



EDF



SOLVAY



Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs

2016 – 2018

Procédés de valorisation de matières radioactives de propriété
CEA, EDF, New AREVA et SOLVAY

Sommaire

1	INTRODUCTION	4
1.1	Définitions.....	4
1.2	Objet de la note	4
1.3	Matières radioactives examinées.....	4
2	VALORISATION DES COMBUSTIBLES USES ET REBUTS MOX.....	5
2.1	Procédés de valorisation.....	5
2.1.1	Combustibles des réacteurs électrogènes à l'uranium.....	6
2.1.1.1	Recyclage des combustibles UOX usés.....	6
2.1.1.2	Recyclage des combustibles URE usés	7
2.1.2	Recyclage des combustibles MOX usés.....	7
2.1.3	Autres combustibles usés.....	8
2.1.3.1	Recyclage des combustibles de recherche	8
2.1.3.2	Recyclage des combustibles de la propulsion navale.....	10
2.2	Analyse de l'adéquation entre perspectives de valorisation et quantités détenues et à détenir .	10
2.2.1	Quantités détenues et à détenir.....	10
2.2.2	Perspectives de valorisation.....	11
2.2.2.1	Perspectives de valorisation des combustibles usés d'EDF	11
2.2.2.2	Perspectives de valorisation des combustibles usés du CEA.....	11
2.2.2.3	Perspectives de valorisation des rebuts de combustible MOX non irradié.....	12
3	VALORISATION DE L'URANIUM NATUREL ET ENRICHI.....	13
3.1	Utilisation de l'uranium naturel et enrichi.....	13
3.2	Analyse de l'adéquation entre perspectives de valorisation et quantités détenues et à détenir .	13
4	VALORISATION DE L'URANIUM APPAUVRI	14
4.1	Procédés de valorisation.....	15
4.2	Analyse de l'adéquation entre perspectives de valorisation et quantités détenues et à détenir .	15
4.2.1	Quantités détenues et à détenir.....	15
4.2.2	Perspectives de valorisation.....	15
4.2.2.1	Valorisation sous forme de combustible MOX	15
4.2.2.2	Production d'uranium naturel par ré-enrichissement.....	15
4.2.2.3	Valorisation dans les réacteurs de génération IV.....	25
4.2.2.4	Autres perspectives de valorisation	27
4.3	Conclusion.....	30

5	VALORISATION DE L'URANIUM DE RETRAITEMENT	31
5.1	Procédé de valorisation	31
5.1.1	Valorisation de l'URT sur le territoire français.....	31
5.1.2	Valorisation de l'URT à l'étranger	32
5.2	Analyse de l'adéquation entre perspectives de valorisation et quantités détenues et à détenir.....	36
5.2.1	Quantités détenues et à détenir.....	36
5.2.2	Perspectives de valorisation.....	36
5.2.2.1	Perspectives de valorisation sur le territoire français	36
5.2.2.2	Perspectives de valorisation à l'étranger	37
6	VALORISATION DU PLUTONIUM	37
6.1	Procédé de valorisation	37
6.2	Analyse de l'adéquation entre perspectives de valorisation et quantités détenues et à détenir.....	39
6.2.1	Quantités détenues et à détenir.....	39
6.2.2	Perspectives de valorisation.....	39
7	VALORISATION DES MATIERES THORIFERES	40
7.1	Procédés de valorisation envisagés par New AREVA et SOLVAY.....	40
7.1.1	Valorisation des matières thorifères pour la production d'énergie.....	40
7.1.2	Valorisation des matières thorifères pour la production de traitements anticancéreux.....	44
7.1.2.1	Valorisation des NiTh de New AREVA	44
7.1.2.2	Contribution de la valorisation des HBTh de Solvay	46
7.1.3	Procédé de valorisation des HBTh	46
7.2	Analyse de l'adéquation entre les perspectives de valorisation et les quantités détenues et à détenir	47
7.2.1	Quantités détenues et à détenir.....	47
7.2.2	Perspectives de valorisation et adéquation aux quantités.....	48
7.2.2.1	Valorisation du thorium issu des matières thorifères dans la filière nucléaire	48
7.2.2.2	Valorisation des matières thorifères pour des applications médicales	51
7.2.2.3	Valorisation des Terres rares contenues dans les hydroxydes de thorium	53
7.2.3	Conclusion	53

1 INTRODUCTION

1.1 Définitions

L'Article L542-1-1 du Code de l'Environnement précise :

« Une substance radioactive est une substance qui contient des radionucléides, naturels ou artificiels, dont l'activité ou la concentration justifie un contrôle de radioprotection. [] Une matière radioactive est une substance radioactive pour laquelle une utilisation ultérieure est prévue ou envisagée, le cas échéant après traitement. [] Un combustible nucléaire est regardé comme un combustible usé lorsque, après avoir été irradié dans le cœur d'un réacteur, il en est définitivement retiré »

1.2 Objet de la note

L'Article L542-13-2 du Code de l'Environnement dispose :

« Les propriétaires de matières radioactives, à l'exclusion des matières nucléaires nécessaires à la défense, informent les ministres chargés de l'énergie et de la sûreté nucléaire des procédés de valorisation qu'ils envisagent ou, s'ils ont déjà fournis ces éléments, des changements envisagés.

Après avis de l'Autorité de sûreté nucléaire, l'autorité administrative peut requalifier des matières radioactives en déchets radioactifs si les perspectives de valorisation de ces matières ne sont pas suffisamment établies. Elle peut également annuler cette requalification dans les mêmes formes.

Un décret définit les modalités d'application du présent article. »

L'article D. 542-80 du Décret n° 2017-231 du 23 février 2017 pris pour application de l'article L. 542-1-2 du code de l'environnement et établissant les prescriptions du plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs dispose :

« L'information prévue à l'article L. 542-13-2 est effectuée lors de la mise à jour du plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs. Elle comporte une analyse de l'adéquation entre les perspectives de valorisation et les quantités détenues et à détenir, ainsi qu'une présentation des matières sous formes de lots homogènes au regard des modalités de valorisation envisagées, à l'exclusion des matières nucléaires nécessaires à la défense.»

Le présent document constitue la réponse conjointe du CEA, d'EDF, de New AREVA et de SOLVAY à cette demande. Les développements relatifs aux différentes matières considérées dans ce rapport relèvent néanmoins, matière par matière, de la responsabilité du propriétaire concerné.

1.3 Matières radioactives examinées

Les principales matières radioactives, en termes de niveau d'activité et de volume, et qui font l'objet de cette note sont :

- Les combustibles usés et les rebuts de combustible MOX ;
- L'uranium à différents stades de transformation ; extrait de la mine, enrichi, ou appauvri en isotopes fissiles, et issu du retraitement des combustibles nucléaires usés ;
- Le plutonium ;
- Les matières thorifères.

Les quantités détenues telles qu'indiquées dans cette note émanent du bilan à fin 2015 publié par l'ANDRA. Ce bilan donne une photographie des matières radioactives entreposées dans les différentes installations du cycle en France. Par ailleurs, l'édition publique 2015 de l'Inventaire National donne les évolutions prévisionnelles de ces stocks à fin 2020 et à fin 2030. Ces estimations sont en cours de mise à jour et feront l'objet d'une nouvelle publication par l'ANDRA en 2018.

Parallèlement, une consolidation des bilans matières dans le parc nucléaire français est en cours dans le cadre de la réponse à l'Article 51 de l'Arrêté PNGMDR qui dispose que : « *Le CEA remet au ministre chargé de l'énergie avant le 30 juin 2018 un inventaire prospectif entre 2016 et 2100 des matières et des déchets radioactifs présents dans les combustibles usés qui seraient produits par le parc de réacteurs électronucléaires français selon différents scénarios, notamment dans le prolongement de ceux étudiés avec EDF et AREVA au titre du PNGMDR 2013-2015 []*»

L'adéquation entre les perspectives de valorisation et les quantités détenues et à détenir pourra être consolidée pour certaines matières à partir des résultats de cette étude.

2 VALORISATION DES COMBUSTIBLES USES ET REBUTS MOX

Les combustibles usés sont essentiellement issus du secteur électronucléaire, et dans une moindre mesure des secteurs de la recherche et de la défense. Ce sont principalement :

- les combustibles à l'oxyde d'uranium (UOX), essentiellement des combustibles à l'uranium naturel enrichi (UNE) et en moindre quantité des combustibles à l'uranium de traitement enrichi (URE),
- les combustibles d'oxyde mixtes d'uranium et de plutonium (MOX), qu'EDF est actuellement autorisée à utiliser dans 24 réacteurs 900 MWe,
- les combustibles du CEA civil, qui sont utilisés dans des réacteurs particuliers à des fins de recherche. Ceux-ci sont plus variés en forme et en composition physico-chimique que les combustibles EDF. Ils sont aussi beaucoup moins nombreux,
- les combustibles de la Défense nationale, utilisés soit dans les réacteurs destinés à la fabrication de matière pour la force de dissuasion, soit dans les réacteurs embarqués des sous-marins, des navires et leurs prototypes à terre.

Ce chapitre traite par ailleurs d'une faible quantité de rebuts de combustibles MOX non irradiés qui n'ont pu être recyclés dans le processus de fabrication de ce type de combustible. Ces rebuts ont vocation à être traités en vue de leur recyclage sous forme de combustible.

2.1 Procédés de valorisation

La quasi-totalité des combustibles usés produits ou à produire dans le cadre de l'exploitation des réacteurs existants ont été ou ont vocation à être traités à court, moyen ou long termes.

2.1.1 Combustibles des réacteurs électrogènes à l'uranium

2.1.1.1 Recyclage des combustibles UOX usés

Après utilisation en réacteur à eau légère, les combustibles UNE usés contiennent encore 95 à 96 % de matières valorisables : 1 % de plutonium et 94 à 95 % d'uranium. Le recyclage du combustible consiste dans un premier temps à séparer ces matières valorisables des déchets ultimes. Ces derniers sont conditionnés en « conteneurs standards de déchets », qui permettent leur entreposage et leur transport dans les meilleures conditions de sûreté. Ce conditionnement est conçu pour assurer de hautes performances de durabilité et de confinement en vue du stockage géologique. À l'issue de l'étape de traitement, les matières valorisables sont récupérées afin d'être recyclées. Selon la stratégie de l'électricien, l'uranium de recyclage issu du traitement des combustibles usés (URT) peut être recyclé, après avoir été ré-enrichi, sous forme de combustible « URE » ou entreposé sous forme stable, afin de constituer un stock stratégique d'uranium. Le plutonium permet de fabriquer, en flux tendu, un autre type de combustible : le MOX.

Le recyclage des combustibles UNE a démarré rapidement après la mise en service industrielle des premiers réacteurs nucléaires de sorte que leur traitement est aujourd'hui une opération parfaitement maîtrisée à l'échelle industrielle et qui bénéficie d'un vaste retour d'expérience.

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

Avec le démarrage des usines UP3 (1990) et UP2-800 (1994) d'une capacité totale autorisée de 1700 t/an, ce sont plus de 32 000 tonnes de combustibles usés de type eau légère qui ont été traitées à La Hague à fin 2015, dont environ 68 % pour EDF, 17 % pour des clients allemands, 9 % pour des clients japonais, et le reste principalement pour des clients belges, suisses, néerlandais et italiens (cf. Figure 2.1).

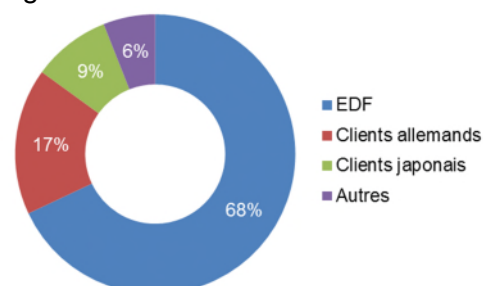


Figure 2.1 - Répartition par clients des combustibles usés traités à La Hague

Conformément aux encadrements légaux et réglementaires en matière de gestion des déchets issus de combustibles usés étrangers, les contrats signés par New AREVA avec ses clients étrangers garantissent, avec l'aval des autorités politiques de part et d'autre, l'expédition dans leur pays d'origine des déchets conditionnés issus de leur traitement-recyclage. Un rapport comportant l'inventaire des combustibles usés en provenance de l'étranger dont ceux issus des opérations de recherche, ainsi que des matières et des déchets radioactifs, qui en sont issus après retraitement ou traitement est publié chaque année par New AREVA.¹

La filière de traitement est ainsi totalement opérationnelle.

Les 22 000 tML de combustibles UNE qui ont été traitées à fin 2015 par New AREVA pour le compte d'EDF, ont permis leur valorisation sous forme d'environ 2 200 tML de combustible MOX et plus de 600 tML de combustible URE.

¹ Traitement des combustibles usés provenant de l'étranger dans les installations d' AREVA NC la Hague, Rapport 2016

2.1.1.2 Recyclage des combustibles URE usés

L'usine de La Hague est autorisée à recevoir, décharger, entreposer et traiter des combustibles URE usés par décision n° 2014-DC-0427 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 24 avril 2014. Cette décision élargit le périmètre d'application de la précédente autorisation délivrée par les arrêtés du 8 février 2005.

La faisabilité de son traitement à l'échelle industrielle a pu être démontrée dès 2006. Ce sont quelques tonnes de combustibles URE usés qui ont été traitées pour le compte de clients étrangers depuis 2006.

Même si le combustible URE usé, produit à partir d'uranium de recyclage issu du traitement (URT) enrichi, est proche du combustible UNE usé, l'uranium qu'il contient (URT de 2nd cycle) est caractérisé par une qualité isotopique moins intéressante que celle de l'URT issu du traitement d'UNE usé.

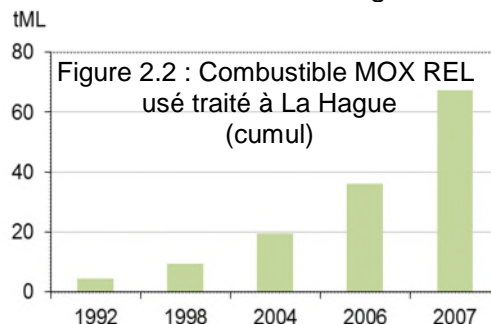
Recycler cet URT de 2nd cycle sous forme d'URE dans des réacteurs à eau légère nécessite, à performance énergétique égale, un enrichissement en ²³⁵U plus élevé que celui requis pour l'URT de 1^{er} cycle ; ce sur-enrichissement peut engendrer des contraintes complémentaires liées à la limite réglementaire de 5% en U235 dans les installations du cycle. Les combustibles URE usés sont entreposés en piscine et constituent une source de matière qui sera recyclée dans un parc de réacteurs de GEN IV.

2.1.2 Recyclage des combustibles MOX usés

La valorisation des combustibles usés civils contenant du plutonium (MOX REP et MOX RNR), via le traitement à l'usine de La Hague et le recyclage des matières qui en sont issues, est une opération déjà mise en œuvre.

La conception de l'outil industriel de La Hague et la performance de ses procédés permettent de recycler des combustibles MOX usés. En effet, l'usine UP2-800 a été conçue dès l'origine pour recycler des combustibles variés, dont le MOX. Le traitement du combustible MOX usé est basé sur le même procédé que celui mis en œuvre pour les combustibles UNE usés, moyennant quelques adaptations (changement de paramètres opératoires, adjonction de réactifs supplémentaires...). Les différences UNE-MOX les plus sensibles concernent principalement les unités de dissolution et de gestion du plutonium séparé, mais ces différences demeurent limitées.

Comme illustré sur la Figure 2.2 ci-contre, plusieurs campagnes de traitement de combustible MOX REL² usés ont été réalisées à l'usine de La Hague ; l'augmentation des quantités traitées a été couplée à une évolution des caractéristiques des MOX utilisés, et en particulier une augmentation du taux de combustion et de la teneur en plutonium. New AREVA a déposé en 2016 une demande auprès de l'Autorité de sûreté nucléaire, afin d'être autorisé à recevoir, entreposer et traiter du combustible MOX usé irradié caractérisé par un taux de combustion moyen au plus égal à 55 GWj/t et une teneur massique en plutonium et américium au plus égale à 8,65%. Cette demande a vocation à élargir le périmètre des précédentes autorisations.



De plus, ce sont près de 30 tML de MOX RNR usés qui ont été traitées à Marcoule et à La Hague depuis les années 1970. La faisabilité industrielle du traitement des combustibles MOX REP et MOX RNR est établie. Les combustibles MOX usés sont entreposés en piscine et constituent une source de matière (Pu) indispensable pour le déploiement d'un parc de réacteurs de génération IV.

² Réacteur à Eau Légère




2.1.3 Autres combustibles usés

2.1.3.1 Recyclage des combustibles de recherche

2.1.3.1.1 Combustibles RTR usés

Depuis mi-2005, New AREVA s'est doté de capacités de traitement de combustibles irradiés de réacteurs de tests et de recherche « RTR » (Research and Test Reactors). Les combustibles RTR reçus à l'usine de la Hague pour traitement sont soit des combustibles de type « aluminures », soit des combustibles de type « siliciures ».

Le tableau qui suit résume la provenance des combustibles RTR reçus à La Hague et leurs propriétaires.

<i>Pays</i>	<i>Réacteur</i>	<i>Type de combustible</i>	<i>Propriétaire</i>
France 	SILOE	Aluminure et Siliciures	CEA
	ULYSSE	Aluminure	CEA
	ORPHEE	Aluminure	CEA
	OSIRIS	Siliciure	CEA
	SCARABEE	Aluminure	CEA
	RHF	Aluminure	ILL
	CELESTIN	Aluminure	CEA
	IN2P3 ³	Aluminure	UDS
Belgique 	BR2 MOL	Aluminure	SCK-CEN
Australie 	HIFAR	Aluminure	ANSTO
	MOATA	Aluminure	ANSTO

L'installation de « tête » de l'usine de la Hague est dotée d'un équipement permettant la dissolution par campagne des combustibles usés de la plupart d'entre eux. Cet équipement permet de plonger l'élément combustible dans l'acide nitrique sans avoir recours au préalable à des opérations mécaniques autres que la séparation des embouts. Les solutions de dissolution ainsi obtenues sont mélangées dans les

³ L'institut national de physique nucléaire et de physique des particules de Strasbourg

solutions de dissolution de combustible UNE et répondent ainsi à l'ensemble des exigences et critères requis pour les opérations aval.



Figure 2.3 – Illustration de combustibles RTR

Ces aménagements ont permis le traitement à fin 2016 de plus 2700 assemblages combustibles de ce type. Le traitement des combustibles RTR est autorisé par Décisions de l'Autorité de sûreté nucléaire⁴.

Les combustibles traités à La Hague pour le compte du CEA sont essentiellement des combustibles RTR de type aluminures. A noter que New AREVA a réalisé en 2017 une première campagne de traitement des combustibles de type siliciures de propriété CEA.

2.1.3.1.2 Autres combustibles usés liés à la recherche

D'autres types de combustibles usés de propriété CEA tels les combustibles de type « caramel » (sandwich d'oxyde d'uranium enrichi entre deux plaques métalliques) provenant du réacteur de recherche OSIRIS ou les combustibles issus des réacteurs CABRI et PHEBUS (réacteurs d'essais de sûreté) n'ont pas encore été réceptionnés à La Hague.

A noter que dans le cadre d'un plan d'assainissement des centres du CEA, des combustibles de type « caramel » issus du réacteur de recherche OSIRIS ont été traités dans l'ensemble ISAI-TOR-UP1 au CEA Marcoule, dès mi 1996 jusqu'en juin 1997. Ces combustibles ont d'abord fait l'objet d'opérations mécaniques particulières consistant à séparer les plaques les unes des autres avant de les poinçonner, de les découper et de les introduire dans le dissolvant TOR-UP1. Cette campagne a permis de traiter, 2,3 tonnes d'UO₂ et ainsi de valider la faisabilité de leur traitement.

Les combustibles issus des réacteurs d'essais de sûreté tels que CABRI ou PHEBUS seront traités dans les ateliers existants.

Par ailleurs le traitement de faibles quantités de combustibles usés de nature différente (combustibles historiques métalliques, et crayons et échantillons expérimentaux provenant principalement d'EL2, EL3 et des réacteurs UNGG français) nécessitera de nouveaux équipements dans l'usine de La Hague ; ils font l'objet d'études dans le cadre d'accords CEA – New AREVA. Ces combustibles sont entreposés en toute sûreté sur les sites du CEA en attendant leur futur recyclage.

⁴ Décisions n°2012-DC-0271 et DC-0272 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 5 juin 2012 relatives à la réception et au traitement des combustibles irradiés de type « réacteur de tests et de recherche (RTR) » - Décision no 2017-DC-0590 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 16 mai 2017 modifiant la décision n°2012-DC-0271

2.1.3.2 Recyclage des combustibles de la propulsion navale

Les combustibles de propulsion navale usés (dits « PN ») s'apparentent aux combustibles « caramel » dont le traitement ne pose pas de problème particulier en matière de dissolution compte tenu du retour d'expérience mentionné précédemment. La faisabilité technique du traitement et recyclage de ces combustibles est donc acquise. Il faut noter toutefois que leur traitement industriel nécessitera de nouveaux équipements dans l'usine de La Hague.

2.2 Analyse de l'adéquation entre perspectives de valorisation et quantités détenues et à détenir

2.2.1 Quantités détenues et à détenir

Le stock à fin 2015 de combustibles en cours d'utilisation dans les réacteurs français ou de combustibles en attente de traitement présents sur le sol français était d'environ 19 000 tML⁵ (tonnes de métal lourd).

