



**REVUE DES PROCÉDÉS DE VALORISATION DES
MATIÈRES RADIOACTIVES PRÉSENTES SUR LE
SOL FRANÇAIS ET ANALYSE DE L'ADÉQUATION
ENTRE LES PERSPECTIVES DE VALORISATION ET
LES QUANTITÉS DÉTENUES ET À DÉTENIR**

06 janvier 2015

Sommaire

1.	<u>INTRODUCTION.....</u>	4
1.1.	Définitions et encadrement réglementaire	4
1.2.	Objet de la note	5
2.	<u>VALORISATION DES COMBUSTIBLES USES</u>	7
2.1.	Procédés de valorisation	7
	2.1.1. Combustibles des réacteurs électrogènes à l'uranium	7
	2.1.2. Traitement des combustibles UOX usés.....	7
	2.1.3. Traitement des combustibles URE usés.....	8
	2.1.4. Valorisation des combustibles usés des réacteurs électrogènes au plutonium.....	9
	2.1.5. Valorisation des autres combustibles usés : de propulsion navale (PN) et de réacteurs de recherche (RTR)	10
	2.1.6. Conclusion : Statut des combustibles usés	11
2.2.	Adéquation entre perspectives de valorisation et quantités détenues et à détenir du combustibles usés	11
3.	<u>VALORISATION DE L'URANIUM NATUREL ET DE L'URANIUM ENRICHI.....</u>	12
3.1	Utilisations de l'uranium naturel et de l'uranium enrichi.....	12
3.2	Adéquation entre perspectives de valorisation et quantités détenues et à détenir..	12
4.	<u>VALORISATION DE L'URANIUM APPAUVRI.....</u>	13
4.1.	Procédés de valorisation envisagés	14
4.2.	Analyse de l'adéquation entre les perspectives de valorisation et les quantités détenues et à détenir.....	14
	4.2.1. Quantités détenues et à détenir.....	14
	4.2.2. Perspectives de valorisation	15
5.	<u>VALORISATION DE L'URANIUM DE RECYCLAGE ISSU DU TRAITEMENT DES COMBUSTIBLES USES (OU 'URT').....</u>	24
5.1.	Procédés de valorisation envisagés	24
5.2.	Adéquation entre perspectives de valorisation et quantités détenues et à détenir	25
	5.2.1. Quantités détenues et à détenir.....	25
	5.2.2. Perspectives de valorisation.....	26

<u>6.</u>	<u>VALORISATION DU PLUTONIUM.....</u>	<u>27</u>
6.1	Procédé de valorisation.....	27
6.2	Adéquation entre valorisation et quantités détenues et à détenir.....	28
<u>7.</u>	<u>VALORISATION DES MATIERES THORIFERES</u>	<u>29</u>
7.1.	Procédés de valorisation envisagées par AREVA et SOLVAY	29
	7.1.1.Valorisation des matières thorifères pour la production d'énergie	29
	7.1.2.Valorisation des matières thorifères pour la production de traitements anticancéreux	33
	7.1.3.Valorisation des matières thorifères pour leurs terres rares.....	36
7.2.	Analyse de l'adéquation entre les perspectives de valorisation et les quantités détenues et à détenir.....	38
	7.2.1.Quantités détenues et à détenir.....	38
	7.2.2.Perspectives de valorisation et adéquation aux quantités	39
	7.2.3. Conclusion	46

1. INTRODUCTION

1.1. Définitions et encadrement réglementaire

L'article L 542-1-1 du Code de l'environnement, issu de la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 du programme relative à la gestion durable des matières et des déchets radioactifs, donne les définitions suivantes :

Une **matière radioactive** est une substance radioactive pour laquelle une utilisation ultérieure est prévue ou envisagée, le cas échéant après traitement-recyclage. 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. Les **déchets radioactifs** sont des substances radioactives pour lesquelles aucune utilisation ultérieure n'est prévue ou envisagée. Les **déchets radioactifs ultimes** sont des déchets radioactifs qui ne peuvent plus être traités dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de leur part valorisable ou par réduction de leur caractère polluant ou dangereux.

Pour autant, le statut de matière valorisable n'impose pas une valorisation immédiate en France, comme le souligne le Haut Comité pour la Transparence et l'Information sur la Sécurité Nucléaire dans son rapport du 12 juillet 2010 :

« Pour l'évaluation du caractère valorisable d'une matière, l'ensemble des filières de réutilisation possibles sont considérées et évaluées, y compris celles situées à l'étranger. »

« Il est cependant important de souligner que, en application de la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 relative à la gestion des matières et déchets radioactifs, une matière n'est pas nécessairement immédiatement valorisable. Le classement en tant que « matière » tient aussi compte des perspectives de valorisations futures. »

En application de l'article L 542-1-2 du Code de l'Environnement, le Décret n° 2008-357 du 16 avril 2008 relatif au Plan National de gestion des Matières et des Déchets Radioactifs (ou PNGMDR) dispose en son article 13 :

« Les propriétaires de matières radioactives valorisables pour lesquelles les procédés de valorisation n'ont jamais été mis en œuvre remettent au plus tard le 31 décembre 2008, aux ministres chargés de l'énergie et de l'environnement, ainsi qu'à l'ANDRA, un bilan des études sur les procédés de valorisation qu'ils envisagent. Sur la base de ce bilan, les ministres, après avis de l'ANDRA et de l'Autorité de sûreté nucléaire, pourront requalifier ces matières en déchets dans la prochaine mise à jour du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs. »

À ce titre, une première étude a été remise par les propriétaires de matières valorisables fin 2008.

Dans la continuité, l'article 9 du décret n° 2012-542 du 23 avril 2012 pris pour l'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 a demandé :

« Les propriétaires de matières radioactives, à l'exclusion des matières nucléaires affectées aux moyens nécessaires à la mise en œuvre de la politique de dissuasion visée à l'article L. 1333-1 du code de la défense, informent avant le 31 décembre 2012 les ministres chargés de l'énergie, de l'environnement, de la sûreté nucléaire et de la radioprotection des procédés de valorisation qu'ils envisagent ou, s'ils ont déjà fourni ces éléments, des changements envisagés. »

A ce titre une première mise à jour de l'étude de 2008 a été remise aux ministres en décembre 2012.

Le décret n°2013-1304 du 27 décembre 2013 demande dans son article 9 que :

« Les propriétaires de matières radioactives, à l'exclusion des matières nucléaires affectées aux moyens nécessaires à la mise en œuvre de la politique de dissuasion mentionnée à l'article L. 1333-1 du code de la défense, informent pour le 31 décembre 2014 les ministres chargés de l'énergie et de la sûreté nucléaire des procédés de valorisation qu'ils envisagent ou, s'ils ont déjà fourni ces éléments, des changements envisagés. Ces éléments devront notamment contenir une analyse de l'adéquation entre les perspectives de valorisation et les quantités détenues et à détenir.

L'ASN et l'ASND sont saisies pour avis sur ces éléments.

Sur cette base, un arrêté du ministre chargé de l'énergie peut requalifier les matières en déchets. »

1.2. Objet de la note

Conformément à l'article 9 du décret n° 2013-1304 du 27 décembre 2013 précité, cette note a pour objet de passer en revue les matières détenues par les principaux exploitants nucléaires français (EDF, AREVA, CEA) et par Solvay, et d'examiner les procédés de valorisation déjà mis en œuvre, afin de contribuer à la définition du statut de ces matières. Il s'agit de la mise à jour des notes publiées antérieurement dans le cadre des échéances prévues à fin 2008 et fin 2012 par les précédents décrets relatifs au PNGMDR, pour les plans triennaux 2006-2008 puis 2009-2012, complétée d'une analyse de l'adéquation entre les perspectives de valorisation et les quantités détenues et à détenir.

Les matières qui sont examinées dans cette note sont les suivantes :

- Combustibles usés
- Uranium naturel
- Uranium enrichi
- Uranium appauvri
- Uranium de recyclage issu du traitement des combustibles usés (URT)
- Plutonium
- Matières Thorifères

L'inventaire National établi par l'ANDRA décrit les quantités de ces matières présentes sur le sol français.

