in fine de tous leurs combustibles usés (y compris MOX et URE, qui ne sont pas encore recyclés à ce jour), hypothèse actuellement retenue par le gouvernement et les industriels. L'inventaire de référence comprend ainsi les résidus ultimes du recyclage (produits de fission et actinides mineurs) sous forme vitrifiée. Est exclu de l'inventaire de référence, le plutonium issu du traitement des combustibles usés, car il est pour partie recyclé dans le parc actuel, et pour partie destiné à une éventuelle utilisation dans un futur parc de réacteurs. »*

### **3.3 Le cycle du combustible jusqu'en 2017, version officielle présentée par les exploitants EDF, AREVA et ANDRA à l'ASN<sup>30</sup>**

L'ASN note que, pour la période 2007-2017, le niveau de production électrique d'origine nucléaire retenue est de 430 TWh par an et qu'il n'est pas prévu, durant cette période, de traiter des combustibles usés à base d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium (MOX) ou à base d'uranium issu du traitement de combustibles usés (URE).

Le principe qui sous-tendait le fonctionnement du cycle du combustible présenté dans le dossier « cycle 2000 » n'a pas été modifié dans le dossier « impact cycle 2007 ». Ce principe revient, pour l'oxyde de plutonium, à équilibrer le flux provenant du traitement des combustibles usés avec le flux recyclé dans le combustible à base d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium (MOX).

28 - Le facteur de charge Kp (équivalent anglais : Load Factor) est le rapport de l'énergie effectivement fournie, durant un intervalle de temps déterminé, au produit de la puissance nominale en régime continu, par cet intervalle de temps.

29 - ANDRA - Projet CIGEO - Centre industriel de stockage réversible profond de déchets radioactifs en Meuse / Haute-Marne. Dossier public du maître d'ouvrage, version du 14 janvier 2013, pages 15 et 16/102.

Haut Comité pour la Transparence et l'Information sur la Sûreté Nucléaire : HCTISN - Rapport préalable au débat public sur le projet de stockage géologique profond de déchets radioactifs, 28 mars 2013, pages 5 et 6/30.

30 - ASN - Lettre CODEP-DRC - 2011-005384 du 9 mai 2011, Cycle du combustible français.



Ce principe permet de limiter la quantité de plutonium présent sous forme séparée dans les installations et d'éviter une dégradation<sup>31</sup> excessive de celui-ci avant recyclage.

### 3.4 La position du gouvernement en matière de politique électronucléaire

Engagement N°41 du candidat François Hollande à la Présidence de la République :

« Je préserverai l'indépendance de la France tout en diversifiant nos sources d'énergie. J'engagerai la réduction de la part du nucléaire dans la production d'électricité de 75 % à 50 % à l'horizon 2025 ». François Hollande, élections présidentielle des 22 avril et 6 mai 2012.

Cet engagement a été réaffirmé par le Président de la République le 14 septembre 2012, et repris par le 1<sup>er</sup> Ministre et la Ministre de l'environnement

### 3.5 Périmètre des déchets nucléaires dédiés à l'enfouissement profond

Les déchets destinés à CIGEO font donc l'objet de deux définitions antagonistes :

- durée de vie des réacteurs du parc actuel portée à 50 ans et retraitement intégral de tous les combustibles selon les exploitants d'une part (reprise par le HCTISN), et
- réduction de la capacité du parc actuel à 50 % d'électricité d'origine nucléaire (au lieu d'environ<sup>32</sup> 75 % actuellement) à l'horizon 2025 selon le gouvernement, avec l'engagement des exploitants AREVA et EDF devant l'ASN, jusqu'en 2017, de ne pas produire plus de plutonium que n'en absorbe la filière MOX actuelle d'autre part.

Comme le plus ancien des réacteurs (Fessenheim 1) aura 50 ans d'âge en 2027, aucun réacteur ne pourrait donc être arrêté à l'horizon 2025, si la 1<sup>re</sup> règle venait à s'appliquer. Avec une durée de vie de 45 ans la réduction à 50 % ne pourra être atteinte qu'en 2028 et en 2033 pour 50 ans.

À ces choix, il faut ajouter la décision de l'ASN, de poursuivre ou non, *au cas par cas*<sup>33</sup>, l'exploitation des réacteurs qui font l'objet de réexamens décennaux. La poursuite de l'exploitation est toujours assortie de nouvelles prescriptions de sûreté qui conduisent à la réalisation de modifications et travaux significatifs. Ce prolongement de l'exploitation pour 10 ans nécessite pour l'exploitant une analyse « coût-avantages ».

Si EDF soutient le projet de prolonger l'espérance de vie des réacteurs à 50 ans, voire 60, le Président de l'ASN souligne toujours<sup>34</sup> que le design français des réacteurs a été fait pour 40 ans. « Les 40 ans arrivent rapidement. Comme tous les réacteurs ont été construits à marche forcée entre les années 1980 et 1990, il pourrait y avoir 5 à 6 réacteurs par an à retirer du réseau entre 2020 et 2030. Si telle devait être la situation, il faudra construire des moyens en plus, faire des économies d'énergie... il faut compter une dizaine d'années assez offensives. Donc le message est simple : il est urgent de prendre des décisions dès maintenant, en considérant que les réacteurs ne pourraient aller au-delà de 40 ans ».

## 4 Choix de la présente étude

Nous allons évaluer les impacts techniques de deux hypothèses :

1. Politique actuelle définie par le Président de la République et appliquée par son gouvernement : 50 % d'électricité d'origine nucléaire à l'horizon 2025.
2. Pas de plutonium en surcapacité (équilibre avec les besoins en combustible MOX) et non retraitement des combustibles URT et MOX suivant la politique industrielle retenue par EDF et AREVA jusqu'en 2017, avec l'accord de l'ASN.