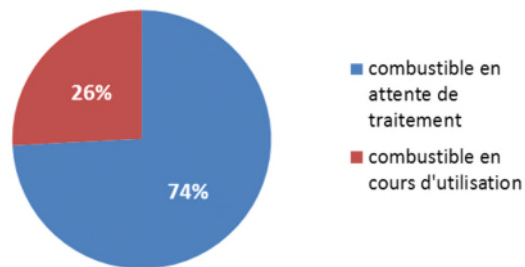


Figure 2.4 - Répartition du stock de combustibles irradiés à fin 2015

Ce sont essentiellement des combustibles usés de réacteurs à eau légère appartenant majoritairement à EDF. Les combustibles liés à la recherche et de propriété CEA représentent moins de 0,5% (en masse) de cet inventaire.

Ces combustibles usés sont entreposés pour la majeure partie d'entre eux en piscines, sur les sites des réacteurs ou dans les piscines d'entreposage de l'usine de La Hague en attente de leur traitement.

Les prévisions pour 2020 et 2030 données à titre indicatif dans le cadre de l'édition 2015 de l'inventaire national sont présentées sur la Figure 2.5. Cette évolution est commentée au paragraphe 2.2.2.

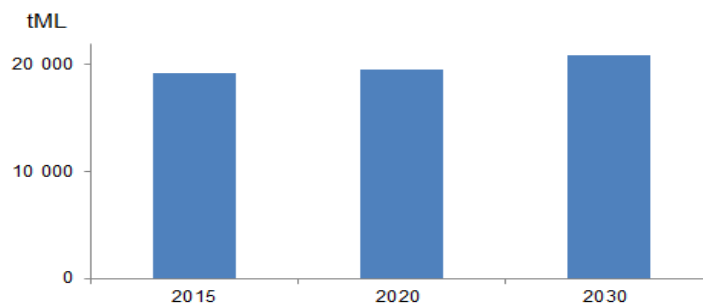


Figure 2.5 - Combustible en cours d'utilisation ou en attente de traitement

⁵ Inventaire National – Bilan à fin 2015 – source ANDRA

Cet inventaire intègre par ailleurs une faible quantité de rebuts de combustibles MOX non irradiés qui n'ont pu être recyclés dans le processus de fabrication de ce type de combustible.

A fin 2015, le stock de rebuts MOX non irradié s'élevait à environ 260 tML⁶. L'évolution de ce stock est analysée au paragraphe 2.2.2.3.

2.2.2 Perspectives de valorisation

De façon générale, les combustibles usés étant valorisables pour les matières contenues, les perspectives de valorisations sont étroitement liées à celles de ces matières (Pu, U) qui font l'objet d'une analyse spécifique dans les chapitres suivants.

2.2.2.1 Perspectives de valorisation des combustibles usés d'EDF

Les combustibles usés étant valorisables pour les matières qu'ils contiennent, l'état des stocks résulte principalement de l'impact des politiques industrielle et énergétique sur :

- les capacités de traitement et de fabrication de combustibles (notamment La Hague, MELOX et FBFC Romans),
- les capacités d'utilisation des combustibles de recyclage dans le parc de réacteurs,
- la préservation d'un stock stratégique.

Le résultat est une stabilisation du stock de combustibles UNE usés, la quantité de combustible UNE traitée annuellement pour recyclage du Pu sous forme de MOX dans les réacteurs actuels étant équivalente à la quantité de combustible UNE usé générée.

Les combustibles URE et MOX usés sont entreposés en piscine. Ces derniers constituent une source de matière indispensable pour le déploiement d'un parc de réacteurs de génération IV. Des études sont actuellement menées⁷ pour affiner les scénarii industriels intégrant des paramètres technologiques, industriels, économiques et stratégiques permettant d'optimiser les transitions entre générations de parcs de réacteurs et la valorisation des combustibles usés.

Le démarrage d'un parc de réacteurs de génération IV nécessitera en effet des quantités de plutonium importantes (de l'ordre de 10 à 15 tonnes de plutonium par GWe installé). Préserver le stock de MOX usés permet de constituer les réserves nécessaires de plutonium en un nombre limité d'assemblages combustibles à entreposer en attente de leur traitement coordonné avec le démarrage d'un parc de Génération IV. C'est précisément la stratégie adoptée par EDF. Le stock d'URE usé vient par ailleurs compléter ce stock stratégique.

2.2.2.2 Perspectives de valorisation des combustibles usés du CEA

La principale valorisation envisagée des matières issues du traitement de combustibles usés du CEA concerne à court-moyen terme leur utilisation dans le cadre de la R&D sur les réacteurs de 4^{ème} génération.

⁶ Inventaire National – Bilan à fin 2015 – source ANDRA

⁷ Notamment dans le cadre de la réponse à l'Article 51 de l'Arrêté PNMGDR (cf. paragraphe 1.3)

2.2.2.3 Perspectives de valorisation des rebuts de combustible MOX non irradié

Les rebuts de combustible MOx non irradié sont des matières radioactives sous forme de pastilles ou poudres qui n'ont pu être directement recyclées dans le circuit de production de l'usine MELOX (cf. 6.1).

Ces matières sont conditionnées puis expédiées dans des emballages dédiés vers La Hague pour être entreposées puis traitées en vue d'une utilisation future des matières séparées.

La quantité de rebuts de combustible à base d'oxyde d'uranium et de plutonium présente sur le site de La Hague à fin 2015 était de l'ordre de 260 tML⁸.

Ce stock a vocation à être traité dans des installations existantes ou dans de futures installations sur le site de La Hague et ainsi à être recyclé dans des réacteurs du parc actuel ou futur.

A titre indicatif, ce stock est estimé par New AREVA à environ 307 tML vers 2030. A cet horizon, il est envisagé une résorption de ce stock sur la base d'une adaptation de l'outil industriel existant ; cette adaptation permettrait de traiter ces matières à un rythme supérieur à la production de rebuts de l'usine MELOX ; le stock pourrait ainsi être réduit à 290 tML vers 2040.

La totalité de ce stock a vocation à être recyclé in fine. Les perspectives de valorisation de ce stock au-delà de 2040 sont consolidées dans le cadre de la réponse à l'Article 51 de l'arrêté PNGMDR (cf. 1.3.).

⁸ Inventaire National – Bilan à fin 2015 – source ANDRA

3 VALORISATION DE L'URANIUM NATUREL ET ENRICHI

L'uranium naturel et l'uranium enrichi sont des produits énergétiques dont la gestion est organisée en filière pour satisfaire le besoin de production d'électricité nucléaire. L'uranium naturel et l'uranium enrichi présents sur le sol français sont principalement la propriété de New AREVA et de ses clients, d'EDF et, pour une part nettement plus faible, du CEA.

3.1 Utilisation de l'uranium naturel et enrichi

Le parc mondial actuel de réacteurs nucléaires, la durée de vie attendue des réacteurs et la construction en cours de nouveaux réacteurs assurent la pérennité du marché de ces matières pour des dizaines d'années au moins. Le développement du nucléaire se poursuit en effet au plan mondial, tiré principalement par la Chine, la Russie, et l'Inde, ainsi que par de nombreux pays qui étudient l'option nucléaire comme nouvelle composante de leur mix énergétique. Selon l'AIEA et le WNA (World Nuclear Association), à fin 2016, 60 réacteurs étaient en construction dans le monde (contre 66 à fin 2015), 165 réacteurs étaient en commande ou en projet (contre 158 à fin 2015, 181 à fin 2014, 170 à fin 2013, 165 à fin 2012 et 152 à fin 2011) et plus de 300 autres sont envisagés dans les années à venir.

3.2 Analyse de l'adéquation entre perspectives de valorisation et quantités détenues et à détenir

La perspective d'un recours croissant à l'énergie nucléaire, notamment dans les pays émergents, est soulignée par différentes organisations internationales. La figure 3.1 ci-après présente différents scénarios d'évolution de la capacité nucléaire mondiale installée avec une croissance de plus de 80% à l'horizon 2030 pour le scénario le plus optimiste. Des scénarios plus prudents tablent sur une croissance de l'ordre de 50%. Cette dynamique constitue ainsi une source de croissance potentielle à long terme pour l'ensemble des activités du cycle du combustible nucléaire, et pour les marchés de l'uranium naturel et enrichi en particulier.

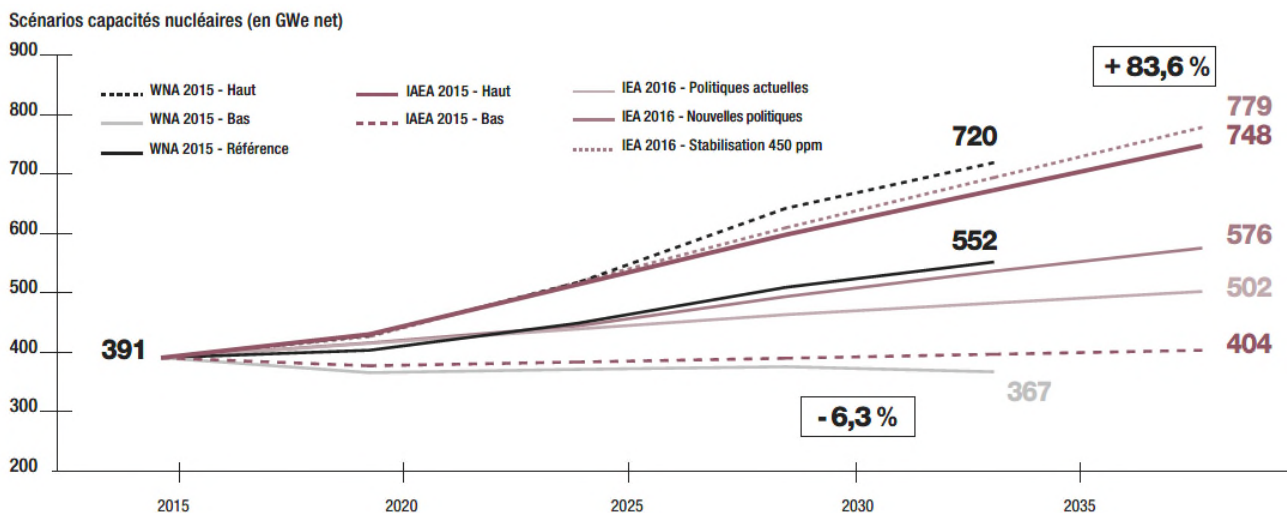


Figure 3.1 - Scénarios d'évolution du parc de réacteurs nucléaires mondial (en GWe net)⁹

L'uranium naturel et l'uranium enrichi ne sont jamais accumulés par absence de débouché. Les entreposages existants ne résultent que de besoins opérationnels ou relèvent de choix stratégiques et commerciaux dépendant des conditions de marchés de l'amont.

⁹ Sources : IAEA, WNA, International Energy Agency.

4 VALORISATION DE L'URANIUM APPAUVRI

La production d'énergie dans les réacteurs de générations actuelles repose notamment sur la fission de l'un des isotopes de l'uranium, l'uranium 235 (^{235}U).

L'uranium appauvri détenu par New AREVA est une matière radioactive issue de ses activités d'enrichissement. New AREVA fournit en effet à ses clients un service d'enrichissement consistant à augmenter la teneur en ^{235}U principalement de l'uranium naturel (composé à environ 0,7% en masse d' ^{235}U et à 99,3% d' ^{238}U) jusqu'au niveau nécessaire, allant de 3 à 5 % selon le type et le mode de fonctionnement des réacteurs et la teneur notifiée par ses clients. Les opérations d'enrichissement se traduisent ainsi par la production d'un flux d'uranium enrichi et d'un flux d'uranium appauvri.

Selon la pratique internationale du marché de l'enrichissement, le client fournit l'uranium à enrichir à l'enrichisseur. Celui-ci retourne à son client l'uranium enrichi issu du processus d'enrichissement, et conserve la propriété de l'uranium appauvri qui est produit conjointement.

Les procédés industriels d'enrichissement isotopique nécessitent le passage à un état gazeux de l'uranium, sous forme d'hexafluorure d'uranium (UF_6). La production d'une usine d'enrichissement s'exprime en unités de travail de séparation (UTS). Cette unité dépend de la quantité d'uranium enrichie et de la teneur, et donne une mesure du travail nécessaire pour séparer l'isotope ^{235}U fissile. L'UTS est l'unité de mesure utilisée comme standard international pour qualifier le service d'enrichissement et sa commercialisation, quelle que soit la technologie utilisée.

Suite à l'arrêt en 2012 de l'usine Eurodif d'enrichissement par diffusion gazeuse, New AREVA a maintenant mis en œuvre la technologie d'enrichissement par centrifugation en investissant dans la nouvelle usine Georges Besse II, répondant à des impératifs de sûreté, de protection de l'environnement et de compétitivité toujours plus exigeants. Par la mise en œuvre de cette nouvelle technologie, l'usine Georges Besse II a une consommation d'électricité 50 fois inférieure à celle générée par la diffusion gazeuse. Elle offre également l'avantage d'une construction modulaire permettant une montée en puissance rapide et une adaptation de la capacité de production aux besoins du marché.

La centrifugation utilise la différence de masse entre les isotopes ^{235}U et ^{238}U de l' UF_6 . Comme illustré sur la Figure 4.1, la force centrifuge concentre les particules les plus lourdes à la périphérie, créant un effet de séparation isotopique. Le gaz enrichi en isotope léger et situé plus au

centre du bol, est transporté vers le haut de la colonne tandis que le gaz enrichi en isotope lourd descend. Les produits enrichis et appauvris sont récupérés aux deux extrémités de la colonne.

L'hexafluorure d'uranium appauvri est généralement transformé par «défluoration» en poudre d' U_3O_8 ; l' U_3O_8 est une matière insoluble dans l'eau, incombustible et non corrosive permettant un entreposage en toute sûreté et sécurité avant sa valorisation. La défluoration de l'uranium appauvri est réalisée dans une installation (appelée « W ») sur le site du Tricastin.

L'uranium traité dans les usines d'enrichissement est principalement de l'uranium naturel. L'uranium issu du traitement des combustibles usés peut également être enrichi en vue de son recyclage. L'uranium appauvri, qui contient encore l'isotope ^{235}U , peut également être ré-enrichi pour ramener sa teneur à celle de l'uranium naturel, venant ainsi compléter l'offre de fourniture d'uranium naturel.

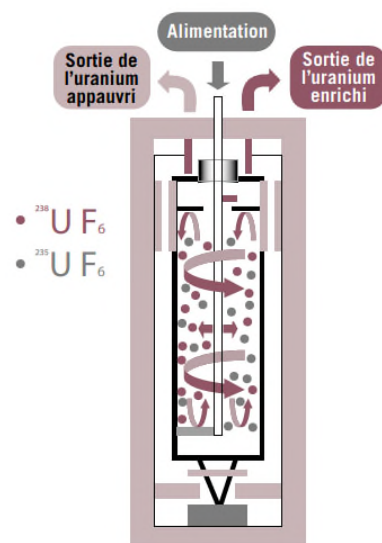


Figure 4.1 :
Principe de la centrifugation

4.1 Procédés de valorisation

Les procédés de valorisation mis en œuvre ou envisagés pour l'uranium appauvri sont:

- la déconversion en oxyde d'uranium appauvri pour une valorisation sous forme de combustible MOX ; l'uranium appauvri entre en effet à plus de 90% dans la composition de ce combustible, le complément étant principalement du plutonium. Plus d'une centaine de tonnes de cette matière est ainsi réutilisée chaque année pour la fabrication de MOX à l'usine Melox. Il est également envisagé de valoriser cette matière sous forme de combustible pour réacteurs à neutrons rapides lorsque ceux-ci seront déployés.
- le ré-enrichissement en vue de la production d'uranium naturel et/ou de la fabrication de combustible UOX ; le marché de l'uranium naturel s'étant tendu au début des années 2000 jusque 2007-2008, environ 7 700 tU d' U_3O_8 appauvris ont été expédiées, en 2008, de Bessines à l'usine Comurhex de Malvési pour conversion avant ré-enrichissement.
- l'exploitation de propriétés particulières de l'élément uranium permettant par exemple son utilisation à des fins de radioprotection, de génération d'électricité par effet thermoélectrique ou encore de stockage d'énergie. New AREVA a initié un programme d'études et de recherches relatives à quelques pistes prometteuses. Ce programme est présenté au paragraphe 4.2.2.4.

4.2 Analyse de l'adéquation entre perspectives de valorisation et quantités détenues et à détenir

4.2.1 Quantités détenues et à détenir

Au 31 décembre 2015¹⁰, l'inventaire d'uranium appauvri détenu par New AREVA était de l'ordre de 300 000 tonnes de métal lourd (tML ou tonnes d'U), entreposées principalement sur les sites de Bessines et du Tricastin. Comme évoqué en introduction, cette matière est actuellement générée dans le cadre des opérations d'enrichissement assurées par l'usine Georges Besse II sur le site du Tricastin. L'usine a atteint fin 2016 sa pleine capacité de production (capacité nominale de 7,5 MUTS par an).

La quantité complémentaire qui pourrait avoir été générée à l'horizon 2030 est estimée à environ 100 000 tML sur la base de cette capacité nominale. Les taux d'enrichissement et de rejet pris en compte pour cette simulation reflètent les évolutions envisagées par nos clients électriciens pour leur combustible.

4.2.2 Perspectives de valorisation

4.2.2.1 Valorisation sous forme de combustible MOX

L'uranium appauvri est utilisé depuis plusieurs années à hauteur d'une centaine de tonnes par an, comme matrice support du combustible MOX fabriqué dans l'usine Melox. La capacité annuelle autorisée pour Melox est de 195 tML de combustible MOX. La production effective sur les vingt prochaines années dépendra de l'évolution du marché. On peut raisonnablement tabler sur une valorisation moyenne de l'ordre de 150 tU par an sur cette période.

4.2.2.2 Production d'uranium naturel par ré-enrichissement

Lors d'une opération d'enrichissement pour produire une quantité donnée d'uranium enrichi à une teneur donnée en ^{235}U , l'enrichisseur et son client fixent ensemble, en fonction de considérations économiques et industrielles, la « teneur de rejet », soit la teneur en ^{235}U de l'uranium appauvri : lorsque le prix de l'uranium naturel est élevé et celui de l'enrichissement bas, la teneur de rejet est abaissée pour consommer plus de services d'enrichissement et moins d'uranium naturel, afin d'extraire un maximum

¹⁰ Inventaire National – Bilan à fin 2015 – Publication ANDRA

d'isotope ^{235}U du flux entrant – à l'inverse, pour un uranium naturel peu cher et un enrichissement cher, la teneur de rejet est relevée, et la quantité d'uranium à enrichir fournie par le client plus importante.

La figure suivante permet de comparer les quantités, teneurs de rejets et effort d'enrichissement qui permettraient de produire à coût équivalent 1 kg d'uranium enrichi à 4% en fonction de conditions économiques contrastées.

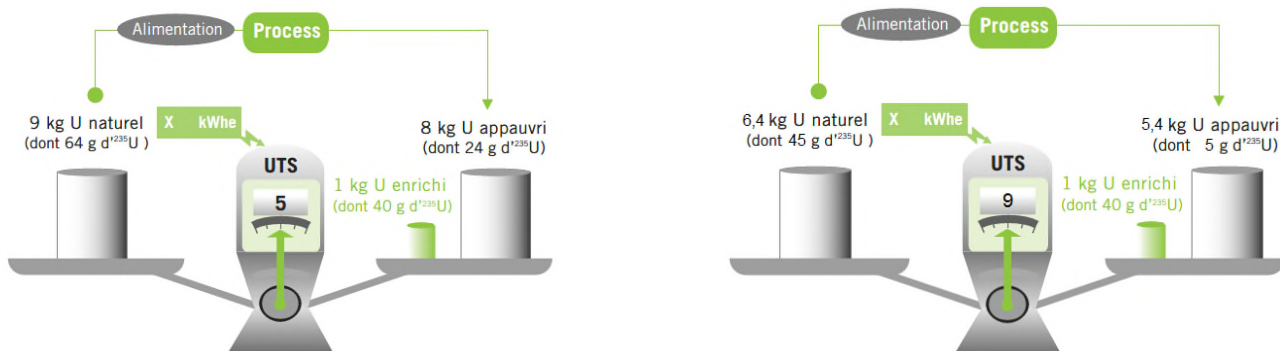


Figure 4.2 : Unat à 30 US\$/lb et UTS à 100\$ l'unité

Unat à 60 US\$/lb et UTS à 30 \$ l'unité

Le stock d' U_3O_8 appauvri présent sur le territoire national représente un gisement d'uranium dont la teneur en ^{235}U est illustrée en Figure 4.3 ci-après. Ce stock peut ainsi être « exploité » par ré-enrichissement afin de compléter l'offre New AREVA de fourniture d'uranium naturel, en produisant d'un côté de l'uranium à une teneur de 0,71%, de l'autre côté de l'uranium appauvri à une teneur plus basse.