2. VALORISATION DES COMBUSTIBLES USES

2.1. Procédés de valorisation

Pour l'essentiel, les combustibles usés (en totalité ou partiellement) présents sur le sol français sont des combustibles des réacteurs à eau légère, soit en cours d'irradiation dans les réacteurs d'EDF, soit déchargés de ces mêmes réacteurs et entreposés en piscine (sur les sites de ces réacteurs ou dans l'usine AREVA de La Hague). Le stock à l'inventaire national de 2012 était d'environ 19 000 tonnes, y compris les cœurs actuellement en réacteurs.

Les combustibles usés appartiennent majoritairement à EDF et, pour une part nettement plus faible, au CEA ainsi qu'aux clients étrangers d'AREVA.

2.1.1. Combustibles des réacteurs électrogènes à l'uranium

La valorisation des combustibles usés civils à l'uranium via le traitement-recyclage à l'usine de La Hague et le recyclage des matières qui y sont séparées, est une opération déjà largement mise en œuvre au plan industriel, notamment par la fabrication de combustibles MOX et URE.

Les chapitres suivants rappellent brièvement l'expérience industrielle acquise en France dans le domaine du traitement pour recyclage des combustibles.

2.1.2. Traitement des combustibles UOX usés

Le recyclage de ce type de combustibles a démarré rapidement après la mise en service industrielle des premiers réacteurs nucléaires de sorte que leur traitement, qui permet notamment de séparer les matières plutonium et uranium contenues dans les combustibles usés, 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 traitement de La Hague, UP2, a traité de l'ordre de 5 000 tonnes de combustible de la filière française UNGG (Uranium Naturel Graphite Gaz des réacteurs des centrales de Chinon, Saint-Laurent des Eaux, Bugey), à l'instar de l'usine UP1 de Marcoule (démarrée en 1957)

Au début des années 1970, la France a décidé de se doter d'un parc électronucléaire composé principalement d'un type de réacteurs, dits à « eau légère pressurisée » (REP), au combustible à oxyde d'uranium enrichi. L'usine UP2 a été adaptée à cette évolution, et sa capacité (portée à 400 t/an de combustible oxyde) a permis de proposer cette prestation de traitement à des clients français et étrangers. Les contrats correspondants, signés à partir de 1971, sont aujourd'hui appelés « contrats anciens ». Tous les combustibles concernés ont été traités.

Avec le démarrage des usines UP3 (1990) et UP2-800 (1994) (capacité totale de ces usines de 1 700 t/an), ce sont plus de 29 000 tonnes de combustibles usés de type eau légère qui ont été traitées à La Hague à fin 2013, dont environ 2/3 pour EDF, 20% pour des clients allemands, 10 % pour des clients japonais, et le reste pour des clients belges, suisses, italiens et néerlandais.

La filière est totalement opérationnelle.

2.1.3. Traitement des combustibles URE usés

Le combustible usé URE, produit à partir d'uranium de recyclage issu du traitement (URT) ré-enrichi, est proche du combustible UOX.

L'usine de La Hague est autorisée à recevoir, entreposer et traiter ce type de combustible par arrêté du 8 février 2005.

La faisabilité de son traitement à l'échelle industrielle, sans impact notable sur le procédé, a pu être montrée en 2006.

Compte tenu de la nature des matières séparées, semblables à celle des combustibles à l'uranium naturel enrichi usés mais avec toutefois des teneurs en plutonium 238 et uranium 236 plus élevées, le recyclage de l'URE dans les réacteurs actuels, avec les mêmes performances énergétiques que celles des combustibles à l'uranium naturel nécessiterait de dépasser la limite réglementaire de 5 % en U235 afin de compenser la présence de l'uranium 236 qui est fortement neutrophage. Le potentiel énergétique de l'URT provenant des combustibles à l'URE usés est jugé insuffisant pour un deuxième recyclage dans les réacteurs actuels. La gestion industrielle de référence des combustibles URE usés est le recyclage dans les réacteurs de 4^e génération, à l'instar des combustibles MOX (voir plus loin). Ces réacteurs de 4^e génération ne subissent pas la pénalité apportée les isotopes pairs ²³⁴U et ²³⁶U qui ne sont pas neutrophages en réacteur à neutrons rapides.

La logique consiste donc à utiliser les stocks de combustibles URE usés – selon la même démarche que pour les stocks de combustibles MOX - comme une réserve stratégique pour alimenter la future génération de réacteurs.

2.1.4 Valorisation des combustibles usés des réacteurs électrogènes au plutonium

La valorisation des combustibles usés civils au 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, par leur combinaison, de recycler industriellement des combustibles MOX usés. En effet, l'usine UP2 800 avait été conçue dès l'origine pour recycler des combustibles variés, dont le MOX (voir notamment les deux décrets du 10 janvier 2003 autorisant le traitement des MOX dans les installations nucléaires de base UP 3-A et UP2-800).

Ainsi, le même procédé de base, déjà largement validé pour les combustibles UOX, est utilisé pour le MOX avec des adaptations mineures (changement de paramètres opératoires, adjonction de réactifs supplémentaires...). Les différences UOX-MOX les plus sensibles se manifestent sur les unités de cisailage et dissolution, de gestion du plutonium séparé et - à un moindre degré - de vitrification, mais ces différences demeurent limitées.

Quatre campagnes de traitement de combustible MOX REP ont été réalisées à AREVA La Hague entre 2004 et 2008, avec un pas de progression significatif sur les quantités traitées et sur les caractéristiques intrinsèques des MOX (taux de combustion et teneur en plutonium, notamment).

Depuis l'origine, 67,5 tonnes de combustible MOX REP usé ont été traitées dans l'usine de La Hague. Par ailleurs, plusieurs dizaines de tonnes de combustibles MOX RNR usés ont été traitées tant à La Hague qu'à Marcoule.

MOX RNR : 27,5 t

MOX REP : 67,5 t

La faisabilité industrielle du traitement des combustibles MOX REP et MOX RNR est donc aujourd'hui établie.

Les combustibles MOX usés sont entreposés et constituent une réserve énergétique de plutonium qui sera nécessaire plus tard pour le démarrage des réacteurs de 4^e génération.

2.1.5. Valorisation des autres combustibles usés : de propulsion navale (PN) et de réacteurs de recherche (RTR)

Concernant les réacteurs de recherche (RTR), 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 diluées dans les solutions de dissolution de combustible UOX et répondent ainsi à l'ensemble des exigences et critères requis pour les opérations aval. Cette technique est à ce jour autorisée pour le traitement de combustibles australiens (les réacteurs Hifar et Moata de l'ANSTO), belges (BR2) et français (réacteur de l'IN2P3 à Strasbourg ; réacteurs SILOE, SILOETTE, ULYSSE et SCARABEE).

Parmi les quatre rédacteurs de cette note, seul le CEA possède des cœurs nourriciers de réacteurs de recherche ou prototypes ainsi que des combustibles expérimentaux et échantillons testés sous irradiation.

Il est prévu de traiter la plupart des combustibles de type « caramel » (sandwich d'alliage d'uranium enrichi entre deux plaques métalliques) utilisés actuellement en tant que combustibles de réacteurs de recherche (OSIRIS, ISIS, ORPHEE). À ce jour, aucune campagne n'a encore eu lieu dans l'usine de La Hague. Toutefois, 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. Cette campagne a permis de traiter, 2,3 tonnes d'UO₂ et de valider le concept.

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. Les opérations aval, dont la dissolution, n'ont pas posé de problème particulier.

Le CEA possède d'autres types de combustibles RTR usés que les caramels. Les combustibles issus des réacteurs CABRI, PHEBUS seront traités dans les ateliers existants.