## 5 Synthèse de données sur les colis matières EDF devant être stockés en site profond dans le projet CIGEO

Nous allons nous intéresser aux seuls déchets de haute activité, conditionnés dans des conteneurs standards de déchets, constitués par les produits qui présentent à la fois des risques de toxicité très élevée et font l'objet d'un important dégagement thermique : les combustibles stockés en l'état, les solutions vitrifiées (CSD-V) et les déchets de structure compactés (CSD-C) :

31 - Un retraitement précoce pollue le plutonium par de l'américium 241, produit par décroissance du plutonium 241 (période  $T = 14,35$  ans).

32 - 75,1 % en 2009, 74,1 % en 2010 et 77,7 % en 2011), [CEA2012], Mémento énergie du CEA, 2012.

33 - Le Président de l'ASN, P-F Chevet, a déclaré le 16 avril 2013 à l'Office parlementaire (OPECST) : « Il faut aussi prendre en compte le fait que les centrales nucléaires ont une durée de vie limitée, dont la prévision est difficile et qui ne sera pas nécessairement la même pour tous les réacteurs ».

34 - Pierre-Franck Chauvet, Président de l'ASN, l'Usine nouvelle, 4 octobre 2013.

- *Les combustibles usés* qui comportent trois familles : UOx, URT et MOX. Ce dernier type de combustible fera l'objet, par l'ANDRA, d'un conditionnement spécifique (1 élément combustible usé par colis au lieu de 4 pour l'UOx) et d'un enfouissement plus tardif (90 ans au lieu de 60 ans) car son dégagement thermique, après 60 ans de refroidissement, est 4,3 fois supérieur à celui des combustibles UOx.
- *Les solutions vitrifiées* issues du retraitement des combustibles usés à uranium naturel, dont la production a commencé à Marcoule dans les ateliers « PIVER » et « AVM » avec des colis différents de ceux adoptés à La Hague (respectivement 0,065 m<sup>3</sup>, 0,175 m<sup>3</sup> et 0,180 m<sup>3</sup>). La Hague doit également vitrifier des solutions issues du retraitement des combustibles de type « uranium naturel-molybdène » et conditionner les déchets de maintenance de la vitrification et ceux du démantèlement de l'installation « Elan IIB » dans des conteneurs standards CSD-V.

La Hague et Marcoule ont retraité des combustibles usés de pays étrangers. Les contrats antérieurs à la loi du 30 décembre 1991, concernant les combustibles de réacteurs à eau légère sans clause d'expédition de colis de déchets pour AREVA NC portent sur 512 tonnes retraitées à La Hague. Les combustibles UNGG du réacteur Vandellos (1 913 tonnes) ont également été retraités à Marcoule (88,1 %) et à La Hague [CEA2012c], dont 1 021 t sans clause de retour des déchets. Du combustible canadien de type « Candu » (14 tonnes) a également été retraité à La Hague et les déchets correspondants sont la propriété d'AREVA.

Par analogie, nous pouvons considérer que le solde positif des échanges d'électricité avec les pays frontaliers, qui représente entre 2000 et 2011 la production annuelle de 7 réacteurs d'EDF (17,2 % de la production électrique française d'origine nucléaire), est équivalent à un contrat, sans clause de retour des déchets (Voir Annexe 1). Cette exportation d'électricité représente 219 tonnes par an de combustibles usés.

- *Les déchets de structure* compactés, qui sont constitués de tronçons de gaines cisailées (les coques), des embouts (tête et pied) et des grilles qui ceinturent les assemblages.

### 5.1 Bilan matières fin 2010- 2012

Nous utilisons, pour bâtir ce bilan, les données publiées dans les rapports d'AREVA sur le traitement des combustibles usés en provenance de l'étranger [AREVA2012] et l'inventaire 2012 de l'ANDRA [ANDRA2012]

- Colis CSD-V issus du retraitement des combustibles de la filière UNGG  
*Marcoule* : (PIVER et AVM), 3 159 CSD-V totalisant 570 m<sup>3</sup>,  
*La Hague* : 1 028 CSD-V (209 m<sup>3</sup> non élaborés)
- Colis élaborés à La Hague ou combustibles LWR entreposés en piscines, à La Hague et à EDF, au 31 décembre 2011

**Tableau 3 : Tonnage de combustibles usés, colis de déchets vitrifiés et compactés et plutonium entreposés à La Hague**

Année	Combustibles usés à La Hague	Combustibles usés à EDF	CSD-V Nombre (m <sup>3</sup> )	CSD-C Nombre (m <sup>3</sup> )	Plutonium tonnes
2010	9539 (900)	4081 (387)	10189 (1834)	5351 (963)	60,0 (37,7)
2011	9709 (1040)	4081 (387)	10782 (1941)	6219 (1103)	57,0 (36,2)
2012	9790 (1140)	4081 (387)	11408 (2053)	6854 (1234)	56,0 (37,8)

Sources : [AREVA2010], [AREVA2011], [AREVA2012]

Notas :

1. Le tonnage de combustible MOX figure entre parenthèses. Les chiffres en italiques sont des évaluations. Le tonnage de MOX usé n'augmente pas (ou peu) dans les piscines d'EDF.
2. Aux tonnages de l'ensemble des combustibles usés, entreposés dans les piscines d'EDF, s'ajoute les 4 932 tonnes chargées dans les réacteurs (dont 299 t de MOX).
3. Les colis standards vitrifiés ou compactés à La Hague ont un volume de 0,18 m<sup>3</sup>.
4. Le tonnage de plutonium entre parenthèses concerne le plutonium français. Le plutonium total, présent en France, était égal à 70 t fin 2010 (60 t à La Hague, 8 t de MOX finis ou en cours de fabrication, 2 t dans les installations du CEA) [ANDRA2012]

### 5.2 Bilan matières prospectif

Scénario « 50 % d'électricité d'origine nucléaire en 2025 »

Un bilan des matières en 2030, peut être construit à partir des éléments d'orientation connus en 2013, sur la base d'une réduction progressive du parc des réacteurs 900 MWe chargés en MOX, et sur un critère de 40 ans de

fonctionnement, en concordance avec la politique définie par le quinquennat actuel : 50 % d'électricité d'origine nucléaire à l'horizon 2025.