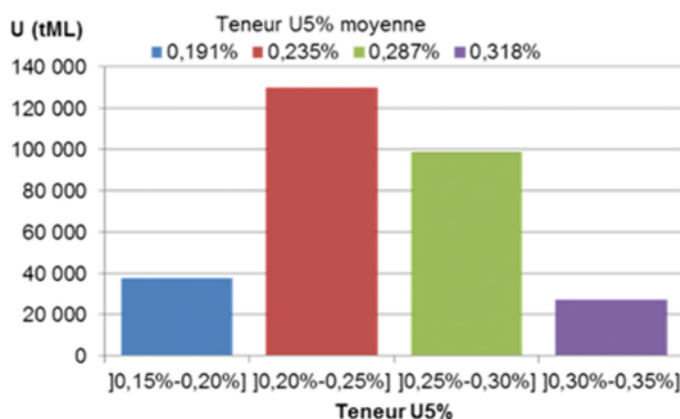


Figure 4.3 : isotopie du stock détenu

Comme évoqué ci-avant, la production de 1 kg d'uranium enrichi à 4 % en ^{235}U , avec un taux de rejet à 0,30%, nécessite 9 kg d'uranium naturel (à 0,71%) et génère donc 8 kg d'uranium appauvri à 0,30%. L'effort d'enrichissement alors requis est de 5,3 UTS.

Le ré-enrichissement de ces 8 kg d'uranium appauvri à 0,30% pour atteindre une teneur résiduelle de 0,14% permet d'obtenir 2,2 kg d'uranium naturel et nécessite un effort d'enrichissement complémentaire de 2,5 UTS (Cf. Figure 4.4).

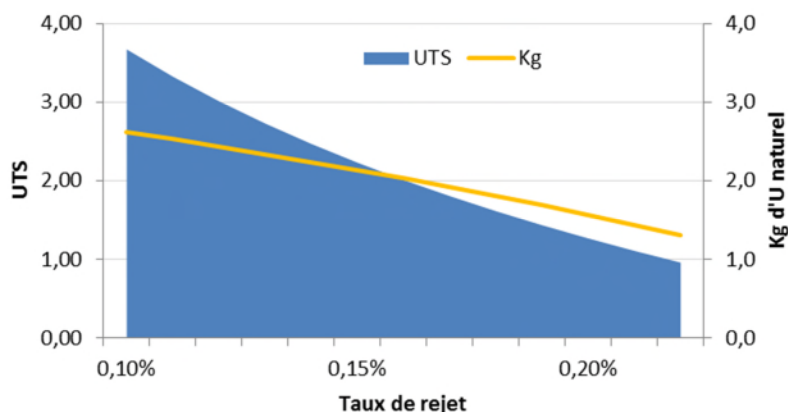


Figure 4.4 : illustration des possibilités de valorisation de 8 kg d'U appauvri

Ainsi, c'est l'arbitrage économique entre le coût de cet effort d'enrichissement et la valeur de l'uranium naturel obtenu qui conduit, le cas échéant, à réaliser du ré-enrichissement sur de l'uranium appauvri.

L'exploitation de ce gisement passe par la sélection de lots de teneurs résiduelles adaptées aux conditions du marché de l'amont. Elle peut inclure les étapes suivantes :

- Le transport des lots d' U_3O_8 sélectionnés vers une installation de conversion,
- La conversion de la poudre d' U_3O_8 en UF_6 ,
- L'enrichissement de l' UF_6 à une teneur en ^{235}U de l'ordre de 0,71% (teneur de l'uranium naturel).

La Figure 4.5 ci-après donne, sur la base d'hypothèses de prix marché le coût global de production de la livre d' U_3O_8 produite en fonction de la teneur en ^{235}U de l'uranium appauvri traité, pour des valeurs multiples de coûts unitaires de l'UTS et une valeur de la conversion équivalent au prix long terme actuel. Ces valeurs de référence sont analysées au paragraphe 4.2.2.2.1 « évolution des marchés de l'amont ». Cette estimation commentée au paragraphe 4.2.2.2. « Perspectives de production d'uranium naturel » est par ailleurs fondée sur une teneur moyenne de rejet de 0,14%, selon la pratique moyenne actuelle des enrichisseurs.

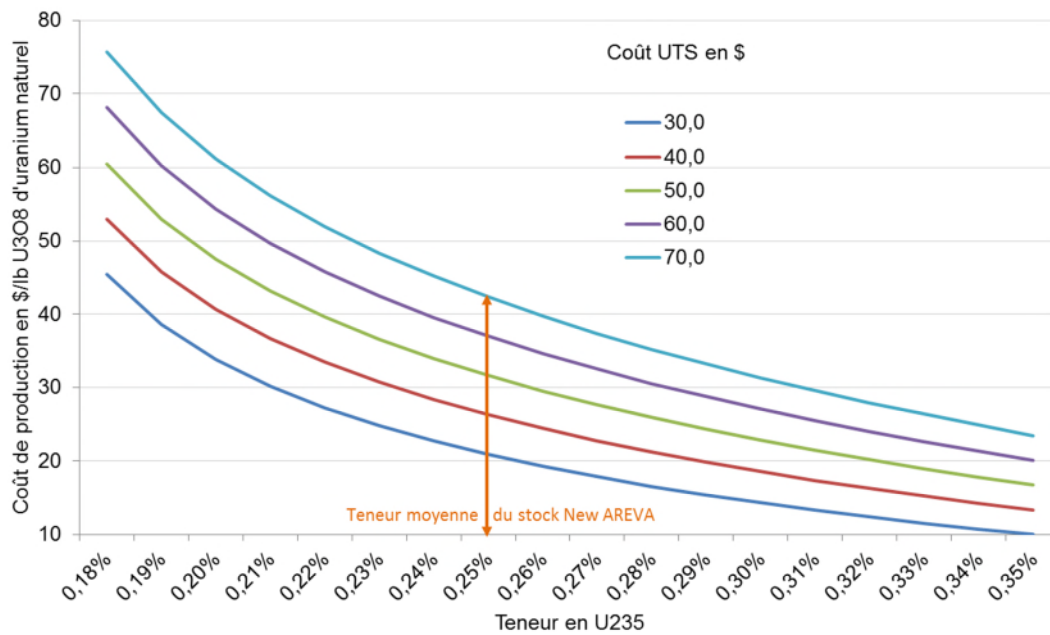


Figure 4.5 : coût pour produire de l'UF₆nat

4.2.2.2.1 Evolution des marchés de l'amont

Comme décrit au paragraphe précédent et synthétisé en Figure 4.6 qui donne un exemple de ventilation type par postes du coût global de production d'uranium naturel, la pertinence économique d'une telle production est principalement liée à l'évolution des marchés de l'uranium naturel, de l'UTS et de la conversion.

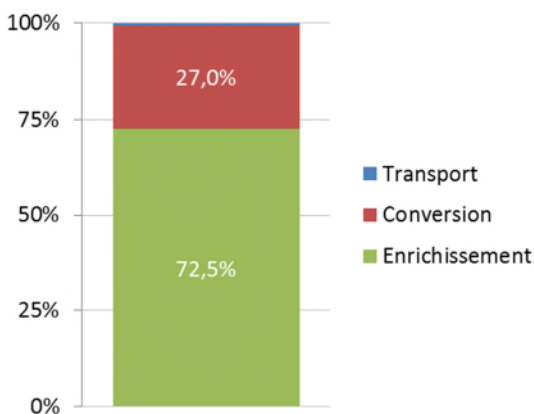


Figure 4.6 : Décomposition du coût de de production pour produire de l'UF₆ naturel

4.2.2.2.1.1 Le marché de l'uranium – l'élément clé de l'économie du ré-enrichissement

La perspective d'un recours croissant à l'énergie nucléaire, notamment dans les pays émergents, est soulignée par différentes organisations internationales. Des scénarios d'évolution de la capacité nucléaire mondiale installée ont été analysés avec une croissance de plus de 80% à l'horizon 2040 pour le scénario le plus optimiste (cf. Figure 4.7).

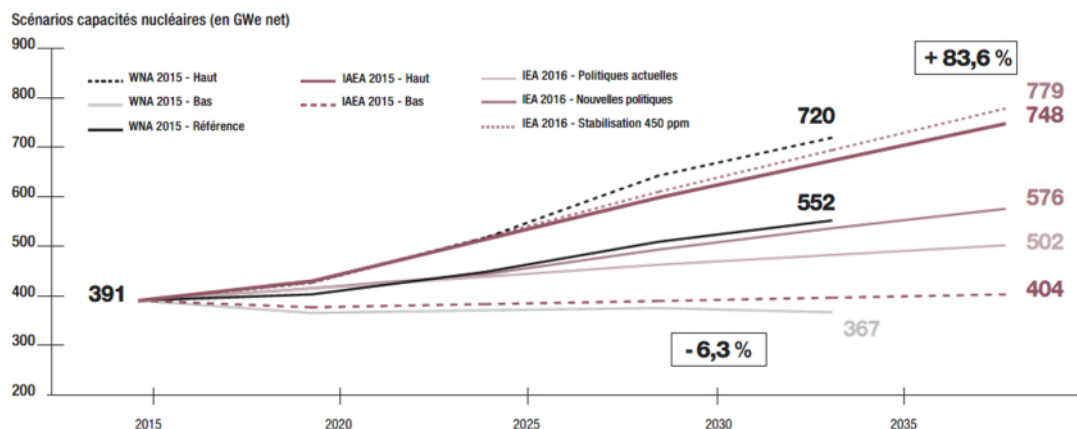


Figure 4.7 : Scénarios d'évolution du parc de réacteurs nucléaires mondial (en GWe net)¹¹

Des scénarios plus prudents tablent sur une croissance de l'ordre de 50%. Cette dynamique constitue ainsi une source de croissance potentielle à long terme pour l'ensemble des activités du cycle du combustible nucléaire.

La société UxC publie régulièrement des indicateurs des marchés de l'amont et leurs évolutions à court moyen et long termes. Ces projections sont basées sur l'analyse de l'offre et de la demande pour les différents segments de marché de l'amont, selon différents scénarios d'évolution du parc nucléaire mondial (cf. Figure 4.8).

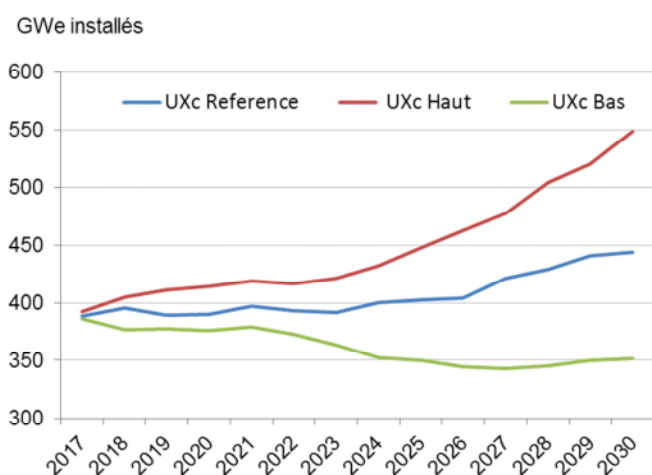


Figure 4.8 : Scénarios d'évolution du parc mondial (UxC)¹²

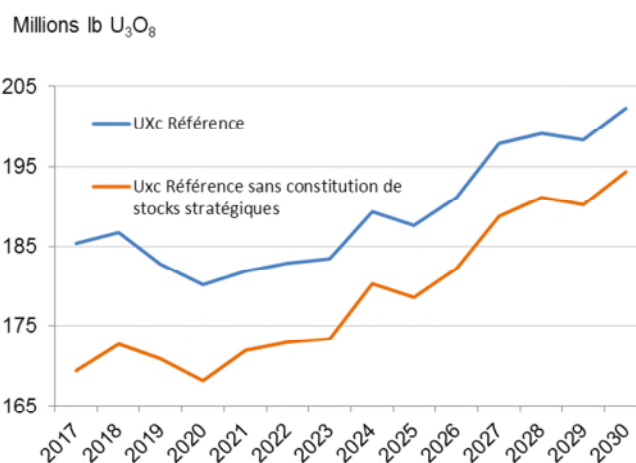


Figure 4.9 : Hausse des besoins en uranium naturel (UxC)

¹¹ Sources : IAEA, WNA, International Energy Agency.

¹² Ux Consulting Company https – www.uxc.com – Uranium Market Outlook – Q3 2017

Selon un scénario « prudent » d'évolution du parc nucléaire mondial (UxC Référence – Figure 4.8), l'évolution de la capacité installée nécessiterait la mise en exploitation de nouvelles mines à partir de 2025. La courbe orange de la Figure 4.9 montre en effet une évolution clairement à la hausse des besoins en uranium à cet horizon. La courbe bleue représente l'évolution des besoins en tenant compte de stocks stratégiques constitués à des fins de sécurité d'approvisionnement par les acteurs du marché, les électriciens ou les états en particulier. A titre d'exemple, la Chine a importé selon les statistiques douanières chinoises, de l'ordre de 19 000 tU en 2015 et 16 000 tU en 2016, pour une consommation annuelle d'environ 8 000 tU.

Cette date de mise en service vers 2025 de nouvelles mines peut ainsi être éventuellement avancée ou décalée de plusieurs années en fonction des politiques de gestion de ces stocks stratégiques par les acteurs concernés.

Compte tenu des projections évoquées ci-dessus et des incertitudes associées, on peut estimer selon une approche conservatrice, les nouveaux projets qui en 2030 devront avoir été développés pour alimenter les besoins du marché.

Dans le secteur minier, il est d'usage de classer les mines et les nouveaux projets par coût de production respectivement réels et estimés pour définir quel sera le coût de production marginal de la mine nécessaire à l'équilibre du marché. Ce coût marginal devient la référence du marché comme prix moyen demandé par tous les producteurs aux consommateurs. Ce « classement » connu sous le nom de « merit curve » est illustré sur la Figure 4.10.

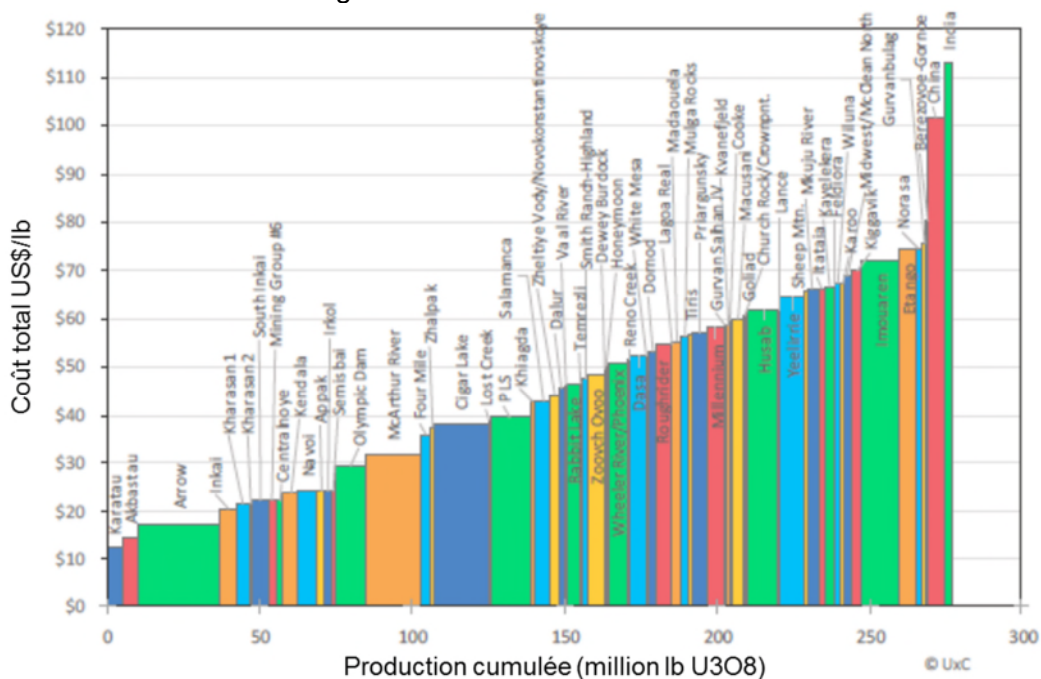


Figure 4.10 : « Merit curve » de l'ensemble des projets potentiellement disponibles en 2030 pour alimenter le marché de l'uranium¹³

En dépit de leur qualité économique potentielle, certains gisements de cette catégorie ne seront pas développés car toutes les conditions techniques, de financement, règlementaires ou environnementales ne seront probablement pas réunies. Une « merit curve » prudente peut être établie en enlevant les gisements les plus risqués au titre des quatre critères ci-dessus mentionnés. Comme illustré sur la Figure 4.11, elle met en évidence un manque de production minière en 2030.

¹³ UxC – Uranium production cost study – septembre 2017

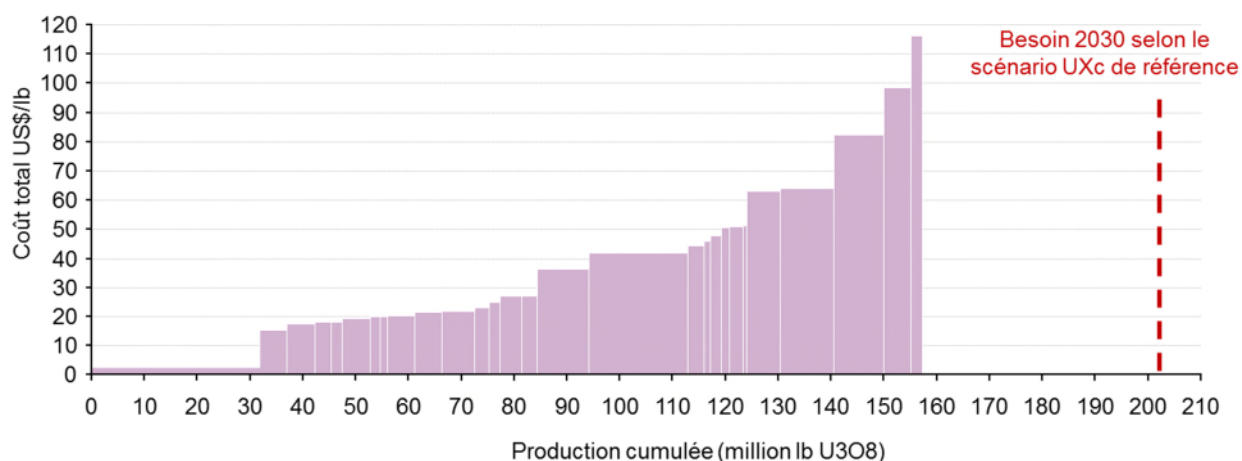


Figure 4.11 : Ensemble des projets déjà décidés/financés disponibles en 2030 pour alimenter le marché

Pour New AREVA, le ré-enrichissement de l'uranium appauvri est considéré comme un projet alternatif à un projet minier en dehors de France qui nécessiterait investissement et développements, en complément de son portefeuille minier diversifié géographiquement et techniquement.

Figure 4.12 : portefeuille minier de New AREVA



Sur une base de 300 000 t d'Uranium appauvri à une teneur de 0,25% (teneur moyenne du stock détenu par New AREVA), il est possible de produire près de 60 000 tU d'uranium naturel (soit environ 150 millions lb U₃O₈) à un coût de production entre \$30 et \$45/lbU₃O₈, en fonction du coût des services d'enrichissement (\$50 à court terme – \$70 à long terme – Cf. Figure 4.5 et paragraphe 4.2.2.2.2).

Cette mine domestique s'insère facilement (cf. Figure 4.13) à l'avant de projets aux coûts de production similaires car c'est une mine au fonctionnement souple, ne nécessitant aucun investissement et basée sur le territoire national. Comparé à une durée moyenne de 10 ans de développement pour une mine classique, le temps nécessaire entre la date de décision du ré-enrichissement et sa mise en œuvre est de quelques mois seulement.

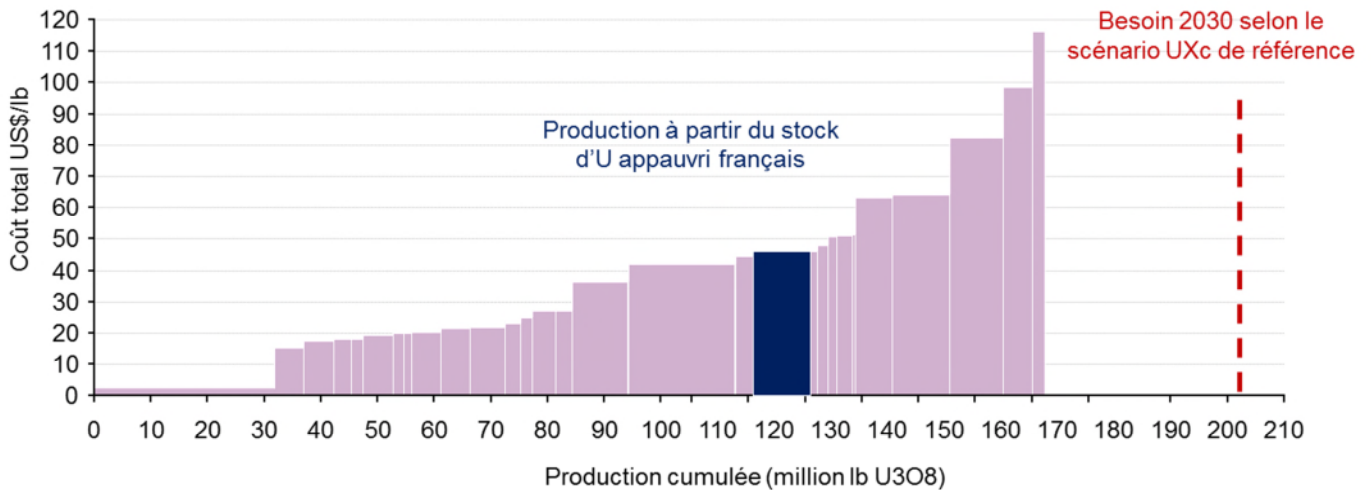


Figure 4.13 : pertinence économique de l'exploitation du stock d'U appauvri détenu sur le territoire français
**Ordre de grandeur donnée à titre illustratif d'une production annuelle basée sur l'utilisation de 10% de la capacité d'enrichissement mondiale sur 15 ans*

Par ailleurs, à l'inverse des coûts miniers dépendants du cours des devises, des accords cadre avec les états et des aléas miniers classiques, sa base de coût est parfaitement prévisible ; il est ainsi aisé pour New AREVA de vendre les quantités produites par anticipation.