Par ailleurs de faibles quantités de combustibles usés, d'autres natures (combustibles OSIRIS oxyde, combustibles historiques métalliques, et crayons et échantillons expérimentaux) ont depuis début 2012 comme voie de référence l'entreposage en vue d'un recyclage futur. En effet, ce dernier nécessitera de nouveaux équipements dans l'usine de La Hague qui font l'objet d'études dans le cadre d'accords CEA - AREVA

Concernant 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 le traitement industriel nécessitera de nouveaux équipements dans l'usine de La Hague.

2.1.6. Conclusion : Statut des combustibles usés

Pour l'ensemble des combustibles usés ci-dessus, la faisabilité de la valorisation est donc acquise. Cette valorisation est d'ores et déjà pratiquée à grande échelle pour le flux majoritaire (combustibles UOX). Pour le flux résiduel, des campagnes industrielles ou de démonstration ont déjà été menées.

2.2. Adéquation entre perspectives de valorisation et quantités détenues et à détenir du combustibles usés

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 recyclage et de fabrication de combustibles (notamment La Hague et MELOX),
- 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 CU UOx usés. Les combustibles URE et MOX usés sont entreposés en piscine et nécessiteront des adaptations de l'outil industriel, en particulier pour les combustibles usés de génération IV.

Le stock actuel de CU constitue une source de matière indispensable pour le déploiement d'un parc de réacteurs de génération IV.

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

A noter que des études complémentaires spécifiques sont menées pour affiner les scénarii industriels intégrant des paramètres technologiques, industriels, économiques et stratégiques permettant d'optimiser les transitions entre génération de parcs de réacteurs et la valorisation des combustibles usés.

3. VALORISATION DE L'URANIUM NATUREL ET DE L'URANIUM 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 d'AREVA et de ses clients, d'EDF et, pour une part nettement plus faible, du CEA.

3.1 Utilisations de l'uranium naturel et de l'uranium 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.

La nature de matière de l'uranium naturel et de l'uranium enrichi n'est pas à démontrer : elle est observable par tout un chacun. En outre, la question du changement de statut de ces matières en France seulement ne serait pas pertinente car elles sont à la base d'un marché commercial international bien établi.

3.2 Adéquation entre perspectives de valorisation et quantités détenues et à détenir

Ainsi, par définition l'uranium naturel et l'uranium enrichi ne sont jamais accumulés par absence de débouché. Les entreposages existants ne résultent que de choix stratégiques et commerciaux.

4. VALORISATION DE L'URANIUM APPAUVRI

L'enrichissement de l'uranium génère de l'hexafluorure d'uranium (UF_6) appauvri en isotope U-235.

A titre d'illustration, le schéma de principe (cf. Figure 1) montre que la production de 1 kg d'uranium enrichi (à 4 %) en U-235 nécessite 9 kg d'uranium naturel (à 0,71%) et génère donc environ 8 kg d'uranium appauvri à 0,3%. L'effort d'enrichissement alors requis est de 5 UTS¹.

Cet effort d'enrichissement est d'autant plus élevé que la teneur en U-235 résiduelle de l'uranium appauvri (taux de rejet) est faible, comme le montre la Figure 2.

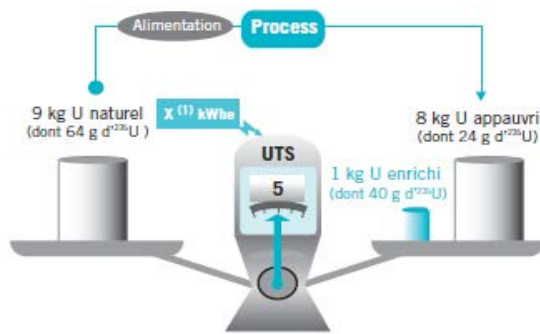


Figure 1

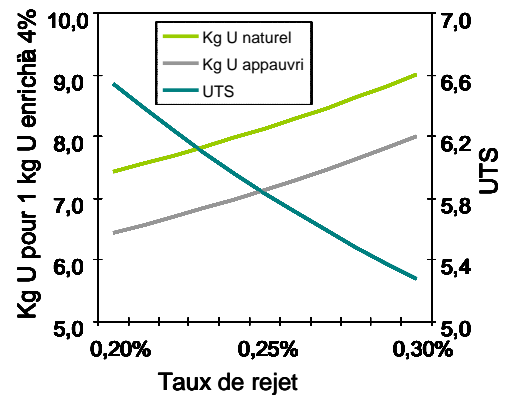


Figure 2

Pour obtenir une même quantité d'uranium enrichi, on peut donc choisir d'utiliser (cf. Figure 2) :

- plus d'uranium naturel et moins de services d'enrichissement ; on génère ainsi plus d'uranium appauvri, ou
- moins d'uranium naturel et plus de services d'enrichissement ; on génère ainsi moins d'uranium appauvri.

L'arbitrage résulte d'une optimisation économique permanente entre le coût de l'uranium naturel et le coût de l'UTS.

¹ La production d'une usine d'enrichissement s'exprime en Unités de Travail de Séparation (UTS). Cette unité est proportionnelle à la quantité d'uranium traitée et donne une mesure du travail nécessaire pour séparer l'isotope U-235 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.

4.1. Procédés de valorisation envisagés

La matière appauvrie, quelle que soit sa teneur, contient toujours de l'uranium 235 et est donc toujours valorisable soit directement soit par ré-enrichissement pour une utilisation dans les générations actuelles de réacteurs. Des critères techniques et économiques définissent donc les possibilités de réutilisation de cet uranium à un instant donné.

Par ailleurs la qualification d'« appauvri » perd son sens lorsque l'on considère des systèmes de production d'énergie exploitant la fertilité de l'uranium 238 qui, irradié par des neutrons rapides, est converti directement en plutonium 239 fissile (voir paragraphe 4.2.2.3).

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

- la déconversion en oxyde d'uranium appauvri pour une valorisation sous forme de combustible MOX, puis ultérieurement sous forme de combustible pour réacteurs à neutrons rapides ;
- le ré-enrichissement en vue de la fabrication de combustible UOX ;
- la valorisation à d'autres fins que la production d'énergie après transformation, par exemple sous forme métallique ; l'uranium appauvri présente en effet outre son potentiel énergétique de nombreuses propriétés dont certaines ont déjà été exploitées.

Avant valorisation, l'hexafluorure d'uranium appauvri est généralement transformé par «défluoration» en U_3O_8 , un oxyde d'uranium stable, incombustible, insoluble dans l'eau et non corrosif pour un entreposage sûr avant sa valorisation. La défluoration de l'uranium appauvri est réalisée dans une installation (appelée « W ») sur le site du Tricastin. Les entreposages sont modulaires et leur capacité peut être adaptée en fonction des besoins. De manière générale, l'adéquation entre les capacités d'entreposage et les inventaires prévisionnels fait l'objet d'une analyse spécifique dans le cadre du Plan National de Gestion des Matières et Déchets Radioactifs.

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

4.2.1. Quantités détenues et à détenir

Au 31 décembre 2013, l'inventaire d'uranium appauvri détenu par AREVA était de l'ordre de 286 000 tonnes de métal lourd (tML ou tonnes d'U), réparti sur les sites suivants :

Site	Département	tML (arrondi à 100 tML)
Bessines	Haute-Vienne	115 200
Tricastin	Drôme	170 200
Comurhex – Malvési	Aude	500
MELOX – Marcoule	Gard	100
Total sites AREVA		286 000

L'uranium appauvri détenu par AREVA est actuellement généré dans le cadre des opérations d'enrichissement assurées par l'usine Georges Besse II sur le site du Tricastin. A fin 2013, l'usine atteignait 74 % de sa capacité nominale de 7,5 MUTS par an, capacité qui devrait être atteinte dès 2016.

Le tableau suivant donne une estimation des quantités d'uranium appauvri qui seront générées jusqu'en 2030. Cette estimation est faite sur la base de la capacité nominale évoquée ci-avant. Les taux d'enrichissement et de rejet pris en compte pour cette simulation reflètent les évolutions envisagées par nos clients électriciens pour leur combustible.