L'annexe 2 fournit la liste des réacteurs 900 MWe concernés, leurs dates d'arrêt à 40 ans d'âge et la réduction nette cumulée de puissance qui en résulterait.

#### Version 1 :

*Non retraitement des combustibles MOX et URE (politique EDF-AREVA NC 2007-2017).*

Pas de PuO<sub>2</sub> supplémentaire « sur l'étagère », ce qui conduit à un retraitement limité à 1 050 t/an à partir de 2013 pour le besoin des 22 réacteurs chargés en MOX.

De 1976 à 2010, les usines de La Hague ont retraité un total de 26 513 t de combustibles UOX et MOX usés. Parmi ceux-ci, 9 683 t concernent des combustibles étrangers pour lesquels une clause de retour des déchets de haute activité (déchets vitrifiés et compactés) s'applique. Il en résulte que les déchets produits par les 16 830 tonnes restantes, fin 2010, seront stockés en France.

#### Version 2 :

*Retraitement intégral des combustibles UO<sub>2</sub>, URE et MOX*

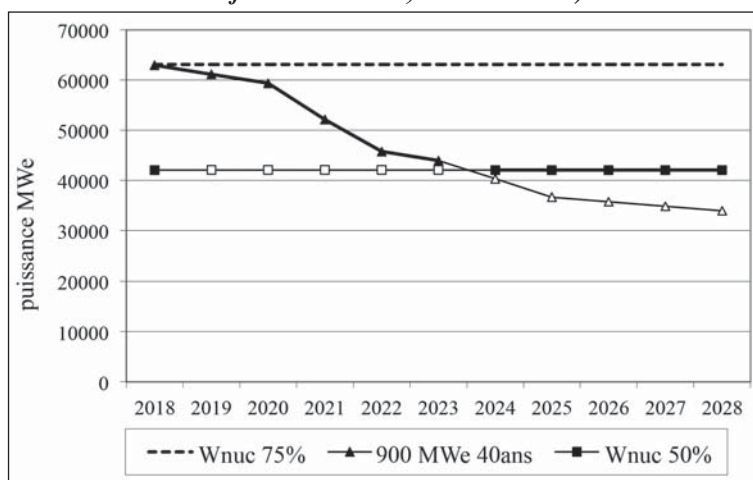
L'objectif de 50 % d'électricité d'origine nucléaire (EON), avec arrêt des réacteurs 900 MWe à 40 ans de fonctionnement est atteint en 2023 avec l'arrêt du 23<sup>e</sup> réacteur (Annexe 2). Après la mise en service de l'EPR prévue pour 2017, la puissance installée qui sera alors égale à 64 730 MWe installés (75 % d'EON) serait ramenée à 42 086 MWe (50 % d'EON).

#### Version 3 :

Durée moyenne de fonctionnement des réacteurs 50 ans

Solution retenue par les exploitants, l'ANDRA et le HCTSIN, avec retraitement intégral des combustibles.

**Figure 1 : Évolution de la puissance électrique d'origine nucléaire (Arrêt des réacteurs du parc de 900 MWe à 40 ans de fonctionnement, versions 1 et 2)**



### 5.3 Répercussions sur le cycle du combustible consécutives aux arrêts de réacteurs

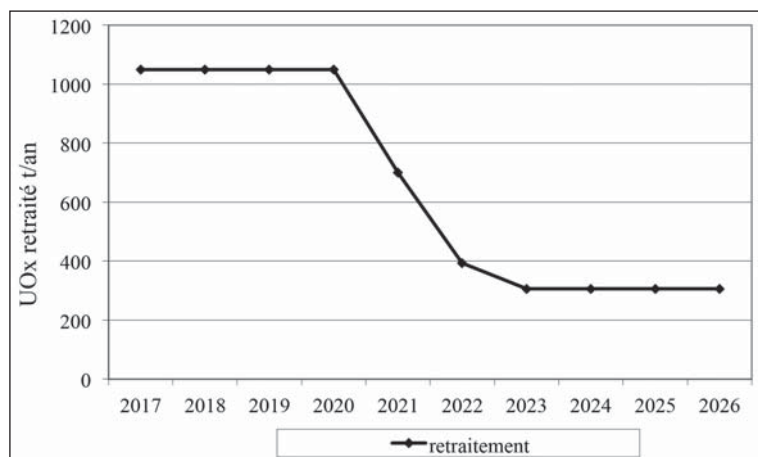
Le fait d'appliquer la double règle d'une durée de vie de 40 ans pour les réacteurs et la limitation du stock de plutonium aux besoins en combustibles MOX, conduit à réduire assez rapidement et de manière importante :

- la fabrication du combustible MOX au fur et à mesure de l'arrêt des réacteurs qui en sont équipés,
- le tonnage de combustibles UOX usés retraité.

Comme huit réacteurs fonctionnant avec du combustible MOX seront arrêtés en 2020 et sept autres en 2021, les besoins en combustibles passeront de 120 tonnes à 35 tonnes. Fin 2022, il restera sept réacteurs 900 MWe fonctionnant avec du MOX. Du fait de cette réduction des besoins en plutonium, le tonnage retraité chutera de manière drastique entre 2019 et 2022. Il passera de 1 050 à 306 tonnes.