Au total, pour New AREVA, société intégrée sur les trois segments de l'amont du cycle du combustible, la détention d'uranium appauvri de bonne qualité associée à la disposition d'usines récentes et performantes pour la conversion et l'enrichissement de l'uranium est un atout important pour diversifier et sécuriser l'approvisionnement en uranium des compagnies électriques clientes, que ce soit en France, mais aussi en Asie et Amérique du Nord, régions à forte implantation commerciale.

4.2.2.2.1.2 Influence du marché de la conversion

Le marché connaît une récente baisse des prix due à une surcapacité du marché de la conversion, qui devrait se prolonger plusieurs années encore compte tenu de la persistance des matières secondaires et des stocks des électriciens, en particulier les électriciens japonais affectés par l'arrêt d'une part significative de leur parc nucléaire. Ces tendances sont illustrées au travers des projections UxC des prix spot et long terme (LT) en Figure 4.14.

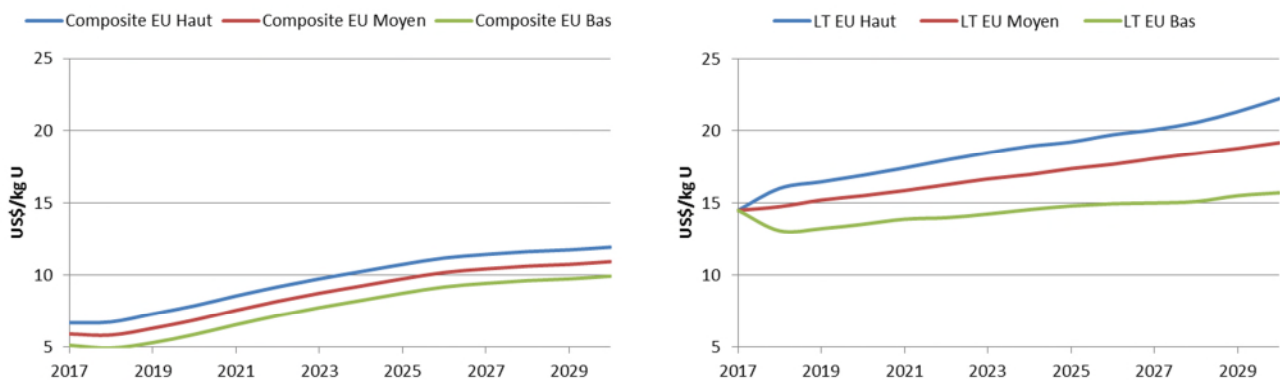


Figure 4.14 – conversion projections UXC¹⁴ Spot et Long Terme (LT)

¹⁴ Ux Consulting Company [https – www.uxc.com](https://www.uxc.com) – Conversion Market Outlook – mai 2017

Pour le cas de référence de l'économie du recyclage de l'uranium appauvri, il a été retenu un prix de revente de la composante conversion de l'UF₆ naturel produit par ré-enrichissement correspondant au prix LT actuel à \$14/kgU (cf Figure 4.5). Dans un cas défavorable où ce prix resterait aux environs de \$7/kgU, le coût de production d'U₃O₈ est marginalement affecté à la hausse comme le présente la Figure 4.15 ci-dessous.

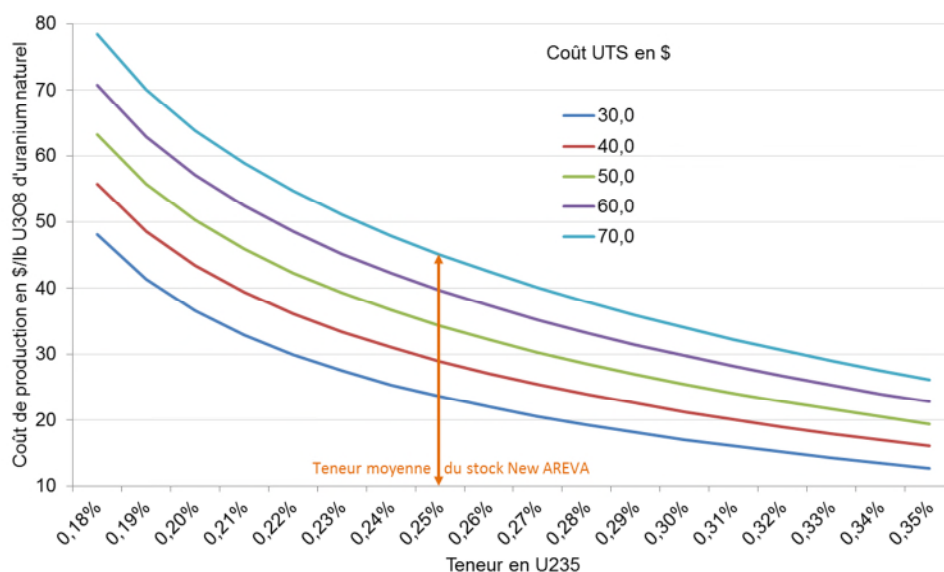


Figure 4.15 : Coût de production d'uranium naturel sous forme U₃O₈ si prix de revente de la composante conversion dans l'UF₆ produit est de \$7/kgU

4.2.2.1.3 Influence du marché de l'enrichissement

Le marché de l'enrichissement connaît aussi une période de surcapacité actuellement. Si New AREVA est peu affectée par cette situation pour raison de taille et de politique de contractualisation centrée sur les électriciens aux stratégies d'approvisionnement long terme, les autres enrichisseurs souffrent de surcapacités chroniques car ils ont développé des capacités plus rapidement que la demande effective.

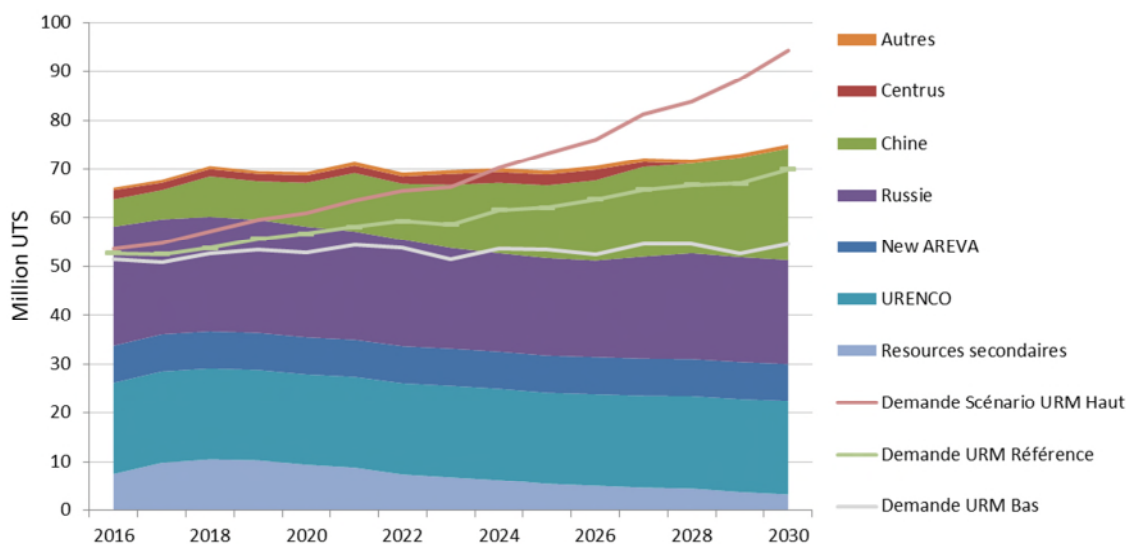


Figure 4.16 : Surcapacité persistante sur le marché de l'enrichissement¹⁵

¹⁵ Source UXC – Enrichment Market Outlook Q2 - 2017

Cet état peut durer jusqu'à la moitié de la prochaine décennie.

Ainsi, si des opportunités d'achats d'UTS à très bon prix auprès des autres enrichisseurs en surcapacité rendaient intéressant économiquement un ré-enrichissement de l'uranium appauvri à l'étranger, New AREVA serait en mesure de contractualiser très rapidement, en pilotant les envois d'uranium appauvri en fonction de leur teneur en U235 (cf. Figure 4.3) et du prix de vente de l'uranium naturel ainsi produit.

A noter qu'Urenco et Tenex utilisent leurs capacités pour ré-enrichir leurs propres stocks d'uranium appauvri.

4.2.2.2 Perspectives de production d'uranium naturel

Comme évoqué précédemment, la pertinence d'utiliser le ré-enrichissement pour valoriser l'uranium appauvri doit s'apprécier économiquement par le coût de production de l'uranium naturel issu de ce ré-enrichissement, et la valeur que New AREVA pourra en tirer. Le raisonnement ci-dessous distingue les opportunités à court-moyen terme (horizon pré-2025) et long terme (post-2025).

Les analyses présentées font apparaître les hypothèses suivantes (en monnaie constante \$₂₀₁₇) :

- Conversion : prix de marché à 7\$/kgU sur le court-moyen terme, et 14\$/kgU sur le long terme.
- Enrichissement : prix de marché à 40-50\$/UTS sur le court-moyen terme et 70\$/UTS sur le long terme.

On notera que ces valeurs ne reflètent pas forcément la stratégie commerciale de New AREVA.

La pertinence économique d'une « production » d'uranium naturel à ces coûts à partir du stock d'uranium appauvri détenu par New AREVA peut être analysée à partir des graphes qui suivent.

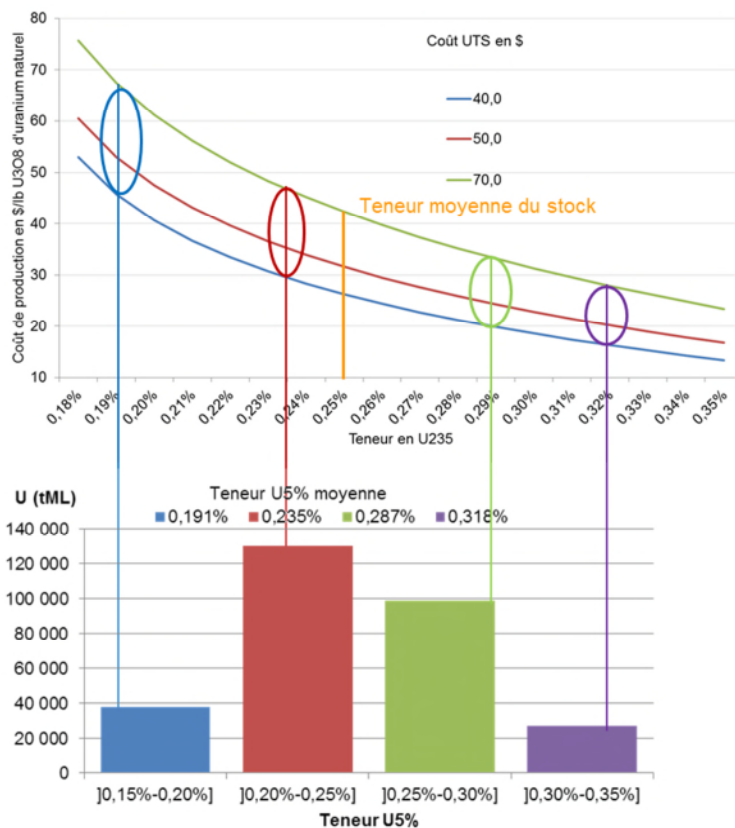


Figure 4.17 : pertinence économique de la valorisation du stock détenu (prix de vente de la composante conversion à 14\$/kg)

Le tableau qui suit illustre le coût moyen de production d'uranium naturel à partir du stock actuellement détenu (teneur moyenne en ^{235}U de 0,25%) estimé sur la base des prix de référence évoqués ci-avant (conversion – enrichissement).

	Court-moyen terme	Long terme
UTS	40\$	70\$
Conversion ¹⁶	7\$/kg U	14\$/kg U
Production	30\$/lb U_3O_8	45\$/lb U_3O_8

Ces valeurs sont à mettre en regard des coûts de production minière évoqués au paragraphe 4.2.2.2.1 et de leur impact sur l'évolution du prix de vente de l'uranium (cf projections UXc en Figure 4.18). Elles montrent que cette ressource est un élément important de diversification du portefeuille minier de New AREVA sur le long terme ; cette diversification est et restera un atout majeur aux yeux des grands électriciens mondiaux.

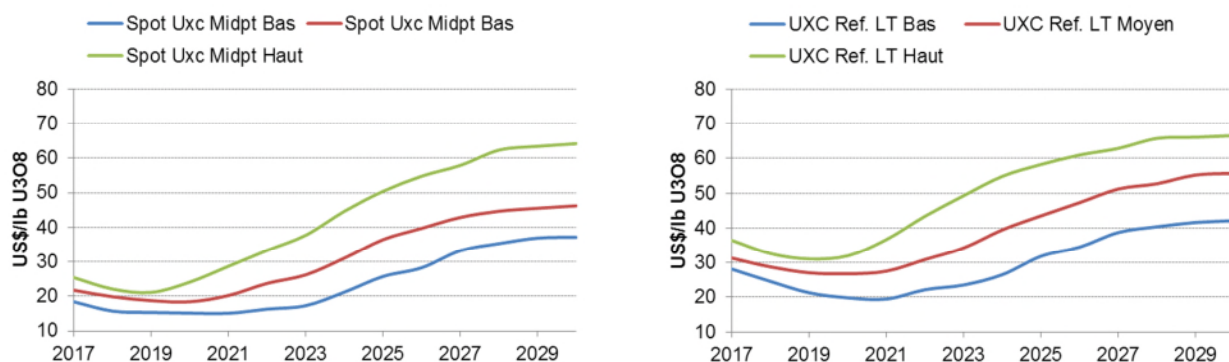


Figure 4.18 : projections UXc du prix de l'uranium naturel (SPOT et Long Terme)¹⁷

A noter qu'une large partie du stock détenu par New AREVA (> 100 000 tML) est caractérisée par une teneur supérieure à 0,25% (lots vert et violet sur la Figure 4.17) et pourrait donc être exploité dans des conditions économiques plus favorables que celles données pour cette teneur moyenne.

New AREVA n'exclut pas la possibilité, pour la production d'uranium naturel à partir de son stock, d'un recours aux capacités d'enrichissement à l'étranger conjoncturellement surcapacitaires (cf. paragraphe 4.2.2.2.1.3).

4.2.2.3 Valorisation dans les réacteurs de génération IV

Les réacteurs de génération IV pourront offrir, grâce à l'utilisation de neutrons rapides la possibilité de valoriser plus complètement l'uranium appauvri, en transformant l'uranium 238 représentant typiquement plus de 99,7 % de cette matière, en plutonium 239 fissile. Ces systèmes sont donc particulièrement intéressants pour la valorisation d'uranium appauvri issu d'un second cycle d'enrichissement, la teneur moyenne de rejet pouvant être dans ce cas inférieure à 0,15% en ^{235}U (cf. paragraphe 4.2.2.2).

La coopération mondiale dans ce domaine se poursuit en vue de la mise en œuvre d'un tel parc. L'Afrique du Sud, l'Argentine, le Brésil, le Canada, la Chine, la Corée du Sud, les Etats-Unis, la France, le Japon, le Royaume-Uni, la Russie et Suisse en partenariat avec EURATOM ont en effet fait le choix d'adhérer au forum international Générations IV « GIF¹⁸ » et de mettre ainsi en commun certains de leurs efforts de R&D pour le développement de ces nouvelles générations de systèmes nucléaires.

¹⁶ Valorisation de la composante conversion

¹⁷ UXc Uranium Market Outlook Q3 2017

¹⁸ www.gen-4.org

La Russie est particulièrement impliquée dans ce programme. Le HCTISN (Haut Comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire) dans son rapport de mission relatif¹⁹ aux échanges internationaux liés au traitement de l'uranium dont l'uranium appauvri devenant propriété de l'enrichisseur, souligne « la détermination affichée par la Russie de mettre en œuvre des réacteurs à neutrons rapides à l'échelle industrielle » et que « comme corollaire, les autorités russes affirment très clairement que l'uranium appauvri issu du processus d'enrichissement est une matière radioactive, et non un déchet, valorisable dans les réacteurs à neutrons rapides lorsque la filière sera opérationnelle industriellement ». La Russie possède selon le HCTISN « une vision stratégique claire de l'avenir de son industrie nucléaire. Ainsi, l'objectif de moyen terme affiché est un cycle du combustible nucléaire « fermé » grâce au développement d'un parc commercial de réacteurs à neutrons rapides intégrant les dernières avancées en matière de sûreté, fondé sur une expérience déjà longue et conséquente dans la filière sodium, et exportable à l'international. L'uranium appauvri entreposé en Russie (dont celui issu de l'uranium de retraitement français) fait partie intégrante de cette stratégie, en tant qu'une ressource future ».

L'importance du développement en France de cette nouvelle génération de réacteurs est soulignée dans le volet relatif à l'offre énergie de la Programmation Pluriannuelle de l'Energie²⁰ (PPE) fin 2016.

La réalisation d'un démonstrateur technologique est une étape clé dans la mise en œuvre industrielle de ces réacteurs.

Les études de conception de ce démonstrateur dénommé « ASTRID » initiées en 2010 sous la maîtrise d'ouvrage du CEA et en coopération avec AREVA et EDF se poursuivent donc, conformément aux orientations de la PPE. La phase d'avant-projet sommaire s'est terminée fin 2015. Le projet est entré dans sa phase d'avant-projet détaillé début 2016, avec l'objectif de finaliser cette phase fin 2019.

Les quantités d'uranium appauvri qui pourraient être utilisées dans un futur parc de réacteurs de quatrième génération sont en cours d'estimation dans le cadre de la réponse apportée par le CEA, en coopération avec AREVA et EDF au titre de l'Article 51 de l'Arrêté PNGMDR qui dispose que : « Le CEA remet au ministre chargé de l'énergie avant le 30 juin 2018 un inventaire prospectif entre 2016 et 2100 des matières et des déchets radioactifs présents dans les combustibles usés qui seraient produits par le parc de réacteurs électronucléaires français selon différents scénarios, notamment dans le prolongement de ceux étudiés avec EDF et AREVA au titre du PNGMDR 2013-2015 »

Par ailleurs, le CEA, en lien avec EDF et New AREVA, élabore dans le cadre du PNGMDR 2016 – 2018 (Article 11 de l'Arrêté) un programme d'études qui pourraient être menées dans le démonstrateur afin de démontrer, à une échelle représentative, la capacité des technologies proposées à :

- multi-recycler le plutonium contenu dans les combustibles usés en utilisant de l'uranium appauvri, en particulier les stocks de combustibles usés MOx issus des réacteurs à eau ;
- stabiliser ou réduire les inventaires en plutonium par une consommation accrue de cette substance ;
- transmuter l'américium.

L'uranium appauvri, celui issu d'un second cycle d'enrichissement permettra donc de répondre à plus long terme aux besoins du parc mondial de réacteurs de génération IV.

¹⁹ Rapport de mission : Déplacement d'une délégation du HCTISN en Russie du 1er au 6 avril 2012 (21 juin 2012)

²⁰ <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/programmations-pluriannuelles-lenergie-ppe>

4.2.2.4 Autres perspectives de valorisation

4.2.2.4.1 Contexte

L'uranium appauvri présente outre son potentiel énergétique de nombreuses propriétés dont certaines ont déjà été exploitées.

Les opportunités de valoriser l'uranium appauvri ont fait l'objet d'initiatives internationales dès la fin des années 1990. L'OCDE et l'AIEA ont par exemple décidé en 1999 d'établir un groupe d'experts sur la gestion et les utilisations possibles de l'uranium appauvri, autres que la production électronucléaire. Outre le partage d'expérience sur les utilisations déjà mises en œuvre, l'objectif de ce groupe était d'explorer les domaines où des projets internationaux de coopération pourraient être établis. Les résultats de cette étude font l'objet d'un rapport publié en 2001 analysant les utilisations et pistes envisagées, et en particulier, les utilisations comme matériaux de blindage, matériaux de substitution dans les stockages, contreponds, filaments d'ampoules, volants d'inertiel pour le stockage de l'énergie, catalyseurs ou semi-conducteurs²¹.

Parallèlement au lancement de ces travaux une étude des publications scientifiques hors applications nucléaires dont le résultat est présenté sur la figure ci-dessous met en évidence un nombre croissant de publications sur l'utilisation de cette matière.