Année	2013	2020	2030
tonnes U appauvri (cumul généré)	286 000	330 000	410 000

4.2.2. Perspectives de valorisation

4.2.2.1. Poursuite de la valorisation sous forme de combustible MOX

L'uranium appauvri est aujourd'hui valorisé sous forme de combustible MOX. Il 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. La capacité annuelle autorisée pour cette usine est de 195 tML de combustible MOX. La production effective sur les vingt prochaines années dépendra de l'évolution du marché. On peut raisonnablement table sur une utilisation moyenne de 150 tU par an sur cette période.

4.2.2.2. Un environnement favorable à des campagnes de ré-enrichissement

Le développement du nucléaire se poursuit au plan mondial, tiré principalement par la Chine, la Russie, la Corée du Sud et l'Inde. Selon l'AIEA et la WNA (World Nuclear Association), à fin 2013, 72 réacteurs étaient en construction dans le monde (contre 67 à fin 2012), 170 en commande ou en projet (contre 165 à fin 2012, 152 à fin 2011 et 154 à fin 2010) et plus de 300 autres sont envisagés dans les années à venir.

La perspective d'un recours croissant à l'énergie nucléaire, notamment dans les pays émergents, est soulignée par différentes organisations internationales. La figure 3 ci-après présente différents scénarios d'évolution de la capacité nucléaire mondiale installée avec une croissance de plus de 90% 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 en particulier.

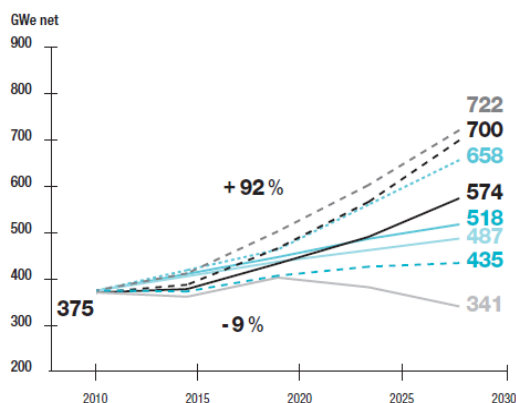


Figure 3

- - - WNA 2013 - Haut - - - IAEA 2013 - Bas
 — WNA 2013 - Référence — IAEA 2013 - Politiques actuelles
 — WNA 2013 - Bas — IAEA 2013 - Nouvelles politiques
 - - - IAEA 2013 - Haut - - - IAEA 2013 - Stabilisation 450 ppr

Sources : AIEA, WINA, International Energy Agency.

Les marchés de l'uranium sont attendus en croissance avec, pour l'uranium naturel, une demande supérieure de 19 % en 2020 par rapport à 2013 selon la WNA, notamment tirée par le redémarrage des réacteurs japonais et la croissance des besoins réacteurs du parc chinois. Du fait de la hausse des besoins, des décalages de projets et des réductions de production de mines existantes, le marché international prévoit ainsi une hausse du prix de l'uranium naturel. Dans ce contexte, l'uranium appauvri constitue une ressource importante et donc un des éléments clés de l'offre globale d'AREVA.

Par ailleurs et dans le cadre d'accords de non prolifération conclus entre la Russie et les Etats-Unis sur une base commerciale, l'offre mondiale incluait la valorisation d'un stock significatif d'uranium issu de la conversion d'uranium hautement enrichi. Ce programme appelé « Megatons to Megawatts » a pris fin en décembre 2013.

Le recours aux stocks d'uranium appauvri est une option permettant de compenser la disparition des ressources secondaires associée à l'arrêt de ces programmes.

Il existe actuellement une surcapacité de services d'enrichissement par rapport à la demande du marché mondial. Cette surcapacité est favorable à des campagnes de ré-enrichissement de l'uranium. D'autre part, la recherche du coût minimal du combustible par le producteur d'électricité nucléaire détermine la teneur du produit enrichi et des rejets. Un facteur important à ce titre est le coût des services d'enrichissement et de l'uranium. Plus le prix de l'uranium est faible, plus le taux de rejet optimal sera élevé, à un coût d'enrichissement donné. Plus le prix de l'uranium est élevé, plus le taux de rejet optimal sera faible. La variation du taux de rejet optimal représente une possibilité pour l'enrichisseur de réalimenter son usine avec le flux appauvri quand les conditions économiques sont appropriées.

A partir de ces éléments, la figure ci-après donne les quantités équivalentes d'uranium naturel qui pourraient résulter du ré-enrichissement des 286 000 tonnes d'uranium appauvri détenues par AREVA et ceci pour différents taux de rejet.

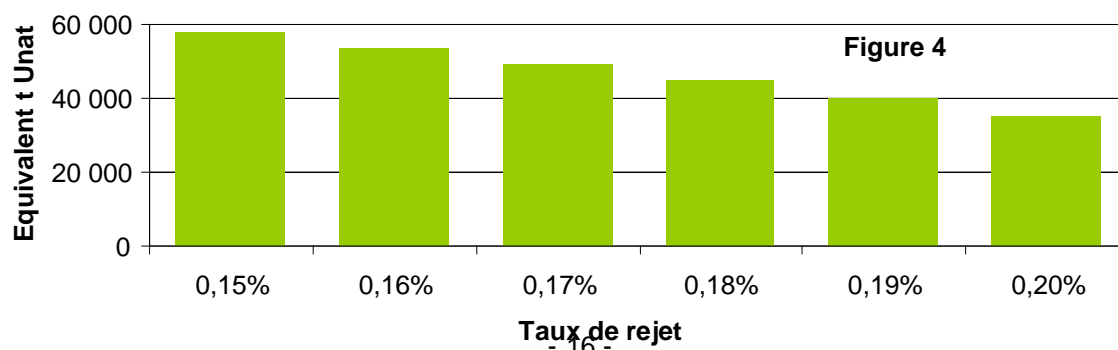


Figure 4

On pourrait ainsi obtenir un équivalent « uranium naturel » d'environ 50 000 tonnes à partir du stock d'uranium appauvri détenu. Cette valeur est à comparer aux besoins réacteurs qui, en 2013, s'établissaient à environ 65 000 tU ^[2]. La figure 5 donne à titre purement théorique et illustratif une estimation de la valeur de cet « équivalent uranium naturel » en fonction du prix de l'uranium naturel.

Ces valeurs sont comparées au coût de conversion et d'enrichissement qui seraient requis pour enrichir à 0,711 % en U-235 (teneur de l'Unat) l'inventaire d'uranium appauvri détenu et ceci sur la base :

- d'un coût de 92 \$ pour l'UTS et de 7.5 \$/ kg U pour la conversion (indices Spot UXc mi-2014 [2]) - cas a en Figure 5,
- d'un coût de 95 \$ pour l'UTS et de 17 \$/ kg U pour la conversion (indices Long Term UXc mi-2014 [2]) - cas b en Figure 5.

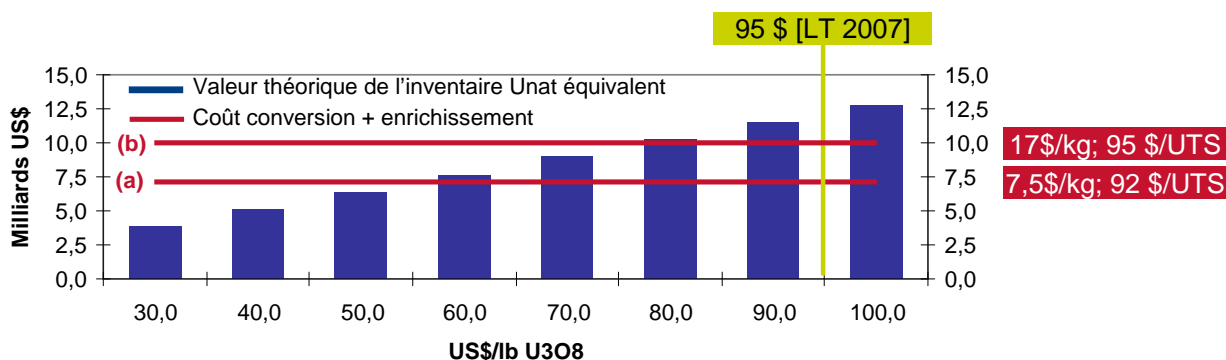


Figure 5

Cette estimation bien que purement théorique est à mettre en regard avec :

- l'évolution du prix de l'uranium naturel sur les dernières années (figure 6) et notamment les pics à 95 \$/lb U₃O₈ pour le prix long terme et 136 \$/lb pour le marché spot et,
- son évolution future telle qu'estimée notamment par UXc en 2014 (cf.figure 7).