Notons que le maintien de la règle d'une durée de vie de 40 ans après 2023, concernera au-delà des réacteurs de 900 MWe, les premiers réacteurs de 1300 MWe.

Figure 2 : Évolution du retraitement en fonction de l'arrêt des réacteurs 900 MWe fonctionnant avec du combustible MOX



#### 5.4 Calculs des masses de combustibles et des volumes de déchets

Nous allons calculer les masses de combustibles, retraité ou non, dans le cas du retraitement adapté aux besoins de réacteurs fonctionnant avec du combustible MOX, puis dans le cas du retraitement intégral. Nous calculons pour cela les flux annuels de combustibles (tonnages déchargés des trois types de combustibles, tonnages retraités et plutonium extrait). Les bilans considérés concernent la fin 2030 et le bilan du cycle actuel (75 % d'EON) avec retraitement intégral de tous les combustibles, au même horizon fin 2030, afin de les comparer aux bilans et prospectives publiés par l'ANDRA dans son inventaire de 2012 [ANDRA2012].

Tableau 4 : Flux des tonnages de combustibles déchargés des réacteurs 900 MWe et entrant dans les piscines de La Hague

Combustibles usés	Tonnage 2010	Tonnage de 2011 à 2017	Tonnage de 2018-2023	Tonnage de 2024-2030	Cœurs déchargés (tonnes)	Bilan 2030 (tonnes)
MOX	1287	840	520	245	240	3132
URE	318	484	415	484	0	1702
UOX	12006	-60	621	2956	720	16243
UOX retraité	<b>16830</b>	7350	4550	2144	-	30874

Nota : Le tonnage négatif correspond à des prélèvements sur le stock en piscines de la Hague si EDF décharge moins de 1050 t/an en combustible UOX de ses réacteurs, correspondant au tonnage retraité en moyenne dans les usines de La Hague.

Tableau 5 : Bilan fin 2030 des combustibles LWR usés retraités ou laissés en l'état et des produits du retraitement

	Poursuite du retraitement actuel 1050 t/an UO <sub>2</sub>			Retraitement total UO <sub>2</sub> + URE + MOX	
	UO <sub>2</sub> retraité	UO <sub>2</sub> +URE non retraité	MOX Non retraité	UO <sub>2</sub> + URE	MOX
Tonnage 2030	30874t	17945t (16243+1702)	3132t	48819t (47117+1702)	3132t
CSD-V	23156			36614	16443
CSD-C	40137			63465	4072
CU 4 éléments		8973			
CU 1 élément			6424		
Reliquat Pu	37,8t			179,5t	208,6t
URT	29022t			45890t	2767t
U appauvri	454000t				

Nota : Les nombres de colis sont calculés dans l'hypothèse où une tonne de combustible retraitée produit 0,75 colis CSD-V et 1,3 colis CSD-C. Le nombre de CSD-V produits par tonne de MOX retraité (5,25) est supérieur à celui des combustibles UOX du fait de la teneur élevée en émetteurs alpha. Calcul de l'URT : 94 % pour l'UOX et l'URE, 88,34 % pour le MOX (PF 5 % et Pu résiduel 6,66 %)

Notons que le retraitement « intégral », qui double les besoins en surface d'entreposage de l'URT, posera des problèmes dans la mesure où les sites de Bessines et de Limoges sont aujourd'hui proches de la saturation.

#### 5.4.1 Bilan du cycle en 2030

##### Bilan plutonium

Reliquat 2012 : 37,8 t

Retraitement total UO<sub>2</sub> + URT : 179,5 t (1 % 17945 t)

Retraitement MOX : 208,6 t (6,66 % de 3 132 t)

Le retraitement total conduit à la production d'un stock de plutonium égal à 426 t tonnes.

Ce tonnage est considérable et il n'est pas évident que des réacteurs du futur, qui restent à construire, puissent l'épuiser. Comme dans le monde nucléaire, ce matériau est « tabou », aucune étude connue n'envisage de considérer qu'une fraction plus ou moins grande de ce stock devra être considérée comme un déchet et conditionnée de manière sûre vis-à-vis du risque de toxicité potentielle et de prolifération qu'il présente.

##### Calcul du nombre d'alvéoles occupées

Nous utilisons les caractéristiques des alvéoles fournies par l'Andra pour les quatre types de déchets :

- Alvéole « déchets vitrifiés » CSD-V, 8 colis/alvéole, pas moyen 10 m

Surface occupée, par alvéole : 400 m<sup>2</sup> (40 x 10)

- Alvéole « déchets compactés » CSD-C, 10 368 colis/alvéole, pas moyen 30 m

Surface occupée par alvéole : 8 100 m<sup>2</sup> (270 x 30)

- Alvéole « combustibles usés » CU4 (4 assemblages UOx ou URE) et CU1 (1 assemblage MOX), 4 colis/alvéole, pas moyen 20 m. Surface occupée, par alvéole : 880 m<sup>2</sup> (44 x 20)

#### Version 1, retraitement actuel

**Tableau 6 : Surface occupée en 2030 dans le cas du retraitement partiel actuel et d'une exploitation des réacteurs de 40 ans**

Type de colis	nombre de colis	nombre d'alvéoles	surface occupée (m <sup>2</sup> )
CSD-V	23156	2895	1158000
CSD-C	40137	4	32400
CU 4 éléments	8973	2244	1974720
CU 1 élément	6264	1566	1378080
<b>Total</b>			<b>4543200</b>

La surface relative aux combustibles usés et aux déchets de haute activité produits par le retraitement porte sur 4,54 km<sup>2</sup>. La surface attribuable au stockage des combustibles usés est largement majoritaire (73,8 %). Le tonnage de plutonium est égal à 37,8 t.