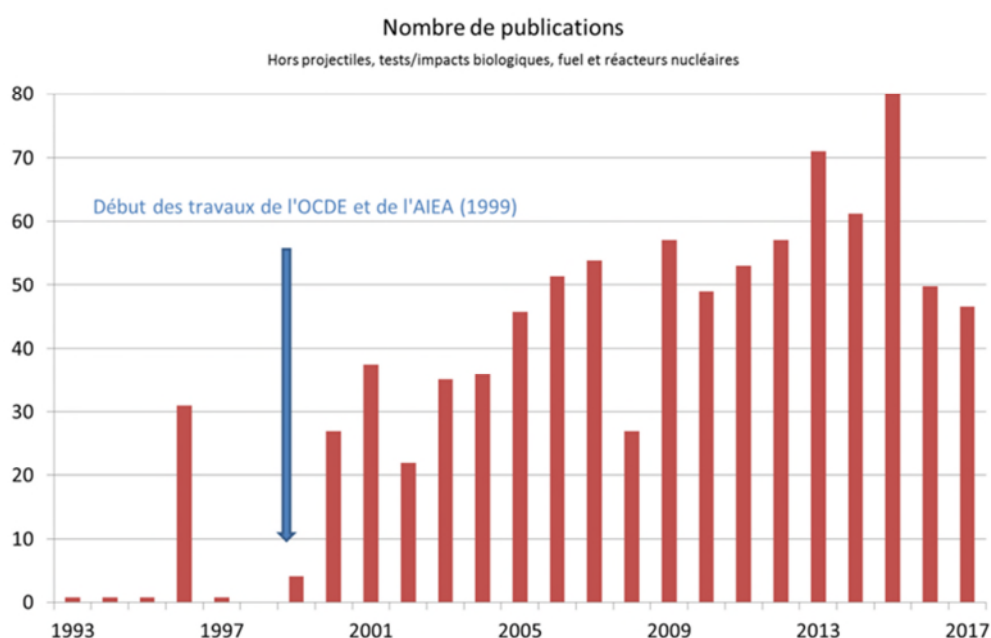


Figure 4.19 : nombres de publications relatives à l'uranium

4.2.2.4.2 Applications ciblées par New AREVA

Après une période d'implication limitée liée à une situation financière difficile, New AREVA contribue au regain d'activités de recherche liée à la valorisation de l'uranium appauvri.

²¹ Gestion de l'uranium appauvri – rapport établi conjointement par l'AEN/OCDE et l'AIEA - 2001

New AREVA a financé des travaux dans le cadre de missions de « Doctorant – conseil », permettant d’explorer les caractéristiques physico-chimiques de certains actinides et lanthanides (éléments ou isotopes) en relation avec de possibles applications du futur (cf Figure 4.20). Ces travaux ont permis d’identifier les propriétés de l’uranium pouvant être mises en œuvre dans des domaines techniques ouvrant la porte à des applications ou des projets que New AREVA considère comme créateur de valeur.

Le tableau présenté ci-après donne une vision synthétique des usages possibles de l’uranium appauvri. New AREVA poursuit ses efforts de développement sur l’ensemble des sujets, à l’exception du premier.

	Précisions	Usages potentiels	Ressources
Densité et dureté	Métal très dur et dense (densité 19 à comparer à 13 pour le plomb)	Masses mécaniques (volants inertiels, contrepoids, quilles de bateau) Pointes de munitions perforantes	
Imperméabilité radiologique	Atténue efficacement les effets de la radioactivité	Blindage radiologique (conteneurs, entreposages ²² et stockages de substances radioactives)	Ressources internes + contrats de recherche + essais laboratoires
Propriétés électrochimiques	4 niveaux d’oxydation / potentiel redox important	Batteries	Ressources internes + essais laboratoires
Propriété de catalyse	Utilisable comme (ou support de) catalyseur (Zn, Co, Au,...)	Catalyseurs	Ressources internes + contrat de recherche
Propriétés électroniques	UO ₂ semi-conducteur	Convertisseur thermoélectrique Panneaux solaires photovoltaïques	Ressources internes + contrat de recherche avec essais laboratoires
Propriétés thermiques	Bonne tenue haute température	Convertisseurs thermoélectrique pour des utilisations à hautes températures	Ressources internes
Propriétés de solvation/désolvation		Stockage thermo-chimique réversible de chaleur	Ressources internes + contrats de recherche

Figure 4.20 – Recherches et développements relatifs à la valorisation de l’Uappauvri - Mobilisation de New AREVA

²² Des barrières de radioprotection sont déjà utilisées dans certains entreposages du Groupe

New AREVA dispose d'une expertise et de compétences techniques et industrielles uniques dans le domaine de la chimie de l'uranium, développées dans le cadre de ses activités nucléaires. Ces atouts bénéficieront au développement des solutions listées ci-avant.

New AREVA progresse sur ces sujets avec l'aide de scientifiques, de laboratoires et d'industriels qui sont pertinents pour chacun des projets. Ces activités sont portées par des équipes pluridisciplinaires constituées d'experts des entités de R&D, d'analystes de la direction de l'Innovation, de commerciaux et de responsables de projets. Elles sont suivies au quotidien et les projets correspondants sont présentés aux directions concernées afin de garantir un pilotage serré compte tenu de l'importance de ces objectifs pour New AREVA.

Des ressources externes (cf Figure 4.20) viennent compléter les ressources internes notamment au travers de contrats de recherche avec des étudiants chercheurs. New AREVA fait aussi appel à des laboratoires capables de mettre en œuvre des moyens d'essais permettant de valider ou vérifier les tendances ou les résultats anticipés par les études bibliographiques ou théoriques.

Parallèlement New AREVA élabore des modèles économiques supportant la mise en œuvre de ces technologies ; ces modèles sont évalués avec des industriels des secteurs visés afin d'en valider la pertinence et de les affiner.

A noter que des échanges récurrents ont lieu à l'échelle internationale sur les programmes de valorisation de l'uranium appauvri. Comme New AREVA, d'autres enrichisseurs tel que CNNC sont en train de consolider leur stratégie de valorisation de leur stock en complément de la stratégie de ré-enrichissement envisagée : à titre d'illustration, CNNC a fabriqué, en 2016, des volants d'inertie à base d'uranium appauvri afin d'équiper certaines pompes noyées pour les réacteurs CAP 1400²³.

²³ IAEA/ASTM – June 2016, 14/16 Workshop on secondary uranium resources - Management & Utilization of Depleted Uranium in China – CNNC

4.3 Conclusion

L'uranium appauvri constitue l'une des ressources clé permettant de construire des offres commerciales couvrant le long terme afin de répondre aux besoins du parc électronucléaire mondial actuel et futur.

Le stock d' U_3O_8 présent sur le territoire national représente un gisement qui peut être « exploité » afin de sécuriser l'offre New AREVA de fourniture d'uranium naturel ; il représente l'équivalent de plus de 60 000 tonnes d'uranium naturel correspondant au besoin annuel du parc mondial actuel.

Le poids de cette ressource dans le portefeuille de New AREVA est réévalué périodiquement car il dépend d'une optimisation économique entre le coût de l'uranium naturel et le coût « d'exploitation » de ce stock (principalement conversion et enrichissement). Il est également lié à l'évolution de nos stratégies de production minière et de recours à d'autres ressources secondaires.

La perspective d'un recours croissant à l'énergie nucléaire, notamment dans les pays émergents, est soulignée par différentes organisations internationales.

Selon un scénario « prudent » d'évolution du parc nucléaire mondial, l'évolution de la capacité installée nécessiterait la mise en exploitation de nouvelles mines à l'horizon 2025-2030.

Sur une base de 300 000 t d'Uranium appauvri à une teneur moyenne de 0,25%, il est possible de produire près de 60 000 tU d'uranium naturel (soit environ 150 millions lb U_3O_8) à un coût de production entre \$30 et \$45/lb U_3O_8 , en fonction du coût des services d'enrichissement, voire moins si l'on considère les lots les plus riches en ^{235}U . Selon l'OCDE et l'AIEA, plus de 80% des ressources minières raisonnablement assurées correspondent à des coûts de production supérieurs à 50 \$/lb U_3O_8 ²⁴.

Cette mine domestique s'insère donc facilement à l'avant de projets aux coûts de production similaires car c'est une mine au fonctionnement souple, ne nécessitant aucun investissement et basée sur le territoire national. Comparé à une durée moyenne de 10 ans de développement pour une mine classique, le temps nécessaire entre la date de décision du ré-enrichissement et sa mise en œuvre est de quelques mois seulement. Cette ressource complète le portefeuille minier diversifié de New AREVA sur le long terme ; cette diversification est et restera un atout majeur aux yeux des grands électriciens mondiaux.

Par ailleurs, New AREVA n'exclut pas la possibilité, pour la production d'uranium naturel à partir de son stock, d'un recours aux capacités d'enrichissement à l'étranger conjoncturellement surcapacitaires.

Une partie du stock permettra par ailleurs de répondre aux besoins du parc mondial de réacteurs de nouvelles générations.

Enfin, un programme d'études et de recherche est actuellement mené par New AREVA pour évaluer les possibilités d'utilisation de l'uranium appauvri à d'autres fins que la production électronucléaire ; ce programme inclut notamment la consolidation de pistes prometteuses avec l'objectif de confirmer leur d'un point de vue technique, d'estimer le volume des marchés associés et ainsi les quantités. Un bilan d'étape pourra être envisagé dans le cadre de la prochaine édition du PNGMDR.

²⁴ 2016 Uranium 2016:Resources, Production and Demand OECD 2016- NEA N° 7301

5 VALORISATION DE L'URANIUM DE RETRAITEMENT

L'uranium extrait des combustibles usés dans les usines de traitement constitue environ 95 % de la masse du combustible usé et contient toujours une part significative d'isotope ^{235}U . La valeur énergétique de l'URT est comparable à celle de l'uranium naturel, les teneurs en ^{235}U étant légèrement supérieures à 0,7% pour des combustibles eau légère ayant subi des taux de combustion de 45 000 à 55 000 MWj/t. Elle varie toutefois selon la technologie du réacteur dans lequel cette matière est utilisée : la présence d'isotopes pairs dans l'URT entraîne en effet une légère perte de réactivité dans les réacteurs à eau légère, alors que les réacteurs à eau lourde y sont peu sensibles. L'URT provenant de combustibles de réacteurs de recherche ou de propulsion navale peut présenter des teneurs en ^{235}U bien supérieures, du fait de l'enrichissement initial de ces combustibles souvent élevé.

L'URT est récupéré dans les usines de traitement-recyclage (La Hague et anciennement Marcoule, en France) sous forme de nitrate d'uranyle. Il est oxydé et entreposé sous forme d' U_3O_8 sa forme la plus stable et constitue un stock stratégique de matière valorisable.

5.1 Procédé de valorisation

5.1.1 Valorisation de l'URT sur le territoire français

Le combustible URE est fabriqué à partir de l'URT issu du traitement des combustibles UNE usés (URT 1^{er} cycle). L'URT contient encore une part significative d'isotope ^{235}U fissile (de l'ordre de 0,8 à 0,9% à comparer à environ 0,71% pour l'uranium naturel). Comme l'uranium naturel, il nécessite donc d'être ré-enrichi en vue de son recyclage sous forme de combustible URE. Cependant, cet uranium contient aussi des isotopes dont l'uranium naturel est dépourvu :

- ^{236}U et ^{234}U qui capturent des neutrons lorsqu'ils sont en réacteur, ils sont dit « neutrophages » et réduisent le rendement global de la réaction ; cet effet doit être compensé par un enrichissement en ^{235}U plus élevé que celui requis pour un combustible UNE, à performance énergétique égale.
- ^{232}U présent en faible proportion mais ayant des descendants très radioactifs (émetteurs gamma intenses) ; la présence de cet isotope requiert des dispositions particulières, notamment en termes de radioprotection lors de la mise en œuvre de l'URT pour son recyclage sous forme d'URE.

Le recours au stock d'URT dépend prioritairement du contexte technico-économique, et en particulier du différentiel de coût entre la filière URT et la filière uranium naturel.

Une partie de l'URT d'EDF a été enrichie pour la fabrication de combustibles URE qui ont été chargés dans les réacteurs de Cruas autorisés à cet effet. Le recyclage de l'URT dans les réacteurs de Cruas a débuté en 1994 et a été suspendu en 2013 : 4 350 tonnes d'URT ont ainsi pu être recyclées.

Les réacteurs de quatrième génération permettront de tirer pleinement partie du potentiel énergétique de l'URT en particulier celui issu du traitement des MOX et URE usés (cf. paragraphe 5.2.2.1).

5.1.2 Valorisation de l'URT à l'étranger

Dans le monde, les quantités cumulées d'URT valorisées à fin 2016 s'élevaient à environ 47 000 tonnes²⁵ d'uranium naturel équivalent²⁶.

Cette valorisation dans 74 réacteurs de différents types (cf. Fig. 5.1), a débuté dès les années 1980 et se poursuit en Europe, aux Etats-Unis d'Amérique, en Russie et en Asie.

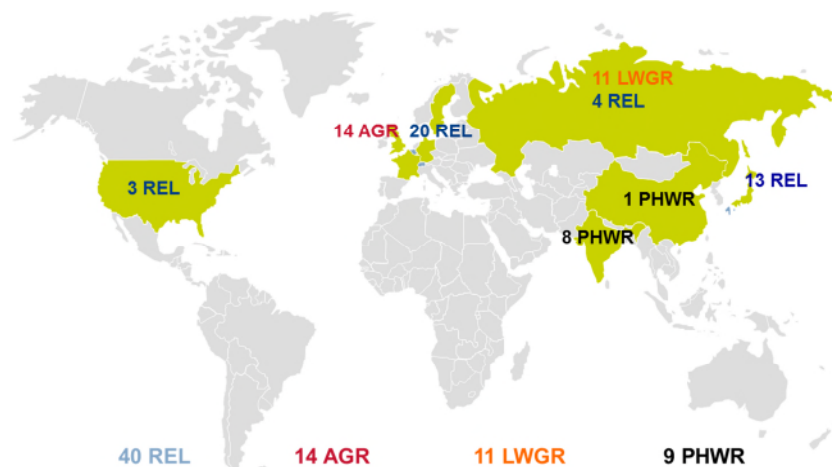


Figure 5.1 – Expérience de valorisation de l'URT dans le monde

En Europe, la quantité d'URT issu du traitement de combustible usé dans les usines de La Hague et de Sellafield, et recyclé dans 34 réacteurs européens (7 pays, cf. Fig 5.2) s'élevait à plus de 31 500 tonnes d'uranium naturel équivalent.²⁷

Cette quantité représente la moitié de la demande mondiale 2016 en uranium naturel ou encore plus de 5 années de la demande nationale.

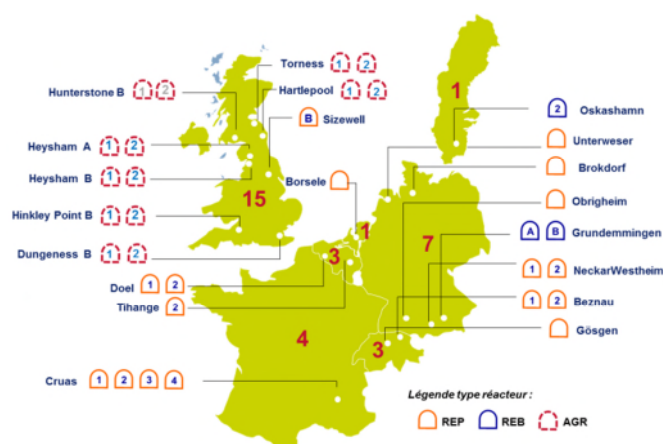


Figure 5.2 – Expérience de valorisation de l'URT en Europe

²⁵ Consolidation par NEW AREVA de données issues de sources diverses dont Fuel Market Report WNA 2017, AIEA et IBR®

²⁶ Cette unité est basée sur l'hypothèse d'un enrichissement en ²³⁵U à 0.711% sans compensation relative à la présence d'isotopes ²³⁴U et ²³⁶U dans l'URT

²⁷ Sources NEW AREVA

Aux Etats-Unis, la valorisation de l'URT a débuté en 2005 et se poursuit actuellement au travers du programme BLEU²⁸. Ce programme vise à recycler de l'uranium de retraitement à haute teneur fissile issu de programmes de la défense.

A fin 2016, la quantité d'URT valorisé dans les réacteurs de l'électricien TVA représentait environ 7 000 t d'uranium naturel équivalent²⁹ (cf. Fig. 5.3)

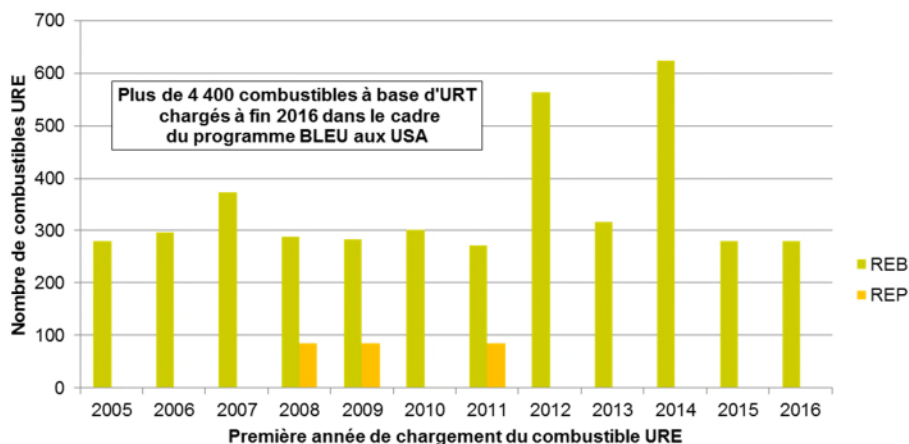


Figure 5.3 – Valorisation par l'électricien TVA de l'URT dans 3 réacteurs dédiés des centrales de Brown-Ferry et de Sequoya aux Etats-Unis

La Russie est un autre acteur majeur de l'industrie du recyclage de l'URT que ce soit pour des clients étrangers ou pour une utilisation domestique. A fin 2016, la quantité d'URT valorisé dans les réacteurs de Rosatom, notamment dans 11 réacteurs RBMK³⁰, représentait plus de 5 000 t³¹ d'uranium naturel équivalent (cf. Fig. 5.4).

A noter que le traitement des combustibles usés des réacteurs VVER-440 ne permet pas de couvrir les besoins russes en URT nécessaires à l'alimentation en combustible URE de son parc RBMK.

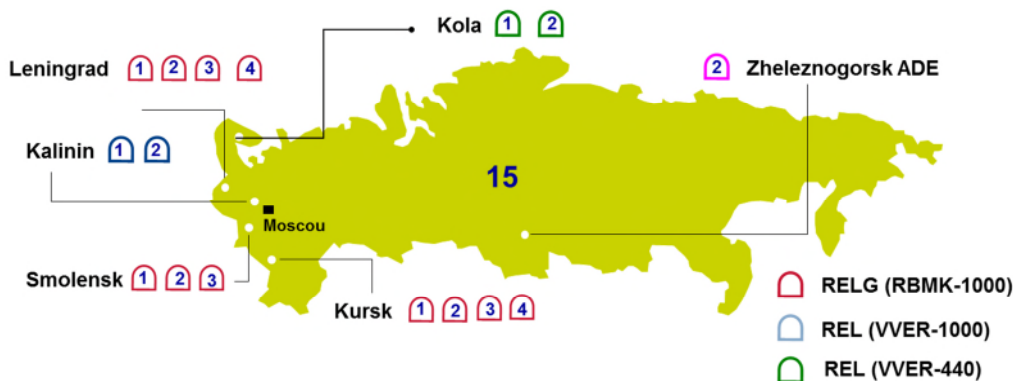


Figure 5.4 – Expérience russe de valorisation d'URT dans 15 réacteurs de type REL et RBMK

²⁸ BLEU, pour Blended Low Enriched Uranium

²⁹ Sources US NNSA National Nuclear Security Administration – Office of Fissile Material Administration – TVA

³⁰ Reactor Bolchoe Molchnastie Kipiachie – Réacteur à eau Bouillante de Grande Puissance

³¹ Consolidation par NEW AREVA de données issues de sources diverses dont l'AIEA et IBR

Le Japon, avant l'accident de Fukushima, a recyclé plus de 1500 t³² d'URT dans 13 réacteurs (cf. Fig. 5.5).

Le redémarrage progressif du parc nucléaire devrait être accompagné d'une reprise du recyclage de l'URT au Japon.

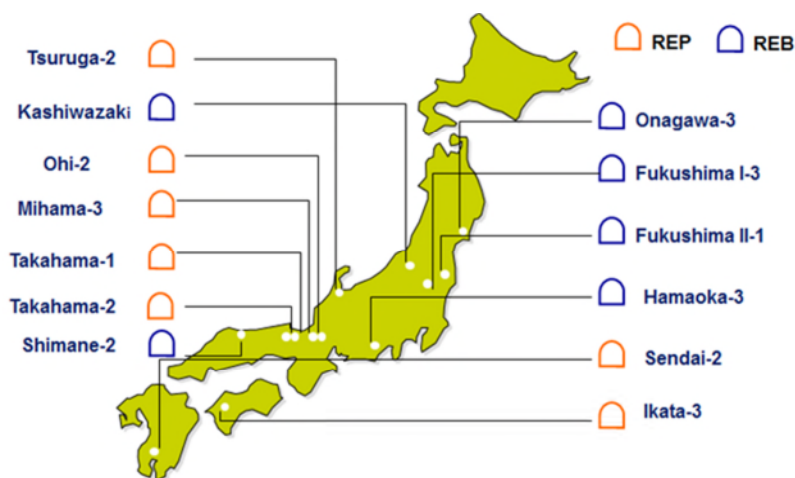


Figure 5.5 – Expérience japonaise de valorisation d'URT dans 13 réacteurs de type REL

L'Inde, dans un souci de sécurisation des ressources en uranium a toujours su valoriser l'URT, y compris l'URT issu du traitement des combustibles usés PHWR³³, caractérisés par un faible enrichissement initial en ²³⁵U. L'Inde valorise actuellement de l'URT dans 8 réacteurs (cf. Figure 5.6.).