Pour cette estimation, la valeur du stock équivalent Unat compense le coût de l'effort de conversion et d'enrichissement requis pour environ 50 / 60 US\$/lb et est très supérieure si l'on prend en compte les niveaux de prix atteints en 2007.

² Demande « brute » exprimée en équivalent uranium naturel, source : WNA 2013

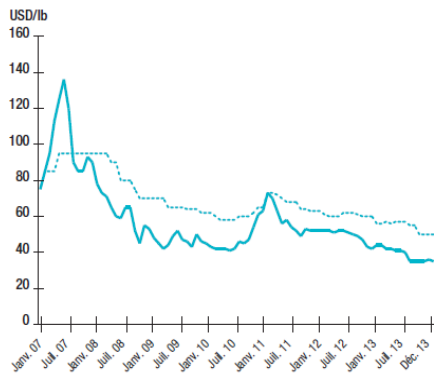


Figure 6 : évolution 2007-2013 des indices prix de l'uranium [1]

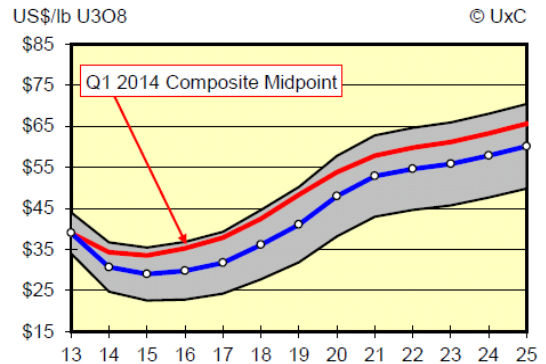


Figure 7 : scénarios d'évolution des prix de l'uranium [2]

La perspective d'augmentation des prix de l'uranium naturel telle que présentée en Figure 7 fait du stock actuel un des composants majeurs de l'offre AREVA.

Cette perspective est l'un des paramètres motivant certains acteurs internationaux (cf. Annexe) à mettre d'ores et déjà en œuvre des programmes de ré-enrichissement de l'uranium appauvri.

A noter que le marché de l'uranium naturel s'étant profondément tendu au début des années 2000 jusque 2007-2008, environ 7700 tU d' U_3O_8 appauvris ont ainsi été expédiées, en 2008, de Bessines à l'usine Comurhex de Malvézi pour conversion avant ré-enrichissement.

L'uranium entreposé après stabilisation dans des conditions parfaitement sûres et dans des installations d'entreposage en nombre limité constitue donc un facteur majeur d'optimisation économique de la production d'électricité d'origine nucléaire. Sa gestion relève de la sécurité d'approvisionnement puisqu'il constitue notre seule réserve énergétique présente sur le sol national.

La géopolitique de l'énergie vit actuellement une période mouvementée. Dans un contexte de potentielles ruptures brutales d'approvisionnement, notamment en combustibles fossiles, les 286 000 tonnes d'uranium appauvri (équivalent à environ 50 000 tonnes d'uranium naturel) constituent ainsi un stock stratégique disponible permettant de couvrir plus de 5 années des besoins EDF³ et équivalent à plus de 0,5 milliard de tonnes de pétrole⁴.

³ Sur la base d'un besoin annuel de 8000 tonnes

⁴ Dans les réacteurs actuels, une tonne d' U naturel fournit 420 000 GJ soit 10 000 Tonnes équivalent Pétrole
Source : AIE, Eurostat

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 238, en transformant cet isotope représentant environ 99,7 % de l'uranium appauvri, en plutonium 239 fissile. Cette capacité pourrait ainsi permettre de multiplier les ressources d'énergie liées à l'extraction et l'utilisation d'uranium par un facteur allant jusqu'à 100.

A titre d'illustration, les quantités d'uranium appauvri qui pourraient être utilisées sont données pour un scénario de déploiement de Réacteurs à Neutrons Rapides (RNR) étudié par le CEA fin 2012⁵. Ce scénario est basé sur l'introduction progressive de RNR à partir de 2040, avec un premier palier à 20 GWe suivi d'un second palier à 60 GWe à partir de 2100. Avec l'hypothèse que l'uranium contenu dans les combustibles RNR déchargés est, après traitement, recyclé en même temps que le plutonium dans les RNR, la montée à l'équilibre d'un tel parc de RNR nécessiterait une quantité cumulée d'environ 4000 tonnes d'uranium appauvri pendant le premier siècle (cf. Figure 8), suivi d'une consommation annuelle de 50 tonnes d'uranium appauvri pour alimenter le parc une fois à l'équilibre.

Une variante de ce scénario consisterait à différer le recyclage de l'uranium contenu dans les combustibles RNR déchargés, ce qui conduirait à une consommation cumulée d'uranium appauvri pendant le premier siècle d'environ 30 000 tonnes (Cf. Figure 9), suivi d'une consommation annuelle d'environ 400 tonnes une fois l'équilibre du parc atteint.

A noter que des études complémentaires sont menées pour affiner les scénarii industriels intégrant des paramètres technologiques, industriels, économiques et stratégiques permettant d'optimiser la transition entre les différentes générations.

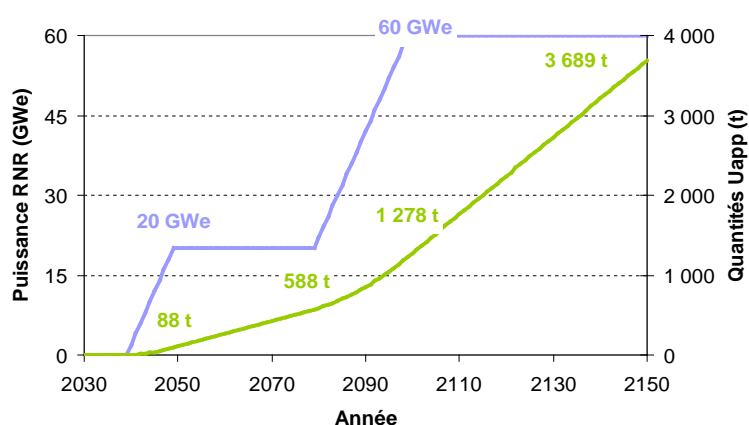


Figure 8 : scénario introduction RNR – consommation d'uranium appauvri avec recyclage

⁵ La gestion durable des matières radioactives avec les réacteurs de 4^{ème} génération, rapport du CEA Décembre 2012, Tome 1, page 36

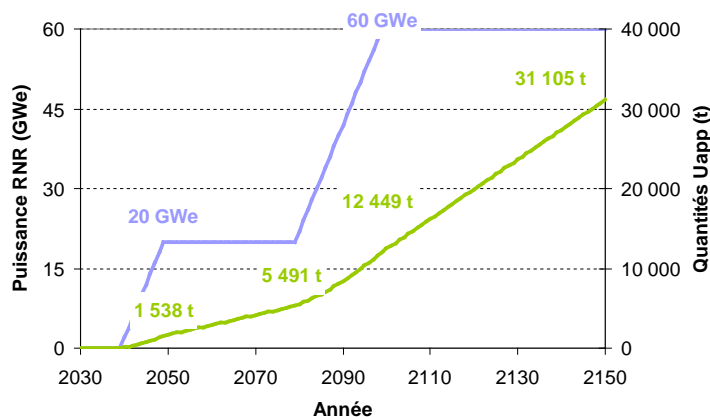


Figure 9 : Scénario introduction RNR – consommation d'uranium appauvri – recyclage différé

Comme évoqué aux paragraphes 4.2.2.1 et 4.2.2.2, l'uranium appauvri constitue sur le court et moyen terme un des éléments clés de l'offre globale d'AREVA. Il le restera sur le plus long terme en permettant de répondre aux besoins du parc mondial de réacteurs de génération IV. Douze pays (Afrique du Sud, Argentine, Brésil, Canada, Chine, Corée du Sud, Etats-Unis, France, Japon, Royaume-Uni, Russie, Suisse) et l'Union européenne ont en effet fait le choix d'adhérer au forum international Générations IV « GIF » [3] et de mettre ainsi en commun certains de leurs efforts de R&D pour le développement de nouvelles générations de systèmes nucléaires.