#### Version 2, retraitement intégral

**Tableau 7 : Surface occupée en 2030 dans le cas du retraitement intégral et d'une exploitation des réacteurs de 40 ans**

Type de colis	nombre de colis	nombre d'alvéoles	surface occupée (m <sup>2</sup> )
CSD-V	53057	6633	2653200
CSD-C	67525	7	56700
<b>Total</b>			<b>2709900</b>

Dans l'hypothèse du retraitement total, la surface se réduit à 2,71 km<sup>2</sup> (-40,4 %) mais ce choix est associée une très forte augmentation du tonnage de plutonium qui passe de 37,8 à 426 tonnes. Quel sera l'usage de ces centaines de tonnes de plutonium si les réacteurs du futur ne voient pas le jour ?

Le stock d'uranium de retraitement, passant quant à lui de 29 022 t à 48 657 t (+ 67,7 %).

#### 5.4.2 Le bilan de l'ANDRA pour une durée d'exploitation des réacteurs de 40 ans

Dans son évaluation pour une durée d'exploitation des réacteurs de 40 ans, l'ANDRA évalue la quantité cumulée de combustibles REP déchargés à 52 000 t : 48 000 t d'UOX, 2 800 t de MOX et 1 400 t d'URE Dans l'hypothèse de l'arrêt du retraitement avec le déchargement des derniers 900 MWe, équipés en MOX, atteint par la limite (2018-19), il aura été retraité environ 24 000 t d'UOX [ANDRA2012] (page 54).

Nos évaluations ne diffèrent que de quelques % de celles de l'ANDRA : 51 951 t déchargées (-0,01 %) dont 47 117 t d'UOx (-1,8 %), 3 132 t de MOX (+11,8 %), 1 702 t d'URE (21,4 %). Cependant, pour arrêter tous les 900 MWe équipés de MOX en 2019 (et non 17 réacteurs/24 en 2022), l'ANDRA doit compter l'âge des réacteurs à partir du « début de la construction » et non de la « 1<sup>re</sup> divergence ».

### Version 3, durée moyenne de fonctionnement des réacteurs de 50 ans, avec poursuite de la politique actuelle de retraitement de 1 050 t/an d'UOx

Dans ce cas, l'horizon 2025 est atteint avant d'avoir arrêté le 1<sup>er</sup> réacteur de 900 MWe, comme le montre l'annexe 2. Le réacteur le plus ancien n'aura 50 ans d'activité qu'en 2027. La réduction à 50 % de l'énergie électrique ne pourrait alors s'opérer qu'au moyen de la fermeture simultanée de 22 réacteurs de 900 MWe. Le bilan donnera donc plus de combustibles UOX retraités et un tonnage plus important de MOX usés. La poursuite de l'exploitation des réacteurs jusqu'à 50 ans repoussera à fin 2032 la réduction à 50 % de la production électrique d'origine nucléaire.

**Tableau 8 : Bilan des combustibles cumulés en 2030, dans le cas du retraitement intégral et d'une exploitation des réacteurs de 50 ans**

	2010	2011- 2016	2017-2030	2030
MOX	1287	720	1680	3687
URE	318	415,2	968,8	1702
UOX	12006	-236,4	-120,4	11649
UOX retraité	16830	6300	14700	37830
Plutonium non utilisé	37,8			416,5 <sup>a)</sup>

a) 37,8 t reliquat 2010 + 116,5 t (1 % des 11 649 t UO<sub>2</sub>) + 16,6 t (1 % des 1 662 t URE) + 245,6 t (6,66 % des 3 687 t MOX) = 416,5 t.

Nota : Les valeurs négatives correspondent au tonnage prélevé dans le stock des combustibles entreposés à La Hague, lorsque le tonnage déchargé ne suffit pas aux besoins du retraitement. Le tonnage de plutonium est calculé avec 1 % pour l'UOX et l'URT, 6,66 % pour le MOX.

**Tableau 9 : Bilan des colis cumulés en 2030, dans le cas du retraitement intégral et d'une exploitation des réacteurs de 50 ans**

	UOX+ URE	MOX	Total
Tonnage 2030	51181	3687	54868
CSD-V	38386	19357	57743
CSD-C	66534	4793	71327

**Tableau 10 : Bilan des colis cumulés en 2030, dans le cas du retraitement intégral et d'une exploitation des réacteurs de 50 ans**

Type de colis	nombre de colis	nombre d'alvéoles	surface occupée (m <sup>2</sup> )
CSD-V	57743	7218	2887200
CSD-C	71327	7	56700
<b>Total</b>			<b>2942900</b>

(+ 416,5 t de plutonium)

**Tableau 11 : Bilan des 3 versions à 2030, pour une exploitation des réacteurs de 40 ou 50 ans**

	50% d'électricité d'origine nucléaire		75% d'EON et retraitement intégral	Lieu de stockage
	Retraitement adapté	Retraitement intégral (UO <sub>2</sub> + URE + MOX)		
CSD-V	23156	53057	57713	CIGEO Bure
CSD-C	40137	67525	71276	
CU 4 éléments	8973			
CU 1 élément	6264			
Aire stockage	4,54km <sup>2</sup>	2,71km <sup>2</sup>	2,94km <sup>2</sup>	
Reliquat Pu	37,8t	425,9t	416,5t	La Hague
Tonnage retraité	30874t	51951t	54828t	La Hague
URT	29680t	51033t	51330t	Tricastin et Bessines
U appauvri	454000t			

### 5.4.3 Bilan à 50 ans selon l'Andra

L'hypothèse de durée de vie uniforme de 50 ans pour les 59 réacteurs conduirait à les mettre à l'arrêt définitif entre 2027 et 2066. Fin 2030, la quantité cumulée de combustibles REP déchargés serait alors voisine de 64 000 t (58 000 t d'UOX, 4 000 t de MOX et 2 150 t d'URE) et le tonnage retraité aura concerné 34 000 t d'UOX, vers 2028-29. Le flux de traitement retenu par l'ANDRA (1 000 t/an d'UOX) permet d'équilibrer le flux de recyclage du plutonium tant que les 22 réacteurs 900 MWe équipés de MOX du parc actuel sont en fonctionnement.