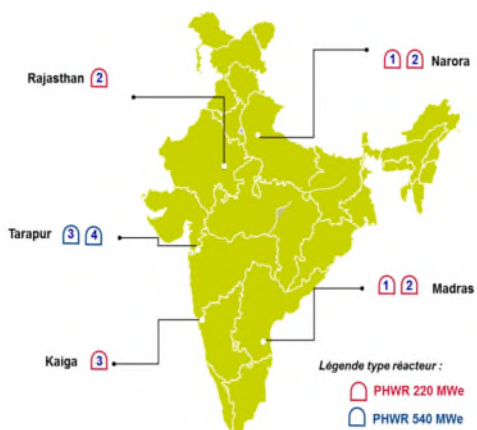


Figure 5.6 – Expérience indienne de valorisation d'URT

La Chine, a lancé un programme ambitieux d'évaluation de synergies entre les flux des matières issues du traitement des réacteurs REL et ceux nécessaires à l'alimentation des PHWR (CANDU). Des essais ont été réalisés avec succès dans le réacteur n°1 de la centrale de Qinshan III en 2011 et une ligne de fabrication de combustible CANDU de l'usine CNNC de Baotou a été adaptée à l'utilisation de l'URT (Fig. 5.7). Cette modification permet l'utilisation de « NUE » (Natural Uranium Equivalent, mélange

³² Source New AREVA

³³ PHWR Presurized Heavy Water Reactor – réacteur à eau lourde.

d'URT et d'U appauvri pour se rapprocher des caractéristiques de l'Uranium naturel) dans les CANDU Chinois à grande échelle, l'objectif étant un chargement du cœur avec 100% de combustible NUE.

Dans le cadre de ce programme, la Chine a procédé à l'achat au Royaume-Uni de plus de 100 t d'uranium de retraitement³⁴ en vue de la fabrication de recharges pour un cœur 100% « NUE » du réacteur de Qinshan III.

A titre d'illustration, une recharge complète d'un CANDU de 650 MWe Net nécessite l'équivalent d'environ 115 tU d'uranium naturel. Ceci correspond à un peu moins d'une centaine de tonnes d'URT à environ 0,85% ²³⁵U, dilué avec de l'uranium appauvri pour un produit fini d'environ 0,71 % en ²³⁵U.

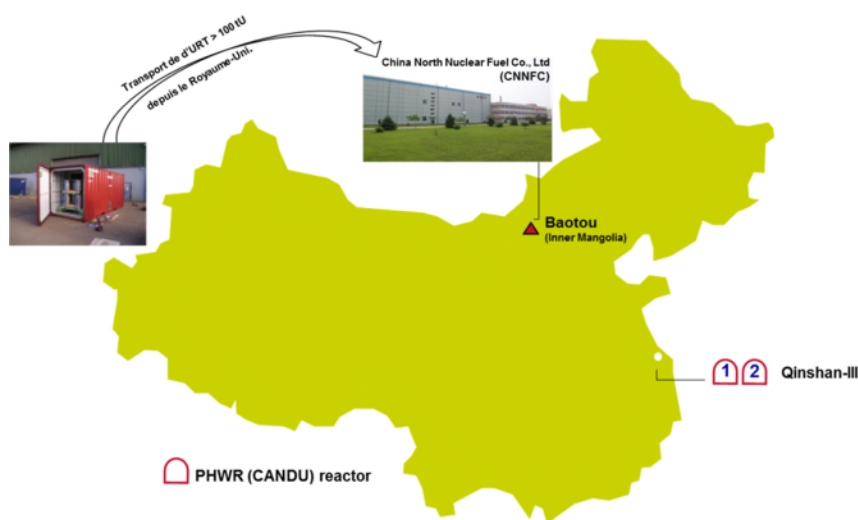


Figure 5.7 – Expérience chinoise de valorisation de l'URT

Ce programme confirme l'ambition de la Chine de fermer le cycle du combustible.

En conclusion, l'expérience mondiale de valorisation de l'URT est significative. L'URT constitue une ressource secondaire importante qui permet et permettra de répondre aux besoins du parc électronucléaire mondial actuel et futur. La diversité du parc mondial (REL, RBMK, PHWR, AGR ...) permet d'optimiser le recyclage de l'URT en fonction des caractéristiques requises pour chaque type de réacteur (isotopie de la matière d'alimentation en particulier) ; par exemple le mélange et la dilution de lots de caractéristiques et natures différentes comme actuellement le « NUE » en Chine ou l'URT provenant du traitement de différents types de combustibles, notamment REL, UNGG, PHWR, MAGNOX et des combustibles de la Propulsion Navale, sont des leviers pour une telle optimisation.

³⁴ Source NDA / AIEA.

5.2 Analyse de l'adéquation entre perspectives de valorisation et quantités détenues et à détenir

5.2.1 Quantités détenues et à détenir

L'URT présent sur le territoire français est principalement propriété d'EDF et de New AREVA, et dans une moindre mesure du CEA. A fin 2015, la quantité d'URT détenue sur le territoire français était de 29 180 tURT³⁵ réparties de la manière suivante : environ 9 000 tURT dit UNGG c'est-à-dire issu du traitement des combustibles usés UNGG (Uranium Naturel Graphite Gaz), le reste d'origine REP. Les caractéristiques de l'URT UNGG et REP ne sont pas identiques, les taux de combustion et les performances du procédé de traitement ayant évolué, impactant ainsi la composition du nitrate d'uranyle issu du traitement des combustibles usés : l'URT UNGG a des teneurs en U²³² et U²³⁵ plus faibles que l'URT REP, par exemple 0,4% en U²³⁵ contre 0,8% dans l'URT REP.

Le recyclage de l'URT étant temporairement suspendu, le stock d'URT d'EDF s'incrémente chaque année d'environ 1 000 tURT/an.

5.2.2 Perspectives de valorisation

5.2.2.1 Perspectives de valorisation sur le territoire français

La stratégie de gestion d'EDF est la reprise du recyclage de l'URT dans des conditions technico-économiques acceptables : dans un premier temps dans ses réacteurs à eau légère, de Cruas et/ou du palier 1300 MWe, puis dans les EPR dans un second temps. Elle est exposée dans le livrable remis au titre de l'article 6 de l'arrêté PNGMDR qui dispose que : « *EDF remet au ministre chargé de l'énergie avant le 31 décembre 2017 un document présentant sa stratégie permettant de réduire à moyen terme la croissance des stocks d'uranium de retraitement détenus puis d'assurer le plafonnement de ces stocks. Les étapes clés et leurs échéances temporelles associées pour assurer le suivi de cette stratégie sont identifiées dans cette étude. L'ASN est saisie pour avis sur cette étude.* »

La valorisation de l'URT pourrait passer par une stratégie de mélange des lots UNGG / REP. À plus long terme, l'URT, en particulier celui issu du traitement des MOX et URE usés est envisagé comme support aux combustibles des réacteurs de quatrième génération à neutrons rapides, l'enrichissement résiduel permettant de réduire le besoin en plutonium.

³⁵ Inventaire National – Bilan à fin 2015 – source ANDRA

5.2.2.2 Perspectives de valorisation à l'étranger

L'URT (hors propriété d'EDF et CEA) détenu ou à détenir par New AREVA notamment dans le cadre de contrats de traitement de combustibles étrangers a vocation à être recyclé dans les réacteurs du parc mondial, répondant aux besoins du marché mondial tels que décrits au paragraphe 5.1.2.

6 VALORISATION DU PLUTONIUM

Le plutonium présente un potentiel énergétique considérable. En effet, en termes énergétiques, 1 seul g de plutonium équivaut à environ une tonne de pétrole.

Ce paragraphe traite du plutonium séparé issu du traitement des combustibles usés. Les perspectives de valorisation du plutonium contenu dans les combustibles dont le traitement est différé (MOX et URE usés par exemple) sont décrites au paragraphe 2.1.

Pour rappel, un combustible usé à l'oxyde uranium de type eau légère contient environ 1 % de plutonium (en masse). Le plutonium français est principalement la propriété d'EDF, dans une moindre mesure de New AREVA et pour une part nettement plus faible, du CEA.

6.1 Procédé de valorisation

Une fois mis en solution, extrait et séparé des autres substances contenues dans le combustible usé, le plutonium est purifié et conditionné dans les ateliers R4 et T4 de l'usine de La Hague sous forme stable de poudre d'oxyde PuO_2 . Pour des raisons techniques et de protection physique, le plutonium est recyclé en ligne.

Le plutonium est ensuite valorisé sous forme de combustible MOX, un mélange d'oxyde d'uranium appauvri et d'oxyde de plutonium, selon les étapes décrites ci-après.

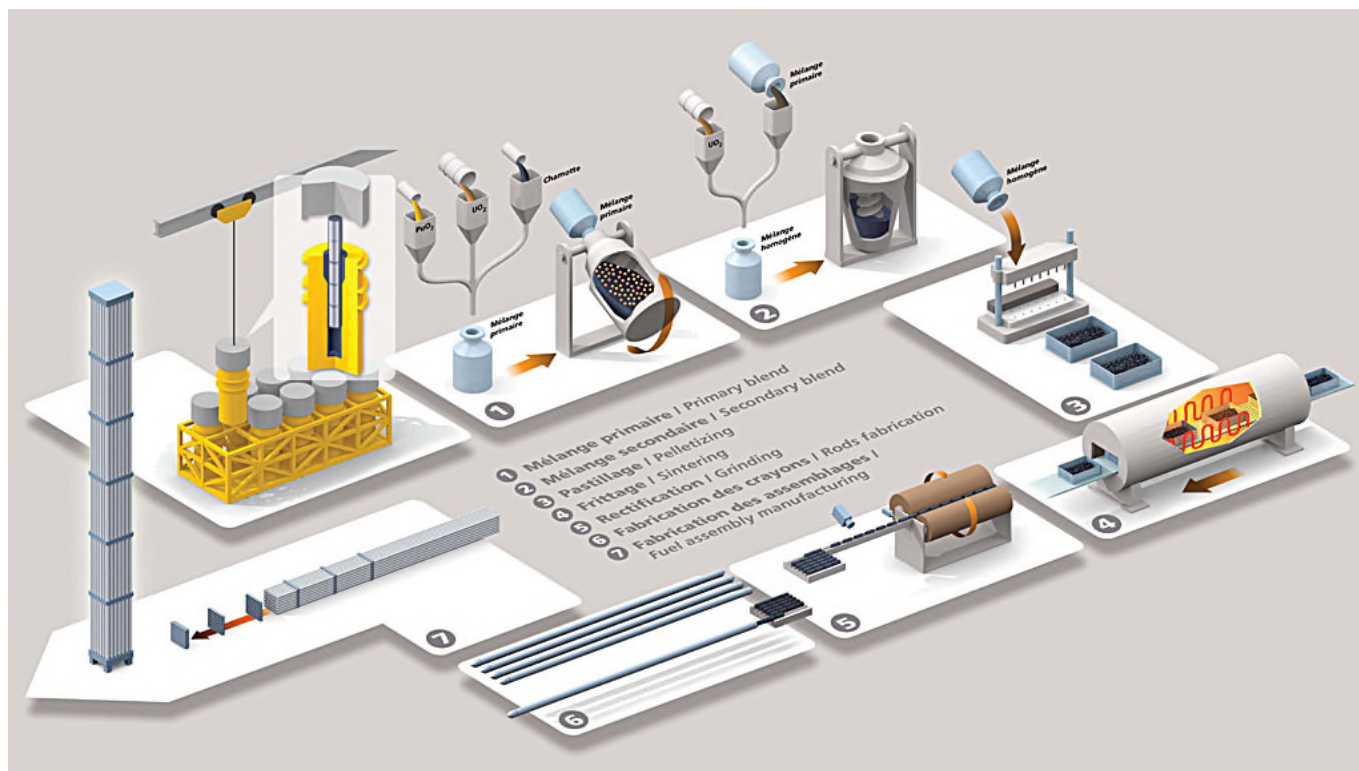


Figure 6.1 – Procédé de valorisation du plutonium séparé sous forme de combustible MOX

La fabrication du combustible MOX s'apparente à celle des combustibles à oxyde d'uranium. Elle se déroule selon les phases suivantes:

- La production d'un mélange primaire, à partir de poudres d'oxyde de plutonium, d'oxyde d'uranium appauvri et de « chamotte » : le procédé mis en œuvre permet de recycler au travers de cette « chamotte » (cf. repère ❶ Figure 6.1) des rebuts de fabrication. Les rebuts qui ne peuvent être recyclés directement sont envoyés à l'usine de La Hague en vue de leur traitement. (cf. paragraphe 2.2.2.3).
- La production du mélange secondaire (cf. repère ❷ Figure 6.1) : de l'oxyde d'uranium appauvri est ajouté au mélange primaire pour obtenir la teneur en plutonium recherchée, entre environ 3 et 12 %, selon les besoins des réacteurs.
- Le pastillage (cf. repère ❸ Figure 6.1) : après une étape d'homogénéisation, la poudre est transférée dans des presses permettant d'obtenir des pastilles dites « pastilles crues ».
- Le frittage (cf. repère ❹ Figure 6.1) : les pastilles crues sont introduites dans des fours à haute température pour être converties en céramique.
- La rectification (cf. repère ❺ Figure 6.1) : les pastilles sont rectifiées entre deux meules afin d'obtenir le diamètre requis, au micron près. Les pastilles non conformes sont renvoyées en amont pour y être recyclées sous forme de « chamotte ».
- Le gainage (cf. repère ❻ Figure 6.1) : les pastilles sont ensuite insérées dans des tubes en alliage de zirconium appelés "crayons". Un crayon d'assemblage type REP 900 MWe mesure environ 4 mètres de long et est composé d'environ 320 pastilles en fonction des exigences des clients. Les crayons sont ensuite soigneusement nettoyés, puis contrôlés.
- L'assemblage (cf. repère ❼ Figure 6.1) : cette dernière étape consiste à insérer les crayons dans une structure métallique pour former un "assemblage". Cet assemblage constitue le produit fini livré au client. Ces assemblages sont également soumis à des contrôles de fabrication, afin de vérifier leur futur comportement en réacteur.

La teneur en plutonium des combustibles MOX est adaptée de façon à atteindre des performances équivalentes à celles de l'UOX.

Le recyclage du Pu sous forme d'assemblages combustibles MOX est mis en œuvre par EDF depuis 1987 : plus de 4900 assemblages MOX (équivalent à 2200 tML) ont été chargés dans les réacteurs d'EDF permettant ainsi la valorisation d'environ 160 tonnes de plutonium séparé.

6.2 Analyse de l'adéquation entre perspectives de valorisation et quantités détenues et à détenir

6.2.1 Quantités détenues et à détenir

Le stock au 31/12/2015 de plutonium issu des combustibles usés après retraitement s'élevait à 52 tML contre 53 tML à fin 2014.³⁶ Ce stock inclut 16 tML de plutonium issu du traitement de combustibles étrangers et destiné à la fabrication de combustible MOX pour le compte de clients étrangers.

L'inventaire de plutonium séparé n'a pas vocation à croître, puisque la politique de traitement-recyclage française reposant sur le principe d' « équilibre des flux » de plutonium, le niveau de traitement est ajusté à la capacité de recyclage de cette matière dans les réacteurs moxés ; le stock-outil de plutonium nécessaire pour assurer la production annuelle de combustible MOX peut varier d'une année sur l'autre mais reste globalement stable ; son volume répondant à des besoins de flexibilité opérationnelle.

6.2.2 Perspectives de valorisation

En France, 24 réacteurs sont aujourd'hui autorisés à charger du combustible MOX et près de 10% de l'électricité nucléaire est produite grâce à ce combustible. Les besoins en plutonium pour la fabrication du combustible MOX, de l'ordre de 10 tonnes par an, conditionnent le flux annuel des combustibles usés EDF traités dans l'usine de La Hague par New AREVA dans le but de maintenir stable l'inventaire de plutonium séparé.

EDF poursuivra cette stratégie de recyclage du plutonium séparé sous forme de combustible MOX selon le principe d'équilibre des flux. Les capacités de recyclage des tranches nucléaires du parc français conduisent à maintenir sur les court et moyen termes, le traitement d'environ 1 100 tonnes de combustibles usés par an.

La totalité du stock outil a vocation à être recyclé in fine. La quantification des perspectives de valorisation de ce stock sur le long terme (post 2040) sera notamment consolidée dans le cadre de la réponse à l'Article 51 de l'Arrêté PNGMDR (cf. paragraphe 1.3.)

³⁶ Inventaire national – Bilan à fin 2015 – source - Andra

7 VALORISATION DES MATIERES THORIFERES

Les matières thorifères considérées ici sont les nitrates de thorium et les hydroxydes de thorium détenus par New AREVA et SOLVAY. De façon générale les voies de valorisation de ces matières sont celles déjà documentées dans les études produites antérieurement dans le cadre du Plan National de gestion des Matières et des Déchets Radioactifs, en 2008, en application du décret n° 2008-357 du 16 avril 2008, ou en 2012 dans le cadre de l'article 9 du décret n° 2012-542 du 23 avril 2012, ou encore début 2015 dans le cadre de l'article 9 du décret n°2013-1304 du 27 décembre 2013.

Le présent rapport répond à la demande de mise à jour de ces précédents rapports. Toutefois, afin de constituer un rapport « autoporteur » les éléments encore valides des précédents rapports sont intégralement repris dans le texte.

7.1 Procédés de valorisation envisagés par New AREVA et SOLVAY

Les procédés de valorisation envisagés concernent ainsi soit la production d'énergie, soit le secteur médical des traitements anti-cancéreux, soit la production de terres rares.

7.1.1 Valorisation des matières thorifères pour la production d'énergie

L'utilisation du thorium dans le cycle nucléaire intervient au moment où des enjeux majeurs se présentent pour les décennies à venir :

- freiner puis réduire l'accumulation des combustibles UOX usés,
- gérer le plutonium et l'uranium issus du retraitement des combustibles usés, une activité aujourd'hui limitée au plan mondial, mais qui constitue l'option de référence pour un nucléaire durable,
- préserver la ressource naturelle en U.

Dans ce contexte, l'utilisation du thorium est désormais réétudiée car des combustibles nucléaires à base de thorium permettraient notamment :

- d'atteindre des taux de combustion plus élevés et donc de réduire la quantité de déchets ultimes,
- de réduire la production des actinides à vie longue, avec un impact positif sur le stockage des déchets radioactifs.

Le thorium est un élément fertile, qui, par capture neutronique, se transmute en élément fissile, l'uranium ²³³U, qui est fissile. Ce potentiel énergétique peut être valorisé :

- soit via une transition complète vers un cycle dit Th/²³³U au sein de réacteurs dédiés (Advanced Heavy Water Reactor (AHWR), Molten Salt Reactors (MSR), High Temperature Gas Reactors (HTGR).
- soit via une utilisation du thorium en complément du cycle U/Pu dans les parcs de réacteurs à eau légère existants (combustibles Th/Pu). En pratique, les caractéristiques de l'uranium 233 en spectre neutron thermique permettent des synergies importantes entre le cycle U/Pu classique et le cycle

Th/²³³U., ce qui permet d'envisager pour le Pu des options de multi-recyclage en réacteur à eau légère ou d'irradier avec des taux d'irradiation très élevés en HTGR.

- soit via une utilisation du thorium dans les parcs de réacteurs à eau lourde existants (PHWR) ou à venir (AFCR), les combustibles Th/U envisagés permettant également le recyclage de l'URT, issus du retraitement des combustibles usés de la filière eau légère dont le contenu résiduel en ²³⁵U est compatible avec ce type de réacteur PHWR.

Comme explicité dans les précédents rapports, le « cycle thorium », utilisant le thorium comme combustible de réacteurs dédiés (basé sur un recyclage du thorium et de l'uranium 233) est une piste souvent considérée comme de long terme (hors Inde ou Chine) car liée au développement de nouveaux types de réacteurs. Cependant, les alternatives qui consistent en l'introduction graduelle du thorium dans les réacteurs à eau légère ou eau lourde en vue d'une amélioration du cycle uranium-plutonium est perçue comme plus proche puisqu'elle utilise des réacteurs de technologie existante.

Le thorium est déjà utilisé de manière courante en Inde pour faciliter le démarrage de réacteurs à eau lourde type « CANDU » opérationnels, la présence de thorium permettant de lisser le flux neutronique.

Par ailleurs, à l'horizon 2020-2030, des options intéressantes de combustibles Th-URT sont prévues en Chine en vue d'améliorer la performance des PHWR et de solutionner le recyclage de matières dans le cycle U/Pu. Ainsi, l'une des stratégies sur l'évolution du cycle du combustible du programme nucléaire chinois repose sur l'utilisation du thorium dans sa troisième phase de développement, basée sur de nouveaux réacteurs de type CANDU (combustible amélioré ou « advanced fuel »). Dans le cadre de cette stratégie, des tests de combustible à base de thorium seraient prévus à partir de 2020-2025 dans des réacteurs CANDU déjà opérationnels depuis plus d'une décennie sur le site Qinshan III en Chine.