4.2.2.4. Autres pistes de valorisation

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

En utilisant les propriétés de ce métal exceptionnellement dense (de densité 19 à comparer à celle du plomb égale à 13) différentes applications sont possibles. Certaines d'entre elles ont déjà été mises en œuvre : protection biologique contre les rayonnements, notamment dans les appareils de gammagraphie et de radiothérapie ou dans des emballages de transport de matières radioactives, masses d'équilibrage et éléments perforants, éléments de broyage....

AREVA a décidé d'investiguer des champs d'applications nouveaux qui permettraient de valoriser une partie du stock.

Parmi les pistes à évaluer, on liste :

- Les applications utilisant l'exceptionnelle propriété de très forte densité de l'uranium,
- La génération d'hydrogène par radiolyse alpha,

- La réalisation de protections biologiques en uranium métallique pour des équipements / ateliers / équipements dans des installations nucléaires de base, l'un des intérêts étant la plus grande compacité des équipements qui pourrait être obtenue ; à noter que des emballages de transports de combustibles usés de la famille « IL » comportent un blindage uranium.
- La réalisation de tout ou partie de conteneurs pour entreposage ou stockage de substances radioactives ; par exemple, le concept français de stockage « Cigéo » comporte un surconteneur épais en acier qui retarde le contact de l'eau avec le colis primaire de déchets haute activité vitrifiés. On pourrait évaluer la possibilité d'utiliser de l'uranium sous forme métal pour la réalisation de ces surconteneurs. A noter que dans le cadre du projet de stockage des déchets de haute activité à Yucca Mountain aux Etats-Unis, l'utilisation d'uranium appauvri sous forme d'oxyde dans la composition de conteneurs (cermets UO_2 / acier) a été étudiée [4].
- L'utilisation de la propriété quasi-unique de l'Uranium possédant deux couples oxydo-réducteurs de structures identiques pour la réalisation de piles, en remplacement du vanadium.
- Enfin, AREVA finance des travaux, notamment dans le cadre de missions de « Doctorant – conseil », afin d'explorer les caractéristiques physico-chimiques de certains actinides et lanthanides (éléments ou isotopes) en relation avec de possibles applications du futur (supraconductivité, spin orbitronique, ...).

Toutes ces pistes sont à évaluer sous l'angle de la sûreté, de la pertinence du modèle économique associé, de leur industrialisation, de l'impact environnemental associé.

La mise en œuvre de nombreuses des pistes évoquées ci-avant nécessiterait notamment la transformation de l'uranium sous forme d'oxyde ou d'hexafluorure en uranium métal. Il est à souligner qu'AREVA (COGEMA à l'époque) disposait jusqu'au début des années 1990 d'une filière complète de métallurgie de l'uranium pour satisfaire d'une part les besoins de la filière UNGG, dont le dernier réacteur a cessé son exploitation en 1994 et d'autre part les besoins de fabrication de barreaux d'uranium métal pour des applications militaires.

L'usine de Comurhex Malvési disposait alors d'un atelier de conversion de l'uranium en lingots métalliques en utilisant un procédé de magnésiothermie. Les lingots étaient façonnés en fonction de leurs applications principalement dans les installations de SICN. Après la fermeture au début des années 1990 de l'unité de production de lingots à Malvési, SICN a poursuivi pour le compte de GIAT Industries des opérations de métallurgie de barreaux d'uranium métal. Outre l'usinage, différents traitements étaient appliqués pour protéger les pièces obtenues de la corrosion. L'uranium métal utilisé était importé des Etats-Unis. Ces opérations ont pris fin en février 1999.

AREVA dispose ainsi d'un savoir-faire et d'une expérience qui devraient permettre le redéploiement d'une filière française de la métallurgie de l'uranium si elle s'avérait pertinente d'un point de vue technico-économique.

ANNEXES

Le tableau qui suit synthétise les quantités d'uranium appauvri détenues à l'étranger telles que présentées dans les différentes sources citées.

PAYS	DETENTEUR	tU	SOURCE
ALLEMAGNE - PAYS-BAS - ROYAUME-UNI	URENCO	15 000	WNA-2013
CHINE	CNEIC	25 000	WNA-2013
ETATS-UNIS	DOE	550 000	WNA-2013
FRANCE	AREVA	286 000	AREVA
JAPON	JNFL	14 000	WNA-2013
ROYAUME-UNI	NDA	20 000	WNA-2013
RUSSIE	ROSATOM	545 000	WNA-2013
	TOTAL	1 455 000	

Tous ces pays considèrent l'uranium appauvri comme valorisable. Comme évoqué au paragraphe 4.2.2.2, la perspective d'augmentation des prix de l'uranium naturel est l'un des paramètres motivant certains acteurs internationaux à mettre d'ores et déjà en œuvre ou à considérer des programmes de ré-enrichissement de l'uranium appauvri. Des exemples sont donnés ci-après.

Aux Etats-Unis, le Department Of Energy (DOE) est entré, fin 2013 en négociations avec la société Global Laser Enrichment (GLE), pour la vente d'une partie de son stock d'Uranium appauvri présent sur les sites de Paducah et Portsmouth en vue de leur ré-enrichissement. GLE, une joint venture – GE, Hitachi et Cameco – envisage la construction d'une usine basée sur la technologie d'enrichissement au laser et a récemment terminé la première phase du « Test Loop program » inclus dans son programme de recherche.

Ceci fait suite à l'appel à candidatures lancé par le DOE en 2013 qui comportait les principaux termes suivants [5] :

- Début du transfert : 2019
- Durée : 15 ans et options de 2 x 5 ans en complément
- Paiement au DOE basé sur le prix SPOT

Les négociations sont toujours en cours.

Par ailleurs, le DOE a déjà conclu des accords commerciaux pour le ré-enrichissement de l'uranium appauvri dans le cadre des accords avec USEC, Energy NW et TVA (eg. 9000 tU pour 2012). Après l'arrêt du programme « Megatons to Megawatts » en 2013, il subsiste un programme du DOE avec la NNSA relatif au « HEU » américain (abaissement de la teneur de l'uranium hautement enrichi provenant du déclassement des armes nucléaires).

La société TerraPower [6] travaille également au développement d'un réacteur « à onde progressive » ; il s'agit en fait d'un réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium liquide de 1150 MW, utilisant au démarrage le plutonium issu du combustible REP, puis de l'uranium appauvri qui serait transformé progressivement en plutonium dans le réacteur. La première étape visée est la construction d'un prototype de 600 MWe.

La Russie demeure un acteur majeur dans la valorisation de l'uranium appauvri pour ses propres besoins et, lorsque l'environnement économique s'y prête, pour le compte d'acteurs étrangers. Selon WNA [7], environ 10 000 à 15 000 tonnes par an d'uranium appauvri d'une teneur variant entre 0,25% et 0,40% en U-235 ont été envoyées en Russie pour ré-enrichissement. A noter que le contrat commercial de ré-enrichissement signé entre AREVA et TENEX a pris fin en 2010.