Nos évaluations des tonnages retraités sont inférieures d'une quinzaine de % à celles de l'ANDRA: 54 868 t déchargées (-14,3 %) dont 49 479 t d'UOX (14,7 %), 3 687 t de MOX (7,8 %), 1 702 t d'URE (20,8 %).

## 6. Conclusions

Le fonctionnement passé, présent et à venir, des réacteurs nucléaires, produit des combustibles « usés » qui sont, soit laissés en l'état, soit retraités en vue d'en extraire le plutonium. Plusieurs stratégies ont été envisagées pour gérer ces combustibles usés ou les déchets de très haute activité (THA) qui résultent de leur retraitement (produits de fission, actinides mineurs et déchets de structure).

Nous avons évalué les tonnages de combustibles laissés en l'état, les volumes de déchets THA qui résulteraient du combustible retraité, et les espaces souterrains couverts, dans l'hypothèse d'un stockage géologique, dans une formation géologique profonde, peu perméable à l'eau, après une longue période de refroidissement dans des installations nucléaires en surface.

Les quantités produites dépendent de la durée d'exploitation des réacteurs nucléaires,

Les travaux effectués sur la transmutation, stratégie visant à réduire l'activité des radionucléides qui présentent la toxicité la plus élevée, montrent que cette voie, inopérante pour les produits de fission de longues périodes, est possible, pour une partie des actinides mineurs principaux (américium et curium). Cependant, les faibles rendements de transmutation rendent cette option longue et coûteuse, ce qui rend peu probable son développement industriel dans un futur proche.

Dans la double hypothèse d'une réduction à 50 % de l'énergie électrique d'origine nucléaire et d'une durée d'exploitation des réacteurs fixée à 40 ans, nous observons que la réduction, annoncée par le Président de la République, est obtenue fin 2022 après l'arrêt du 23<sup>e</sup> réacteur de 900 MWe. Comme 17 des 23 réacteurs arrêtés fonctionnent avec des combustibles MOX, il en résultera un impact significatif en aval et amont du cycle du combustible (réduction de la masse de combustible retraitée et de la fabrication des combustibles MOX).

Nous avons évalué l'importance des déchets de très haute activité (THA) issus du retraitement ou des combustibles usés laissés en l'état, suivant diverses stratégies avec pour paramètres l'espérance de vie des réacteurs et la réduction de l'énergie électrique d'origine nucléaire atteinte en 2025, à l'horizon 2030.

Le retraitement intégral des combustibles usés conduit à utiliser des surfaces de stockage géologique inférieures à celles nécessaires au retraitement adapté aux seuls besoins de la production de combustible MOX, car le stockage des combustibles usés obère plus de surfaces. Cependant, le retraitement intégral, pour une durée d'exploitation des réacteurs de 40 ou de 50 ans, produit un tonnage de plutonium supérieur à 400 tonnes. Les surfaces occupées par ces déchets THA, dans un site en profondeur géologique, varient entre 2,7 et 4,5 km<sup>2</sup>, les besoins en aires de stockages de l'uranium de retraitement (URT) passant d'un stock de 29 680 t à plus de 51 000 t en 2030 (+ 72 %), alors que les aires actuelles sont proches de la saturation en 2013.

## 7. Bibliographie

- [ANDRA2012], ANDRA, Inventaire national des matières et déchets radioactifs, Rapport de synthèse, 212 pages, 2012.
- [AREVA2008], AREVA, Traitement des combustibles usés provenant de l'étranger, juin 2009.
- [AREVA2009], AREVA, Traitement des combustibles usés provenant de l'étranger, juin 2010.
- [AREVA2010], AREVA, Traitement des combustibles usés provenant de l'étranger, juin 2011.
- [AREVA2011], AREVA, Traitement des combustibles usés provenant de l'étranger, juin 2012.
- [AREVA2012], AREVA, Traitement des combustibles usés provenant de l'étranger, juin 2013.
- [CEA2012a] CEA, Mémento Énergie, 2012
- [CEA2012b] CEA, Direction de l'énergie nucléaire, Séparation-transmutation des éléments radioactifs à vie longue, Centre de Saclay, (88 pages), décembre 2012.

- [CEA2012c] CEA, Informations relatives aux opérations portant sur des combustibles usés ou des déchets radioactifs en provenance de l'étranger, juin 2012.
- [EDF2013] EDF, La gestion des combustibles usés des centrales nucléaires d'EDF, 2013. [http://energie.edf.com/fichiers/fckeditor/Commun/En\\_Direct\\_Centrales/Nucleaire/General/Publications/NOTE%20COMBUSTIBLE%20USE%202013.pdf](http://energie.edf.com/fichiers/fckeditor/Commun/En_Direct_Centrales/Nucleaire/General/Publications/NOTE%20COMBUSTIBLE%20USE%202013.pdf)
- [GUILLEMETTE2013], Guillemette A, Zerbib JC, Les combustibles MOX d'EDF, production et stockages, bilans 2011, Global Chance, N° 33, pp (66-85), mars 2013.
- [LOUET2011], C.A Louet, Bilan 2009 et 2019 des flux et stocks de matière, Ministère de l'écologie, Direction générale de l'énergie et du climat, 15 septembre 2009.
- [OCDE2005], Coûts prévisionnels de production de l'électricité, page 218, Mise à jour 2005, Éditions de l'OCDE.