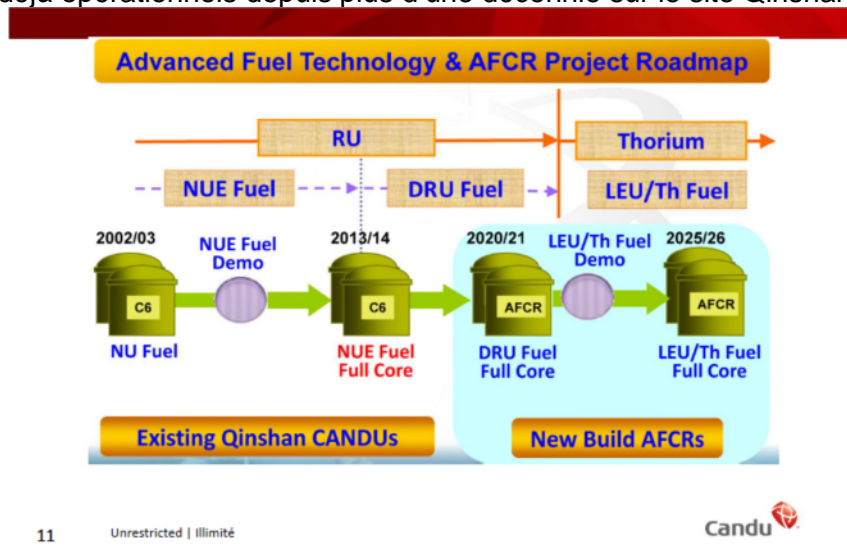


Figure 7.1 – Schéma de l'introduction envisagée de thorium sur les réacteurs du site Qinshan III – Chine (Source : Candu).

Solvay soutient l'introduction du thorium dans le cycle nucléaire par le financement de travaux de recherches sur la filière sels fondus, au travers de deux thèses de doctorat menées à l'IN2P3 Orsay sur l'épuration électrochimique des produits de fissions contenus dans le combustible sels fondus LiF-ThF4 d'un réacteur à neutron rapide (2009-2012, puis 2012-2015). A cette occasion, une dizaine de kilogrammes de fluorure de thorium a été préparée par Solvay. Fin 2015, un programme post-doctoral d'une durée de quatre ans au SCK/CEN a été initié par Solvay concernant l'optimisation du frittage des oxydes de thorium.

Sur un plan international, en 2012, Solvay a également fourni le thorium pour le projet du norvégien Thor Energy. Ce projet a pour objectif la réalisation de tests d'irradiation, dans le réacteur de recherche IFE

de Halden, de pastilles d'oxydes mixtes Th-Pu en aiguilles instrumentées. Ce programme d'irradiation (sur 5 ans) est financé (8 M€) notamment par l'état norvégien, Thor Energy, Fortum et Westinghouse avec les contributions matérielles de IFE (Norvège), NNL (UK) et Solvay. Les irradiations de pastilles Th/U, Th/Pu sont en cours de réalisation à Halden avec un programme PIE prévu à partir de 2018.

New AREVA a également contribué à différentes actions à partir de 2010 concernant la faisabilité de l'introduction graduelle du thorium dans des réacteurs à eau légère. L'objectif était de valider l'intérêt des combustibles Th/Pu pour un multi-recyclage du Pu.

La crédibilité de cette voie de valorisation peut être également évaluée sur la base des avantages de ce type de combustible par rapport aux combustibles U/Pu actuels, à savoir amélioration du cycle U/Pu, et économie de la ressource en uranium naturel. Comme dit plus haut, ceci tient notamment aux faits que :

- l'uranium issu du thorium, ^{233}U , est de 'bonne' qualité, fissile dans une large gamme de spectre neutronique avec une possibilité d'atteindre, en spectre thermique, des taux de conversion plus élevés qu'avec le ^{235}U et le ^{239}Pu ;
- le thorium présente également certains avantages en comportement du combustible sous irradiation et en termes de sûreté :
 - sa température de fusion est plus élevée de celle de l'uranium (ThO_2 : 3300°C, UO_2 : 2800°C) ;
 - sa stabilité chimique est meilleure ;
 - son irradiation produit moins de produits de fission. La filière thorium produit également moins de transuraniens.

Afin de conforter ces perspectives de valorisation, New AREVA et Solvay avaient conjointement engagé à partir de 2012 un programme de R&D en plusieurs phases en intégrant des essais sur le comportement du combustible sous irradiation, des expérimentations de fabrication et de traitement, ainsi que l'analyse de scénarios de déploiement de combustible au thorium.

New AREVA et Solvay avaient ainsi conclu en octobre 2013 un accord de déploiement d'un programme de R&D conjoint visant, à exploiter le thorium comme combustible potentiel de centrales nucléaires, en complément des combustibles utilisant l'uranium et le plutonium.

Au cours de l'année 2014 un certain nombre d'activités a été développé et réalisé sur le site AREVA à Erlangen qui comporte un laboratoire de R&D dédié au combustible et autres céramiques.

Des pastilles de ThO_2 ont ainsi été préparées à Erlangen par voie sèche à partir de la poudre de ThO_2 , puis ont subi différents traitements thermiques pour évaluer le comportement au frittage de la matière thorifère. Les densités et microstructures ont été analysées.

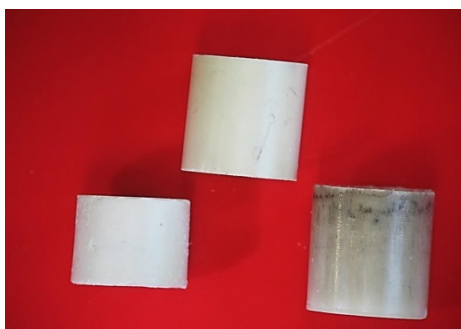


Figure 7.2 – Pastilles de thorium frittées à partir de poudres de ThO_2 , avec des densités entre 83 et 92%TD.

Depuis 2015, ce programme qui se voulait appliqué (fabrication de crayons à court terme avec des moyens significativement accrus en partenariat et ciblé en vue de la qualification d'un combustible pour 2030) a été mis en stand-by suite à la réorientation des programmes de recherches de New AREVA.

A partir de 2016, Solvay a poursuivi ses études de valorisation en collaboration avec la société de conseil Nuclear-21 dans l'objectif d'apprécier le potentiel de développement à court/moyen/long terme du thorium.

Le tableau ci-dessous présente les types d'utilisations anticipées du thorium sur les différents types de réacteurs :

Time Frame	Objective	LWR	PHWR	AHWR	SMR	FR	HTGR	MSR
<2035	• Flux flattening		■					
	• REPU-recycling		■					
	• Pu-management	■						
2035-2050	• Flux flattening			■				
	• REPU-recycling			■				
	• Longer fuel core residence		■	■	■			
	• Pu-Management	■					■	
	• ²³³ U breeding		■	■		■		
>2050	• Flux Flattening		■	■				
	• REPU-recycling		■	■				
	• Pu-management		■	■				
	• Longer fuel core residence	■	■	■	■		■	
	• Negative void coefficient					■		
	• ²³³ U/Th cycle (incl. recycling)			■				■

Figure 7.3 – Programmes d'utilisation du thorium dans les différents réacteurs (source : Nuclear-21)

Basée sur différents scénarii de développement du bouquet énergétique et de développement du parc électronucléaire intégrant la consommation de thorium dans les filières PHWR notamment, l'étude préliminaire de Solvay montre ainsi clairement que le thorium ne serait pas consommé sur le sol français, mais plutôt en Asie. Néanmoins, pour cette seule filière PHWR, les niveaux de consommation estimées à la date, de quelques centaines par an, sont suffisamment significatifs pour que le stock fini détenu par Solvay et New AREVA trouve un exutoire à moyen terme sans avoir à craindre par ailleurs la concurrence du thorium issu de l'activité chinoise des terres rares³⁷.

L'utilisation du thorium demande encore cependant des efforts d'industrialisation plus ou moins significatifs selon l'option considérée, sans ou avec retraitement du combustible:

- ainsi les options d'utilisation du Thorium en PHWR demandent essentiellement la vérification, voire l'amélioration, des performances de ces combustibles, sans besoin de développement du traitement et recyclage du thorium et de l'U233. Les premières analyses de Nuclear-21 concluent à une réduction significative de l'accroissement des inventaires de combustibles usés, améliorant

³⁷ La production annuelle de terres rares en Chine est environ de 130 kT, avec une évolution potentielle à 200 kT à l'horizon 2025. Cette production provient exclusivement du traitement de la basnaésite dont la teneur en thorium est voisine de 0,3%, soit un flux théorique de thorium significativement inférieur à 500t/an. A ce jour, les procédés de traitement de la basnaésite en Chine (attaque sulfurique) n'intègrent pas d'extraction du thorium qui de ce fait reste dans les résidus de traitement.

ainsi la durabilité du nucléaire, avec des efforts de développement couvrant essentiellement les années 2020-2030;

- des développements bien plus importants seront nécessaires pour les options envisageant le traitement et le recyclage des combustibles au thorium et qui nécessitent la création d'une nouvelle chaîne industrielle (ces opérations ne sont pas envisageables dans les usines actuelles). Par ailleurs l'accumulation d'uranium ^{232}U et ^{233}U conduit à des niveaux de rayonnement gamma plus importants qui devront être maîtrisés par les développements de la robotique et télémanipulation. Ces développements ne seront industrialisables qu'à bien plus long terme (post-2040) dans des pays intégrant ce cycle dans leur stratégie (Inde voire Chine).

L'ensemble de ces développements montrent que cette voie de valorisation est toujours concrètement envisagée.

7.1.2 Valorisation des matières thorifères pour la production de traitements anticancéreux

7.1.2.1 Valorisation des NiTh de New AREVA

L'alphathérapie ciblée consiste à associer un isotope radioactif tel le plomb-212 (^{212}Pb) à un vecteur biologique (anticorps monoclonal, peptide ou autre) qui va cibler les cellules cancéreuses, grâce à leurs propres antigènes, pour les détruire. Depuis plusieurs années, le plomb 212 fait l'objet d'un fort intérêt, sans cesse croissant, pour le traitement de cancers particulièrement agressifs.

New AREVA s'est engagée dans le développement de ce type de traitements anticancéreux via sa filiale médicale AREVA Med. Cette société fut créée dans la continuité du projet TAO (Thorium de New AREVA pour l'Oncologie) lancé officiellement en 2006.

La société a ainsi pour objectifs :

- d'extraire le ^{212}Pb du sel naturel de Thorium et
- de produire de nouveaux traitements puissants et ciblés d'alphathérapie au ^{212}Pb pour combattre le cancer.

Aujourd'hui, AREVA Med conduit des activités industrielles tant en France qu'aux Etats-Unis.

En France, l'extraction de ^{212}Pb est réalisée soit dans un pilote préindustriel, soit dans le « Laboratoire Maurice Tubiana » (« LMT ») dont la mise en actif a été réalisée en novembre 2013. Ces deux installations sont situées sur le site de Bessines-sur-Gartempe. Le procédé consiste tout d'abord à séparer le Thorium 228 (^{228}Th) de son précurseur initial, le Thorium 232. Dans une étape ultérieure du procédé, le Radium 224 est isolé, puis sert de base à la production du plomb-212. Aux Etats-Unis, la production de plomb-212 est réalisée depuis 2016 au DDPU (Domestic Distribution and Purification Unit), nouveau site de New AREVA Med localisé à Plano près de Dallas (Texas).

Les partenariats scientifiques d'AREVA Med ne cessent de se développer depuis sa création. Une première collaboration a été nouée en 2008 avec l'institut national américain du cancer (NCI) puis avec l'Université d'Alabama (USA) en 2009 ; ces deux collaborations ont permis la réalisation du premier essai clinique mettant en œuvre le plomb-212 chez l'homme entre 2012 et 2014 (18 patients). En 2011,

AREVA Med a acquis Macrocyclics (Texas), le leader mondial de la production des chélateurs de métaux pour la médecine nucléaire, pour renforcer son positionnement sur la chaîne de valeur.

Une alliance de long terme a été signée en 2012 avec le Laboratoire Roche, leader mondial dans le domaine de l'oncologie. Cet accord a donné naissance à la réalisation d'un laboratoire commun de recherche nommé « ARCoLab », dans lequel les scientifiques de Roche et ceux d'AREVA Med co-développent de nouveaux traitements anticancéreux de radio-immunothérapie alpha au ^{212}Pb . De nouveaux partenariats avec des biotechs ont été conclus : en 2015 avec RadioMedix (Etats-Unis) et en 2016 avec Morphotek (Etats-Unis) et Nordic Nanovector (2016). AREVA Med a également reçu en 2015 le soutien de Bpifrance pour le développement de la filière d'alphathérapie au plomb-212.

Depuis 2006, les avancées industrielles et scientifiques, tant précliniques que cliniques, et le nombre croissant des partenariats académiques et industriels portés par AREVA Med, démontrent que la transition vers une phase industrielle de plus grande ampleur est initiée. En février 2014, AREVA Med a annoncé le développement d'une future installation, ATEF2, dont les études de conception sont en cours, et dont les capacités de production seront alignées sur les besoins du marché.

La faisabilité de valorisation des matières thorifères pour le développement de traitement de nanomédecine nucléaire devient donc une réalité tangible, impliquant notamment Roche, l'un des plus grands laboratoires pharmaceutiques du monde.

Cette concrétisation est également validée par :

- l'implication industrielle et financière croissante de New AREVA et de ses partenaires, dont le CEA impliqué dans la sécurisation technique des conditions d'entreposage à long terme des futs de Thorium 232 sur son site de Cadarache,
- un nombre croissant de demande d'autorisations ASN, pour la réception et l'utilisation du $^{224}\text{Ra}/^{212}\text{Pb}$ dans différents sites académiques et/ou cliniques, tant en France qu'à l'étranger,
- un nombre également croissant de demandes d'autorisations vétérinaires permettant de réaliser des essais précliniques d'alphathérapie au ^{212}Pb , tant en France qu'à l'étranger,
- les diverses reconnaissances du caractère prometteur des activités d'AREVA Med (prix de la fondation Clinton aux USA, Médaille Marie Curie de la SFEN en France),
- le dépôt de brevets étendus ou en voie d'extensions mondiale,
- les premières ventes de plomb-212 conclues en 2014,
- l'obtention d'une nouvelle licence d'exportation du Thorium-228 aux USA dans le cadre de nouvelles avancées industrielles et scientifiques (délivrée par le SBDU, service des biens à double usage),
- l'évolution des effectifs de New AREVA Med et des emplois induits par le développement de la filiale depuis sa création en 2009,
- la volonté de l'Etat d'accompagner AREVA Med et de développer une filière d'excellence d'alphathérapie au ^{212}Pb , concrétisée via le CGI, Commissariat Général à l'Investissement, et la BPI, Banque Publique d'Investissement, avec le financement du projet PSPC (Projets de recherche et développement Structurants Pour la Compétitivité) CARAT (Consortium pour les Applications en Radio Alpha Thérapie) avec AREVA Med comme chef de file d'un consortium constitué de PME et de partenaires académiques en France).

7.1.2.2 Contribution de la valorisation des HBTh de Solvay

Un autre développement dans la radio-immunothérapie concerne l'utilisation du ^{223}Ra , émetteur alpha à vie courte (11,4 jours). Le ^{223}Ra est un des descendants de l' ^{227}Ac , de période beaucoup plus longue (21,8 ans). La production d'actinium 227 est « classiquement » obtenue par activation neutronique de sources de ^{226}Ra . Cependant, l'actinium 227, ayant un comportement chimique très comparable aux terres rares, peut se retrouver naturellement dans les concentrés de terres rares issus de minerais contenant des terres rares et de l'uranium naturel : la monazite contient par exemple 3 MBq ^{227}Ac par tonne de terres rares.

La société Algeta est à l'origine d'un traitement, par injection de chlorure de ^{223}Ra , de patients souffrant du cancer de la prostate, réfractaires au traitement hormonal, de 2,8 mois ou plus. Algeta a été rachetée en 2013 par BAYER HEALTH CARE et le médicament est désormais commercialisé sous le nom de XOFIGO. Les modalités de prise en charge financière ont été, ou sont, en cours d'être examinées par les autorités compétentes pays par pays.

Pour la France, la HAS (Haute Autorité de Santé du Ministère des Affaires Sociales et de la Santé) a pris, en date du 15 janvier 2014, la décision suivante : « Le produit XOFIGO est susceptible d'avoir un impact significatif sur les dépenses de l'assurance maladie au sens de l'article R. 161-71-1, I (2°) du code de la sécurité sociale. En conséquence, la commission d'évaluation économique et de santé publique procédera à l'évaluation médico-économique de ce produit ». La posologie est inscrite pour la France dans le Vidal : 6 injections de 1 cm³ de 1 MBq/cm³, soit 6 MBq par patient.

Par ailleurs, BAYER HEALTH CARE a annoncé (2 avril 2014) le lancement des essais de phase 3 du XOFIGO en combinaison d'une autre molécule (Abiraterone Acetate) visant à obtenir une efficacité accrue du XOFIGO sur le cancer de la prostate. Les ventes de XOFIGO sur le marché US ont représenté un chiffre d'affaire de 60 M€ en 2016.

L'actinium 227 est présent notamment dans l'HBTh de Solvay (activité estimée entre 5 et 10 GBq compte-tenu de la période de fabrication de l'HBTh). La chimie de l'actinium, très voisine de celle des terres rares, rend ainsi sa récupération tout à fait envisageable. Une fois isolé, ce stock d'actinium permettrait de générer plusieurs centaines de GBq de ^{223}Ra sur une dizaine d'années. Ceci est considéré comme une voie de valorisation de l'HBTh.

L'ensemble de ces éléments montre bien que cette voie est une piste intéressante de valorisation des matières thorifères.

7.1.3 Procédé de valorisation des HBTh

Dans les faits, le retraitement de l'HBTh a déjà fait l'objet d'une application industrielle en ce qui concerne la séparation des terres rares, du thorium et de l'uranium et le traitement des effluents radifères. Ainsi, pendant 5 ans au début des années 1980, plusieurs centaines de tonnes par an d'HBTh ont été retraités, notamment pour la valorisation des terres rares et du nitrate d'uranyle. Ce procédé a été arrêté suite aux fluctuations du cours de l'uranium et n'a pas été repris en raison de la disparition de la filière d'élimination des résidus radifères à partir de 1991.

Le retraitement de l'HBTh s'inscrit désormais dans un projet plus global (le projet Valor+ initié en 2009) de valorisation de l'ensemble des substances radioactives entreposées sur le site de La Rochelle. Il

s'agit d'optimiser technico-économiquement la gestion des différentes substances : l'HBTh, les RSB (Résidus Solides Banalisés) et les MES (Matières En Suspension) par rapport à des gestions individuelles séparées. A ce stade, cette optimisation est guidée par :

- la réduction des quantités de déchets radifères ultimes, entreposés dans des conditions de sûreté appropriées, dans l'attente de l'ouverture du futur centre de stockage FA/VL de l'Andra,
- la valorisation de l'uranium, sous forme de nitrate d'uranyle (client potentiel New AREVA)
- la valorisation des terres rares,
- éventuellement l'opportunité de valorisation de l'actinium 227
- enfin la récupération du thorium sous forme nitrate, directement valorisable et/ou expédiable, entreposé dans des conditions de sûreté appropriées dans l'attente de sa valorisation.

Des développements techniques ont alors été repris au travers d'études en laboratoire en 2011, 2012 et 2013, avec pour objectifs d'augmenter les rendements de récupération et de limiter la production de déchets FA/VL induits. Ces études ont conduit à compléter le procédé historique, notamment par l'ajout innovant d'une étape de fusion alcaline des résidus de la première attaque nitrique. Une étude préliminaire d'ingénierie sur l'ensemble du nouvel atelier de recyclage a été menée en 2012-2013.

En 2016-2017, Solvay a mené des études complémentaires sur la procédé Valor+ portant sur les paramètres dimensionnant des étapes de filtration/lavage et de réduction de volume des déchets FA/VL par compaction. Cette étude a permis également de piloter avec succès l'enchaînement complet du procédé.

La décision sur les étapes suivantes du projet Valor+ se fera en fonction des conclusions de travaux en cours ou à venir :

- Projet ANDRA sur le stockage FA/VL : caractéristiques des produits acceptés, conditionnement, coût unitaire de stockage ;
- Possibilité de stocker le RSB en surface ;
- Conditions de gestion du Th issu du procédé ;
- Conditions de valorisation de ce Th.
- Etude de base détaillée du projet Valor+

Dans l'état actuel, sans avoir les résultats de ces études, pour un prix d'accès du thorium similaire à celui de l'uranium naturel, l'intérêt économique du projet Valor+ reste réaliste.

Ces éléments confirment donc bien que cette voie de valorisation des HBTh, qui s'inscrit dans un projet global de valorisation des matières stockées sur le site de La Rochelle, est envisagée de façon crédible.