Il est estimé qu'environ la moitié de la capacité de l'usine d'enrichissement de Zelenogorsk est dédiée au ré-enrichissement de l'uranium appauvri [7].

Autre point notable : l'uranium appauvri est également destiné à être utilisé pour la fabrication de combustible destiné aux réacteurs de design BN (réacteur à neutrons rapides).

Les stocks d'uranium appauvri peuvent aussi servir de composant dans certains concepts de combustibles pour les réacteurs de type Candu.

Les détenteurs d'uranium appauvri considèrent ainsi l'uranium appauvri comme une matière valorisable à court, moyen et long termes et comme un élément important de l'offre globale de l'amont du cycle nucléaire.

REFERENCES

[1] UxC Historical Ux Price Charts – Ux Consulting – www.uxc.com

[2] Uranium Market Outlook – quarterly report Q2 – 2014, Ux Consulting

[3] The Generation IV International Forum (GIF) – www.gen-4.org

[4] Repository criticality control with depleted uranium dioxide cermet waste packages – Charles W. Forsberg – Oak Ridge National Laboratory* - July 7, 2001

[5] Update on US Government Excess Uranium Inventory Disposition - September 11, 2013 , the Ux Consulting Company, Anna Bryndza, WNA Plenary working Group

[6] www.terrapower.com

[7] World Nuclear Association - Russia's Nuclear Fuel Cycle (Updated July 2014) - www.world-nuclear.org

5. VALORISATION DE L'URANIUM DE RECYCLAGE ISSU DU TRAITEMENT DES COMBUSTIBLES USES (OU 'URT')

5.1. Procédés de valorisation envisagés

Le traitement des combustibles usés des réacteurs à eau légère permet de réduire la quantité de déchets et d'économiser les ressources en uranium. 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. La valeur énergétique de l'URT est comparable à celle de l'uranium naturel, les teneurs en U235 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 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 U235 bien supérieures, du fait de l'enrichissement initial de ces combustibles souvent élevé.

Valorisation de l'URT sur le territoire français

L'URT présent sur le territoire français est principalement propriété d'EDF et d'AREVA, et dans une moindre mesure du CEA. L'utilisation de cet URT, à l'heure actuelle, est le recyclage dans les réacteurs à eau légère.

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'U3O8 (dans les installations de Pierrelatte en ce qui concerne AREVA).

Pour EDF, une partie de cet uranium a été enrichie puis utilisée pour la fabrication de combustibles à base d'URT qui sont chargés dans les réacteurs autorisés à cet effet (à Cruas, actuellement) ; la part d'URT non-recyclée est entreposée sur le site de Pierrelatte sous la forme stable U3O8, constituant un stock stratégique de matière valorisable. Le recyclage de l'URT dans les réacteurs d'EDF a débuté en 1994. Le niveau de recyclage dépend principalement de l'attractivité économique de l'URT par rapport à l'uranium naturel et de son rôle dans la sécurisation des approvisionnements.

Ainsi, jusqu'en 2009, 300 t d'URT étaient recyclées annuellement dans deux tranches d'EDF situées sur le site de Cruas. Cette quantité est montée jusqu'à 650 t (en 2010, 2011 et 2012) permettant d'alimenter les quatre tranches du site de Cruas. Elle pourra continuer à évoluer dans le futur en fonction du contexte économique et industriel.

Le recyclage de l'URT sur Cruas a été suspendu en 2013. EDF étudie aujourd'hui les conditions technico-économiques de reprise de ce recyclage. Pour la part d'URT qui n'est pas encore recyclée, le retour d'expérience obtenu depuis plus de vingt-cinq ans montre que l'URT peut être entreposé durablement sous sa forme stable U3O8 en toute sûreté. Ce stock stratégique pourra être valorisé dans le futur en fonction :

- du contexte économique (différentiel de coût de la filière URT par rapport à la filière uranium naturel) ;

- d'un arbitrage entre utilisation présente et future, notamment en termes de sécurité d'approvisionnement ;
- des autorisations de fonctionnement des réacteurs avec du combustible à l'URT délivrées par l'Autorité de Sûreté Nucléaire.

À plus long terme, l'usage de l'uranium de recyclage issu du traitement est également intéressant pour le combustible des réacteurs de quatrième génération à neutrons rapides, comme support au plutonium car l'enrichissement résiduel peut permettre de réduire le besoin en plutonium.

Valorisation de l'URT à l'étranger

D'autres clients d'AREVA (allemands, suisses, américains...) valorisent également leur URT dans des réacteurs à eau légère. La teneur en isotope 235 de cet URT est ajustée par mélange avec de l'uranium enrichi (qui peut être, par exemple, de l'URT provenant de combustibles de réacteurs de recherche ou de la matière provenant du démantèlement des armes stratégiques). Globalement, l'expérience du recyclage de l'URT est très importante dans le monde : 75 réacteurs ont été chargés en URT (majoritairement en Europe de l'Ouest, Russie et Japon).. Elle se développe notamment dans les pays qui disposent à la fois de réacteurs à eau légère et de réacteurs à eau lourde, comme la Corée, l'Inde, la Chine. Cette dernière, par exemple, a chargé des assemblages à l'URT dans deux réacteurs CANDU pendant un an depuis mars 2010, sans difficulté notable. Un projet de mise à niveau de production de combustible à l'URT pour CANDU doit être prochainement approuvé dans le but de charger un cœur complet en URT en 2015.

De la même manière, des pays comme l'Argentine et la Roumanie s'intéressent à l'utilisation de l'URT pour leur parc de CANDU, comme source de matière première à prix stable sur le long terme. À titre indicatif, la consommation annuelle des réacteurs CANDU est actuellement d'environ 3 000 tonnes d'uranium naturel par an, qui représente un débouché potentiel d'un volume équivalent pour l'URT.

Le retour d'expérience industriel disponible ainsi que les perspectives nouvelles d'utilisation dans le monde à moyen et long termes (réacteurs à eau lourde et réacteurs de quatrième génération, notamment) confirment le caractère valorisable de l'uranium de recyclage issu du traitement.

5.2. Adéquation entre perspectives de valorisation et quantités détenues et à détenir

5.2.1. Quantités détenues et à détenir

Les quantités d'URT sont affichées dans l'inventaire national 2012 pour l'ensemble des installations AREVA du territoire français. Elles intègrent les encours usines, clients étrangers y compris, à hauteur de 25 900 tU (dont 2 640 t clients étrangers et de 16 380 tU de stock d'URT EDF).

Le stock d'URT d'EDF s'incrémente chaque année d'environ 1000 t/an. La stratégie de gestion d'EDF est le recyclage de cette matière valorisable dans ses réacteurs.

5.2.2. Perspectives de valorisation

La reprise du recyclage URT sur les 4 tranches aujourd'hui autorisées de Cruas, en fonction des perspectives actuelles du marché, est envisagée vers 2020 : la consommation correspondante serait de l'ordre de 650 t/an. Cette perspective de valorisation permet de consommer 6500 tonnes par tranche de 10 ans. A cet horizon, l'évolution de l'équilibre offre-demande pour l'uranium naturel pourrait créer un contexte économique plus favorable au recyclage de l'URT, en France et au niveau international. EDF peut envisager l'URTage de tranches supplémentaires, dans la mesure où aucun verrou technique n'est identifié.

In fine, le stock d'URT sera également utilisé dans les réacteurs de 4ème génération.

6. VALORISATION DU PLUTONIUM

Il s'agit ici du plutonium issu des combustibles usés après traitement. Le plutonium contenu dans les assemblages combustibles usés est en effet extrait de ceux-ci lors de leur traitement (cf. le début de la présente note). Un combustible usé à l'uranium de type eau légère contient aujourd'hui environ 1 % de plutonium (en masse).

Le plutonium français est principalement la propriété d'EDF et d'AREVA dans une moindre mesure et, pour une part nettement plus faible, du CEA.

6.1 Procédé de valorisation

Le plutonium présente un potentiel énergétique très important. En effet, en terme énergétique, 1 g de plutonium équivaut à une tonne de pétrole environ.