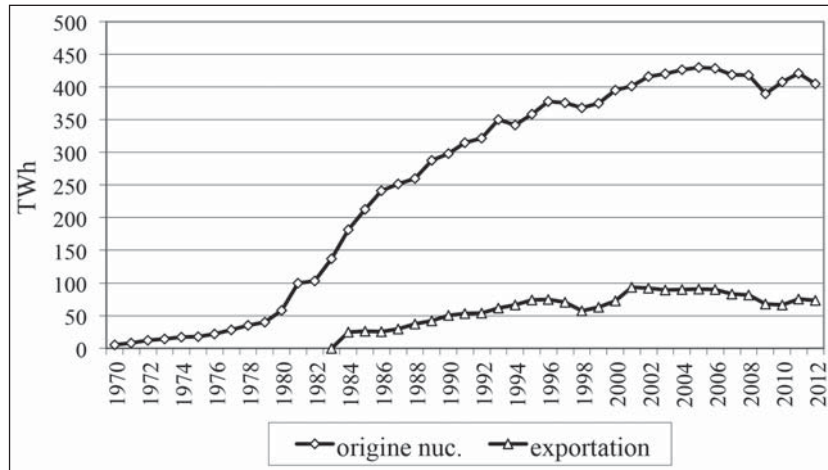


## Annexe 1

### Focus sur la production française d'électricité d'origine nucléaire

Depuis 1982 le solde des échanges d'électricité avec les pays frontaliers est positif. Dès 1991, cette surproduction d'électricité d'origine nucléaire devient supérieure à 50 TWh, production moyenne annuelle de 7 réacteurs (7,09 TWh/an ont été produits en moyenne par réacteur EDF durant la période 2008-11).

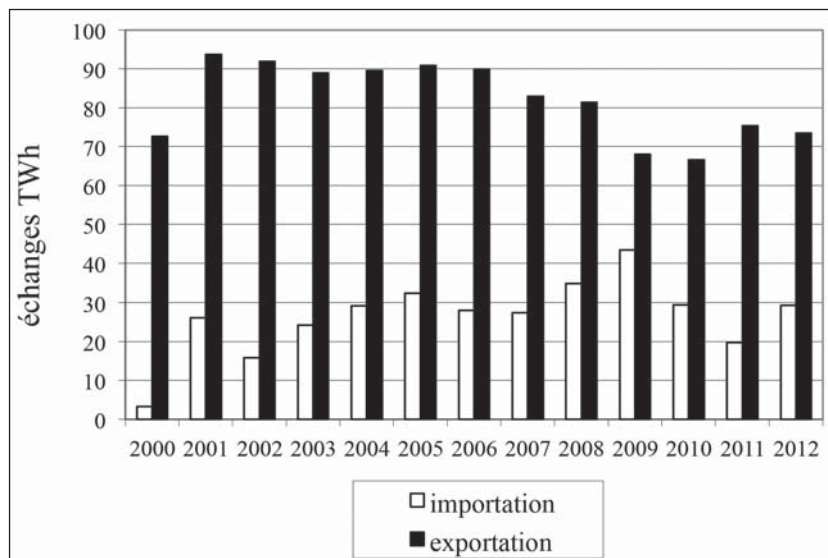
**Figure 3 : Historique de la production d'électricité nucléaire et du solde des exportations d'électricité**



Sources : Publications ELECNUC CEA et bilans annuels RTE.

De 2000 à 2012, les bilans d'échange d'électricité, publiés par RTE, montrent une constante d'exportation d'électricité supérieure à 70 TWh<sup>1</sup>, correspondant à la production moyenne de 10 réacteurs, soit 17,2 % de la production électrique d'origine nucléaire d'EDF.

**Figure 4 : Bilan français des échanges d'électricité pour 2000 -2012,**



Le fait que 10 réacteurs sur 58 fonctionnent pour la seule exportation d'électricité correspond aussi à la production de 17,2 % de déchets nucléaires (soit 219 t/an) supplémentaires à gérer par l'ANDRA (au nom des contribuables français... et pour les générations futures).

<sup>1</sup> - En base (voir « Bilan des échanges d'électricité 2000-2012 »), l'exportation d'électricité (et non le solde des échanges) a toujours oscillé entre 70 et 90 TWh/an, situation observable depuis le début des années 1990.