7.2 Analyse de l'adéquation entre les perspectives de valorisation et les quantités détenues et à détenir

7.2.1 Quantités détenues et à détenir

Tel que précisé sans l'Inventaire National, Solvay et New AREVA sont propriétaires (à fin 2016) d'environ 8550 tonnes de thorium, sous forme de nitrates et d'hydroxydes. Ces matières sont entreposées sur le site Solvay de La Rochelle (4 306 tonnes de thorium sous forme nitrate, 1911 tonnes de thorium sous forme d'hydroxydes HBTh et environ 33 tonnes sous forme oxyde et oxalate) et sur le site de Cadarache pour le compte de New AREVA (2 300 tonnes de thorium sous forme de nitrate, reconditionné en surfûts inox).

Le tableau ci-dessous décrit ces quantités.

PNGMDR : Perspectives de valorisation de matières radioactives	Réf. : DM2D NT 17-275	Décembre 2017	Page : 47/53
--	-----------------------	---------------	--------------

Tonnage de matières thorifères - Solvay – La Rochelle	
Th Nitrate coulé à 46% ThO ₂ – fûts Inox 1m3	7400 t
Th Nitrate coulé à 46% ThO ₂ – fûts PE 120l	3127 t
Th Nitrate Solution à 28.5% ThO ₂ – Cubitainer PE 1m3	201 t
HBTh, hydroxydes bruts de thorium – fûts PE 220l + vrac	21750 t
Th Oxyde – fûts acier 25l	1 t
Th Oxalate – fûts PE 120l	77 t
Tonnage de matières thorifères - New AREVA- Cadarache	
Th Nitrate cristallisé	5500 t

Tonnages de matières thorifères sur le sol français

En termes d'évolution on peut souligner qu'il n'est pas prévu d'augmentation des quantités de ces matières thorifères. Ce tableau est donc globalement identique à celui présenté dans le précédent rapport (légère réduction liée à la vente d'oxyde Solvay pour applications non-nucléaires).

Les matières détenues par New AREVA viennent d'un stock historique d'uranothorianite (issu de l'exploitation des gisements d'uranothorianite de Madagascar dans les années 1960) et ne sont plus produites.

Jusqu'en 1994 Solvay (Rhône Poulenc) a traité sur son site de La Rochelle des minerais thorifères (monazite principalement) pour en extraire les terres rares. Depuis 1994, le site de La Rochelle est approvisionné exclusivement en concentrés de terres rares, épurés en radioactivité. Solvay ne produit donc plus d'HBTh ni de nitrate de thorium. Les oxydes et les semi-finis oxalates sont destinés aux ventes de produits finis oxydes (de l'ordre de quelques centaines de kilos de vente par an).

7.2.2 Perspectives de valorisation et adéquation aux quantités

7.2.2.1 Valorisation du thorium issu des matières thorifères dans la filière nucléaire

L'ensemble des matières décrites ci-dessus est concerné par cette valorisation. La ressource en thorium correspondante s'évalue donc à 8552 tonnes.

	tonnage matières	tonnage thorium
HBTh	21750	1911
Th Nitrates -Solvay	10730	4306
Th oxyde +oxalate	78	33
Th Nitrates - New AREVA	5500	2300

Ressources en thorium des matières thorifères sur le sol français

À titre d'exemple, l'ordre de grandeur du besoin en thorium pour faire fonctionner un réacteur à eau lourde est de 30 tonnes par GWe installé pour le premier cœur puis environ 8 tonnes de thorium par an. En 50 ans de fonctionnement, plus de 400 tonnes de thorium sont ainsi nécessaires pour chaque GWe installé. Le thorium des matières thorifères en France (8550 t) pourrait permettre de faire fonctionner au niveau mondial environ 20 réacteurs PHWR.

L'étude prospective initiée par Solvay en 2015 et poursuivie sur 2016-2017 avec l'appui du conseil Nuclear-21, basée sur différents scénarii de développement du bouquet énergétique et de développement du parc électronucléaire intégrant la consommation de thorium dans les filières Candu, a ainsi montré que les niveaux de consommation potentielle du thorium, atteignent pour cette seule filière quelques centaines de tonnes par an, et permet une réduction sensible de la production de combustible usé grâce à l'augmentation du burn-up. Ces ordres de grandeur sont suffisamment significatifs pour que le stock fini détenu par Solvay et New AREVA trouve un exutoire à moyen terme.

Cette adéquation potentielle est en premier lieu soutenue par la stratégie de certains pays qui disposent de ressources ou ont des besoins énergétiques importants.

L'Inde qui dispose de gisements nationaux recherche l'utilisation du thorium comme ressource énergétique dans des réacteurs spécifiques ou existants. La société Indian Rare Earths a dans ce contexte démarré en 2014 une unité d'attaque de la monazite pour en extraire le Thorium et les terres rares.

De façon très concrète, la Chine également pour ses besoins énergétiques a déclaré avoir mis en chantier 26 réacteurs nucléaires et prévoit un programme important de développement (une cinquantaine prévus à court terme). Elle s'intéresse vivement à la filière thorium. Un programme de 350 millions de dollars (140 ingénieurs à l'Académie nationale de sciences chinoise, 700 en 2015) est en cours pour développer une filière thorium à sels fondus. Son Institut de Physique Nucléaire Appliquée de Shanghai, aurait également 600 ingénieurs affectés au sujet.

En second lieu au sein de la filière nucléaire, la volonté d'accroître la « flexibilité » des parcs existants conduit à rechercher l'utilisation du thorium dans les parcs de réacteurs de génération III(+) dans un contexte international.

Des scénarios d'évolution des parcs incluant l'utilisation de combustibles thoriés font partie des études en cours au sein d'organismes nationaux de différents pays ou d'opérateurs industriels. Il s'agit :

- d'organisations à but non lucratif (iThEO International Thorium Energy, Thorium Energy, Fondation Weinberg),
- de sociétés développant des programmes de petits réacteurs ou de fabrication de combustibles au thorium (Thorium One, Flibe Energy, Thorium Power Canada Inc., Lightbridge Corporation, Thor Energy AS)
- ou de programmes nationaux pour la filière thorium en Inde, USA, Russie, Japon, Afrique du Sud, République tchèque, et Chine.

Ces scénarios s'inscrivent dans une évolution continue du cycle U/Pu qui permet de répondre, au plan international, à un objectif de durabilité accrue du nucléaire, en particulier via le multirecyclage des matières fertiles et fissiles.

Dans ce domaine en Chine, il faut signaler la signature en novembre 2014 d'un accord-cadre entre la CNNC et Candu Energy³⁸ qui porte sur la création d'une co-entreprise afin de développer et de promouvoir en commun un réacteur à eau lourde utilisant un « combustible avancé », adapté à l'utilisation du thorium et de l'uranium de retraitement provenant des combustibles usés du parc de réacteurs eaux légères, pour le marché du nucléaire civil au niveau national et international.

³⁸ <http://www.candu.com/en/home/news/mediareleases/NewphaseofCanadaChinanuclearenergy.aspx>

La Malaysian Nuclear Agency met également en place un programme international de R&D en vue de l'irradiation de crayon au thorium d'ici 2020. Par courrier du 6 mars 2014 (lettre of intent) à New AREVA et Solvay, le MOSTI (Ministry of Sciences, Technology and Innovation, Malaysia) a par exemple formalisé sa volonté de mettre en place un « Memorandum of Understanding » pour une collaboration entre « the Malaysian Nuclear Agency », New AREVA et Solvay, dans le domaine des technologies de valorisation du thorium et des terres rares.

La Norvège perçoit également les combustibles thoriés comme une possibilité de développement de ses ressources en thorium. Le consortium Thor Energy, déjà mentionné plus haut, a été créé en 2006 par SCATEC pour la valorisation des gisements de Th et la fabrication de combustible MOX au thorium (développement de pastilles, Th, U/Th, Pu/Th, irradiation de crayons dans le réacteur de recherches de Halden exploité par IFE...).

Le « Thorium think tank » a proposé en 2012 de relancer l'exploration, les ressources norvégiennes de thorium pouvant représenter jusqu'à 120 fois l'énergie des ressources en pétrole et gaz du pays. Dans la mesure où la Norvège doit préparer « l'après pétrole » la valorisation du thorium est d'un intérêt national. Thor Energy a également créé un consortium avec Fortum (Finlande), Westinghouse (USA), NNL (Laboratoire Nucléaire National, UK), IFE (Institut for Energiteknikk, Norvège) et le sud-africain Steenkampskraal Thorium.

L'Afrique du Sud et l'Australie possèdent aussi d'importantes ressources de thorium qui pourraient donner lieu à des programmes de développement.

On retiendra donc, que la demande de valorisation du thorium via la filière nucléaire à moyen terme, 2030-2040, est croissante, qu'elle n'est plus nécessairement liée à l'avènement de parcs de réacteurs spécifiques et qu'elle s'accompagne du soutien d'acteurs multiples avec donc une probabilité de réalisation élevée.

Il est ainsi vraisemblable que des combustibles au thorium soient qualifiés d'ici les années 2030-40, issu de la R&D en cours (Thor Energy, Malaisie, Chine, Inde).

La valorisation du thorium présente également un intérêt en support à la commercialisation de réacteurs. Les industriels recherchent cette valorisation afin de soutenir leurs offres commerciales. Candu Energy, Westinghouse... sont typiquement dans ce cas. Pour l'achat d'un type de réacteur, la sécurité de l'approvisionnement en combustibles reste un critère important. La capacité à fournir d'une part des réacteurs qui acceptent différents types de combustibles et à fournir d'autre part ces combustibles et leur retraitement pourra être déterminante dans un contrat d'équipement. Les contrats commerciaux prévoient couramment que les premiers cœurs soient fournis avec le réacteur.

La gestion des déchets radioactifs peut également être améliorée dans cette seconde alternative. Ce point n'est sans doute pas encore pris en compte par les différents acteurs mais le sera vraisemblablement à terme. La création de stockages géologiques pour la gestion des déchets du cycle U/Pu est une problématique grandissante dans la plupart des pays nucléarisés. Or la quantité, et donc le dégagement de chaleur, des actinides produits dans les cycles à base de thorium sont plus faibles que dans les cycles à base d'uranium. L'introduction du thorium dans les cycles ouverts ou fermés présente donc également un intérêt dans la réduction des emprises des stockages.

La valorisation du thorium de façon générale, et en particulier au sein de la filière nucléaire qui est potentiellement utilisatrice de quantités significatives, rencontre l'intérêt de différents secteurs économiques également hors filière. Le marché actuel du thorium est relativement réduit. Bien que le thorium ait de nombreuses applications industrielles non nucléaires (électrodes, verres, manchons à incandescence, creusets réfractaires, porcelaine, aciers, catalyseurs,...), la demande mondiale est

seulement de l'ordre de quelques dizaines de tonnes par an, alors que des ressources naturelles très importantes existent.

Si le marché actuel non-nucléaire propose des filières de valorisation, dont certaines peuvent offrir de nouveaux développements, ce dernier ne semble pas avoir vocation à faire l'objet d'une croissance significative, de sorte que l'ensemble des acteurs s'accorde pour considérer que la seule voie tangible d'ouvrir une nouvelle voie de valorisation de quantités importantes de thorium est sur l'utilisation du thorium comme combustible dans la filière nucléaire

En l'état actuel des estimations dans la filière nucléaire, les consommations sur plusieurs dizaines d'années semblent être en adéquation avec les quantités détenues ainsi que potentiellement accessibles.

7.2.2.2 Valorisation des matières thorifères pour des applications médicales

En termes de ressource, le plomb 212 est un élément peu courant, issu de la décroissance radioactive du ^{232}Th (via ^{228}Th). Sa période de décroissance est courte, 10,6 heures, alors que celle du ^{232}Th est très grande, 14 milliards d'années. A l'équilibre radioactif, les quantités de ^{212}Pb disponibles sont très faibles au regard des quantités de thorium, de l'ordre de 90 ng par tonne de thorium.

En termes de besoin, l'utilisation de la radio-immunothérapie alpha, tant en France qu'à l'étranger, revêt évidemment une importance de santé publique particulière. De fait, la demande en traitements anticancéreux ne fait que croître.

Le marché de l'oncologie est en forte croissance dans le monde ; Il dépassera les 150 milliards de dollars en 2020, via l'une des plus fortes croissances du marché des traitements médicaux.

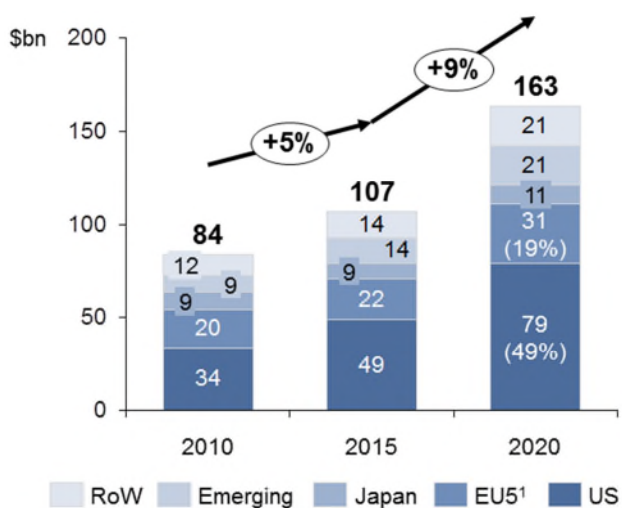


Figure 7.4 - Evolution du marché de l'oncologie dans le monde - 2010 – 2020.

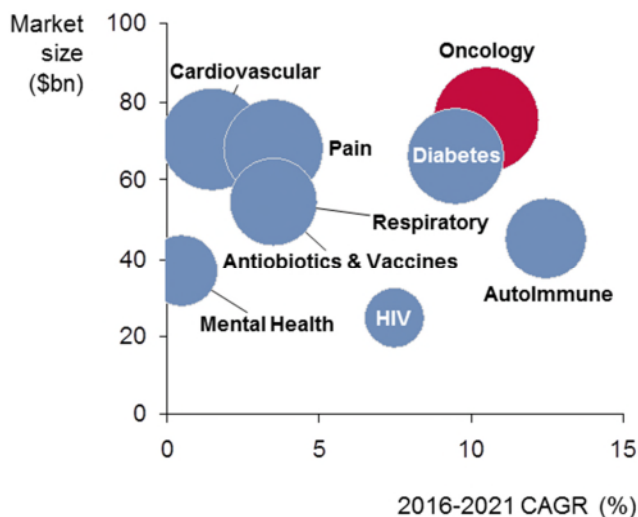


Figure 7.5 - Taux annuel moyen de croissance de l'oncologie² par comparaison à celui des autres traitements médicaux

1. Germany, France, UK, Italy & Spain 2. Only for US, Canada, EU5, Japan, BRIC, Turkey and Mexico
 Source: Global Oncology Trend Report: A Review of 2015 and Outlook to 2020, IMS Institute, June 2016
 CAGR (Compound annual growth rate) : taux annuel moyen de croissance.

Les patients atteints de pathologies actuellement visées par l'essai clinique de New AREVA Med se comptent par dizaines de milliers. Il y a par exemple plus de 40 000 nouveaux cas de cancer de colon diagnostiqués en France chaque année, plus de 100 000 aux USA. La France, les autres pays d'Europe de l'Ouest, les États-Unis, l'Australie et le Japon affichent les incidences les plus élevées. En France le nombre de cancers colorectaux pourrait atteindre 45 000 nouveaux cas annuels en 2020.

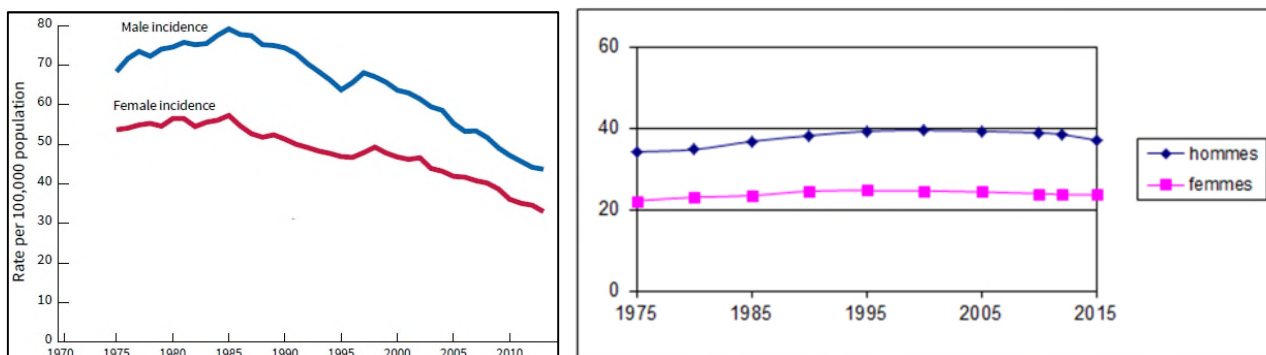


Figure 7.6 - Incidence du cancer colorectal aux USA et en France, en « cas pour 100 000 ».

Eu égard aux progrès récents, le nombre de 50 000 à 100 000 administrations annuelles représente une perspective réaliste à moyen terme, potentiellement en deçà des besoins à plus long terme. Une seule administration à un patient correspond aujourd'hui à des quantités de ^{212}Pb de quelques 2 ng. L'amélioration du design des vecteurs et par voie de conséquence celle du ciblage des antigènes des cellules malades, permettent d'envisager des évolutions importantes des activités injectées (donc des besoins en matière première), dont l'effet thérapeutique sera alors accrue, tandis que l'effet sur les cellules alentours restera limité.

Les progrès permanents de ces dernières années, tant au plan industriel que scientifique révèlent ainsi un besoin croissant de thorium à partir duquel est extrait le plomb 212 injecté aux personnes malades. Cette tendance va probablement se confirmer, voire s'accélérer, dans les prochaines années. En effet, il semble non seulement que de multiples types différents de cancers puissent être combattus grâce à l'alphathérapie au ^{212}Pb , mais également que l'administration de plusieurs injections successives de ^{212}Pb représente la voie posologique la plus prometteuse pour les patients.

En pratique, la perspective est donc que les besoins médicaux soutiennent un niveau significatif de demande. Face à cette demande, raisonnablement évaluée, New AREVA possède, comme dit plus haut, à la fois les capacités techniques et industrielles, les procédés de séparation, les autorisations administratives et les ressources en matières thorifères nécessaires et compatibles avec un usage médical, tant en qualité qu'en quantité.

Le plan industriel de New AREVA Med prévoit une valorisation des nitrates de thorium sur la période 2020-2050, période de fonctionnement nominal planifié à ce stade.

Parallèlement au plan de développement de ATEF2 d'ici 2025, les phases cliniques 1, 2 et 3 seront menées sur 2019-2024 en vue de l'obtention d'autorisations de commercialisation d'ici 2025.

Après extraction du ^{212}Pb (ou de l'un de ses précurseurs) les matières thorifères sont entreposées à nouveau afin que la décroissance radiologique, régénère les isotopes d'intérêts et donc le potentiel de

valorisation. La période de retour à un niveau suffisamment proche de l'équilibre radiologique est de l'ordre de 20 à 30 ans. La quantité de matière nécessaire au fonctionnement d'AREVA Med, même sur un inventaire régénéré, serait ainsi au moins de l'ordre de 20 à 30 fois la consommation annuelle envisagée.

Le LMT est calibré pour une consommation à terme de 20 à 30 fûts /an. La future installation industrielle d'AREVA Med, ATEF2, est prévue pour une consommation de plusieurs centaines de fûts par an. Le fonctionnement d'AREVA Med nécessite donc la préservation d'une partie significative des quantités actuellement entreposées sur la durée d'activité d'AREVA Med, à ce stade au moins jusqu'en 2050.

Concernant l'utilisation du ^{223}Ra pour le traitement du cancer de la prostate, la posologie définie par BAYER est comme dit plus haut de 6 MBq/patient. En France, le cancer de la prostate est la 4^{ème} cause de mortalité par cancer, avec environ 9000 décès par an, et chaque année 71000 nouveaux cas sont détectés. Une valorisation du stock ^{223}Ra issu de l'HBTh, quelques centaines de GBq, soit un potentiel de traitement de plusieurs dizaines milliers de personnes, apparaît donc très réaliste dans un contexte de demande mondiale.

7.2.2.3 Valorisation des Terres rares contenues dans les hydroxydes de thorium

Comme dit plus haut, le procédé de valorisation des HBTh développé par Solvay intègre également le traitement des RSB (Résidus Solides Banalisés) et des MES (Matières En Suspension).

Le retraitement des MES a été initié dès 2000. A fin 2016, 15000 t ont ainsi été valorisées. Compte-tenu d'une production annuelle de 700 t/an, le stock de MES est de 16000 t à fin 2016.

La ressource en terres rares à valoriser s'évalue dès lors globalement à 7500 tonnes

	tonnage matières/déchets	tonnage terres rares
HBTh	21750	3000
RSB	8400	1000
MES	16000	3500

Ressources terres rares des HBTh, RSB et MES au 31/12/2016

La potentialité de cette valorisation reste largement soutenue par la demande autour de 120000 t/an. En termes de traitement, sur une quinzaine d'années, cette quantité ne représente en fait qu'une faible partie des besoins de Solvay qui aura donc toute latitude pour décider de valoriser ses propres matières au moment le plus opportun.

7.2.3 Conclusion

En conclusion, les éléments présentés ici permettent d'envisager, sur les périodes 2025-2035 (terres rares), 2020-2050 (médical), 2030-2045 (flexibilité pour les parcs nucléaires existants) ou 2030-2080 (combustibles pour les parcs futurs) une valorisation très significative des nitrates de thorium et des hydroxydes de thorium actuellement détenus par New AREVA et Solvay.