## Annexe 2

### Classement des réacteurs PWR de 900 MWe

Unité	Puissance nette	Puissance brute	Début de construction	Première divergence	Année des 40 ans	Année des 50 ans	1 <sup>re</sup> charge en MOX
Fessenheim-1	880	920	1971-9	1977-03	2017-03	2027-03	Non autorisé
Fessenheim-2	880	920	1972-2	1977-06	2017-06	2027-06	Non autorisé
Bugey-2	910	945	1972-11	1978-04	2018-04	2028-04	Non autorisé
Bugey-3	910	945	1973-9	1978-08	2018-08	2028-08	Non autorisé
Bugey-4	880	917	1974-6	1979-02	2019-02	2029-02	Non autorisé
Bugey-5	880	917	1974-7	1979-07	2019-07	2029-07	Non autorisé
Dampierre-1	890	937	1975-2	1980-03	2020-03	2030-03	1990
Gravelines-1	910	951	1975-2	1980-02	2020-02	2030-02	1997
Tricastin-1	915	955	1974-11	1980-02	2020-02	2030-02	1997
Tricastin-2	915	955	1974-12	1980-07	2020-07	2030-07	1996
Gravelines-2	910	951	1975-3	1980-08	2020-08	2030-08	1998
Gravelines-3	910	951	1975-12	1980-11	2020-11	2030-11	1989
Tricastin-3	915	955	1975-4	1980-11	2020-11	2030-11	1996
Dampierre-2	890	937	1975-4	1980-12	2020-12	2030-12	1993
St Laurent B1	915	956	1976-5	1981-01	2021-01	2031-01	1987
Dampierre-3	890	937	1975-9	1981-01	2021-01	2031-01	1998
Blayais-1	910	951	1977-1	1981-05	2021-05	2031-05	1997
Gravelines-4	910	951	1976-4	1981-05	2021-05	2031-05	1989
St Laurent B2	915	956	1976-7	1981-05	2021-05	2031-05	1988
Tricastin-4	915	955	1975-5	1981-05	2021-05	2031-05	1997
Dampierre-4	890	937	1975-12	1981-08	2021-08	2031-08	1998
Blayais-2	910	951	1977-1	1982-06	2022-06	2032-06	1994
Chinon-B-1	905	954	1977-3	1982-10	2022-10	2032-10	2000
Cruas-1	915	956	1978-8	1983-04	2023-04	2033-04	Non autorisé
Blayais-4	910	951	1978-4	1983-05	2023-05	2033-05	2013
Blayais-3	910	951	1978-4	1983-07	2023-07	2033-07	2013
Chinon-B-2	905	954	1977-3	1983-09	2023-09	2033-09	1999
Cruas-3	915	956	1979-4	1984-04	2024-04	2034-04	Non autorisé
Gravelines-5	910	951	1979-10	1984-08	2024-08	2034-08	2008
Cruas-2	915	956	1978-11	1984-08	2024-08	2034-08	Non autorisé
Cruas-4	915	956	1979-10	1984-10	2024-10	2034-10	Non autorisé
Gravelines-6	910	951	1979-10	1985-07	2025-07	2035-07	2008
Chinon-B-3	905	954	1980-10	1986-09	2026-09	2036-09	1999
Chinon-B-4	905	954	1981-2	1987-10	2027-10	2037-10	1998

Sources : CEA, OPECST, EDF, ASN et Légifrance

Séquences d'arrêts : 2 réacteurs en 2017, 2 en 2018, 2 en 2019, 8 en 2020, 7 en 2021, 2 en 2022. En 2017, date d'arrêt du premier réacteur, le réacteur EPR de Flamanville devrait entrer en fonction dans le réseau EDF.

Réduction cumulée de la puissance nette : 1,76 GW en 2017, 3,58 GW en 2018, 5,34 GW en 2019, 12,595 GW en 2020, 18,94 GW en 2021 et 20,755 GW en 2022.

La réduction de 25 % de la puissance nette installée est atteinte en 2023, après l'arrêt du 23<sup>e</sup> réacteur de 900 MW (Chinon B1).

### Annexe 3

## Tonnages de combustibles retraités dans les usines de La Hague

(Tonnes de métal lourd initial)

Année	UP2-400	UP2-800	UP3	EDF	Total
1976	14,62				14,62
1977	18,02				18,02
1978	38,22				38,22
1979	79,40				79,40
1980	104,86				104,86
1981	101,29				101,29
1982	153,55			11,5	153,55
1983	221,25			0	221,25
1984	255,06			0	255,06
1985	351,38			0	351,38
1986	332,77			0	332,77
1987	424,91			0	424,91
1988	345,64			150	345,64
1989	430,27		30,33*	375	460,60
1990	331,05		124,57+70,08*	300	525,70
1991	311,12		351,42	300	662,54
1992	224,64		448,24	224	672,88
1993	353,83		601,42	320	955,25
1994	317,29	258,58	700,43	651	1276,29
1995	0	758,08	800,56	758,08	1558,64
1996	12,42	849,61	818,86	849,61	1668,47
1997	0	849,62	820,29	849,62	1669,91
1998	27,12 + 4,92 MOX	779,61	821,87	779,61	1633,53
1999		848,64	712,86	848,64	1561,52
2000		810,33	387,17	810,33	1197,50
2001		733,46	217,15	733,46	950,61
2002		550,65	509,91	?	1060,56
2003		707,33	407,86	?	1115,20
2004		449,58 +10,64 MOX	640,67	?	1100,89
2005		683,48	429,22	?	1112,70
2006		300,58 +16,49 MOX	698,12	?	1015,19
2007		425,04 +31,34 MOX	490,20	?	946,58
2008		293,63 + 5,13 MOX	638,48 + 0,082 RTR	?	937,31
2009		242,53	686,44	928,97	928,97
2010		X ?	Y ?	1 048,92	1 048,92
<b>Total</b>	<b>4453,62</b>	<b>9604,35 + X</b>	<b>11406,34 + Y</b>	<b>16318</b>	<b>26513,24</b>

Notas : \* = tonnage de combustible dissous dans UP2-800 et transféré dans UP3 via un "tuyau" reliant les deux usines. Tous les tonnages sont, par convention, relatif au poids du métal lourd initial (U-Pu).

Sources : Données Cogéma et AREVA fournies au GRNC (Groupe Radio-écologie Nord-Cotentin).

De 1976 à 2010, les usines de La Hague ont retraité 26 513 tonnes de combustibles LWR, dont 68,5294 t de combustible MOX et 0,1895 t de combustibles de réacteur de recherche à haut taux de combustion (285 à 309 GW). Les 68,53 t de combustible MOX étranger ont été retraitées dans UP2-400 et UP2-800 (92,8 %) entre 1998 et 2008.

Le tonnage LWR et BWR retraité est donc égal à 26 444 tonnes. Seuls les déchets vitrifiés et compactés produits par le retraitement de 9 683 t de combustibles étrangers seront renvoyés aux clients par Areva. La première série de contrats passés avec des clients étrangers, qui portait sur 512 t, n'est pas soumise à ce retour. Le stockage définitif concernera donc les déchets produits par 16 830 tonnes de combustibles usés dont 16 318 t concernent EDF.