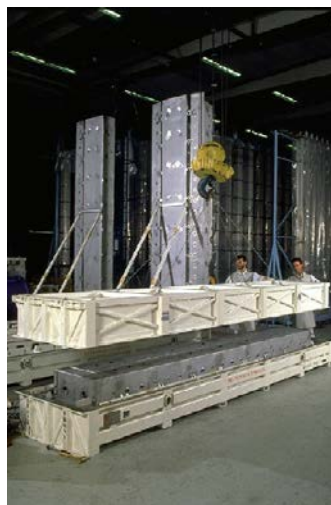
Une fois mis en solution, extrait et séparé des autres matières contenues dans le combustible usé, le plutonium est purifié et conditionné à AREVA NC La Hague sous forme stable de poudre d'oxyde PuO_2 (ateliers R4 et T4).



Boîtes de PuO_2 (La Hague)

Le recyclage du plutonium est aujourd'hui réalisé dans le combustible MOX, qui comporte de l'uranium appauvri comme support (cf. plus haut) et du plutonium, sous la forme de pastilles de poudre d'oxydes $(\text{U}, \text{Pu})\text{O}_2$.

En France, le combustible MOX utilisé par EDF contribue à hauteur de 10 % environ à la production électrique nucléaire nationale. Ce sont ainsi de l'ordre de 10 tonnes de plutonium qui sont annuellement recyclées, soit la totalité du flux issu des combustibles EDF traités dans l'usine de La Hague par AREVA NC.



Assemblage combustible MOX

La politique de traitement-recyclage d'EDF repose sur le principe de l'équilibre des flux Pu, c'est-à-dire que le niveau de traitement est ajusté à la capacité de recyclage du Pu dans les réacteurs Moxés. En 2013, les réacteurs de Blayais 3 & 4 ont obtenu l'autorisation de Moxage de l'ASN, étendant ainsi à 24 le nombre de réacteurs Moxables du parc français d'EDF. Le niveau de traitement sera ajusté en conséquence, permettant ainsi de maintenir le stock de Pu d'EDF. A terme, ce stock sera indispensable au démarrage des réacteurs de 4ème génération.

Cette substance est donc une matière dont le recyclage est industriellement démontré.

6.2 Adéquation entre valorisation et quantités détenues et à détenir

L'adéquation entre valorisation et quantité de plutonium est garantie par le recyclage systématique du plutonium, dans le prolongement de ce qui est réalisé aujourd'hui en France dans les réacteurs à eau. Cela permettra d'utiliser et de valoriser la totalité du plutonium existant, et de poursuivre ainsi, dans la durée, la stratégie de cycle fermé permettant de produire des déchets ultimes ne contenant pratiquement pas de plutonium. En effet, ce radioélément est celui qui ferait peser les plus fortes contraintes sur un stockage géologique profond, notamment au-delà des 500 premières années.

Le multirecyclage de l'uranium et du plutonium en RNR est une des clés pour la mise en œuvre d'options nucléaires durables, qu'il s'agisse d'éviter l'accumulation de matières sensibles, de préserver les ressources naturelles ou de limiter la quantité de déchets ultimes. C'est l'objectif premier d'Astrid que de démontrer cette capacité de multirecyclage des matières valorisables.

L'intérêt de tels systèmes est largement partagé au plan international ; c'est ainsi que le Forum international génération IV (ou GIF) a permis, depuis près de 10 ans, d'analyser les divers systèmes envisageables, de dégager les critères importants pour leur développement ; parmi ceux-ci, la sûreté des réacteurs est un point clé, et la recherche des meilleurs standards en la matière constitue l'un des objectifs essentiels des équipes engagées dans ces développements.

En conclusion, les stratégies industrielles mises en œuvre au plan national et international visent bien à la valorisation, in fine, de la totalité des quantités du plutonium disponible.

7. VALORISATION DES MATIERES THORIFERES

Les matières thorifères considérées ici sont des nitrates de thorium et des hydroxydes de thorium. 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.

7.1. Procédés de valorisation envisagés par AREVA et SOLVAY

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

7.1.1. Valorisation des matières thorifères pour la production d'énergie

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 (Advance Heavy Water Reactor, MSR, High Temperature Gas Reactors),
- soit via une utilisation du thorium en complément du cycle U/Pu dans les parcs de réacteurs existants. En pratique, les caractéristiques de l'uranium 233U en spectre neutron thermique permettent des synergies importantes entre le cycle U/Pu classique et le cycle Th/233U, ce qui permet d'envisager des options de multi-recyclage dans les réacteurs à spectre thermique.

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, l'autre alternative qui consiste en l'introduction graduelle du thorium dans les réacteurs à eau en vue d'une amélioration du cycle uranium-plutonium est perçue comme plus proche puisqu'elle utilise les réacteurs d'une technologie existante.

Areva et Solvay envisagent ces deux alternatives de cycle depuis plusieurs années.

Solvay soutient l'introduction du thorium dans le cycle nucléaire, par exemple par le financement de travaux de recherches du CNRS (IN2P3 Orsay- sur la filière sels fondus) au travers d'une thèse de doctorat sur l'épuration électrochimique des produits de fissions contenus dans le combustible sels fondus LiF-ThF₄ d'un réacteur à neutron rapide (novembre 2012). A cette occasion, une dizaine de kilo de fluorure de thorium a été préparé par Solvay.

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.

Areva a également engagé différentes actions. Dès 2010 un programme de R&D a été développé sur la faisabilité de l'introduction graduelle du thorium dans des réacteurs à eau. L'objectif était de valider la seconde alternative ci-dessus dans la gestion du cycle uranium-plutonium, permettant un multi-recyclage de différentes matières fertiles ou fissiles à plus court terme.

Afin de conforter ces perspectives de valorisation AREVA et Solvay ont conjointement engagé 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.

Sur 2008-2012 « Phase 0 » une première étape, finalisée en 2010 a permis de confirmer les potentialités de l'utilisation du thorium en réacteur à eau légère ainsi qu'en d'autres réacteurs de types CANDU. Une seconde étape, finalisée en 2012, a recensé les technologies disponibles, les partenariats possibles et le programme de R&D appliquée à mettre en œuvre.

A l'issue de cette phase AREVA et Solvay ont conclu un accord de confidentialité le 5 Octobre 2012 en vue de confirmer l'intérêt d'une coopération technique entre elles dans le domaine de l'utilisation du thorium dans les systèmes nucléaires.

En 2013, « Phase 1a », l'analyse a été confortée par une étude d'application à l'international et par des investissements préparatoires (à Erlangen) pour un programme de R&D appliquée pluriannuel dès 2014. Le 11 octobre 2013 AREVA et Solvay ont conclu 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 (début de la phase 1b), 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. Dans ce laboratoire, les poudres uranifères sont préparées, pressées sous forme de pastilles et frittées. Les caractéristiques des poudres et des pastilles – qu'elles soient microstructurales, mécaniques ou thermiques - y sont analysées.

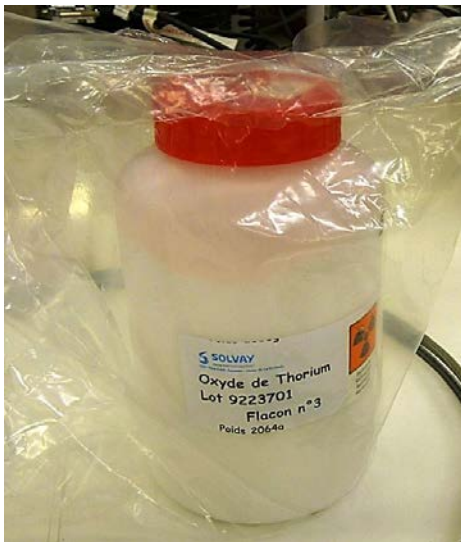
La licence du laboratoire de combustible permet déjà de manipuler et stocker jusqu'à 100 kg de matières thorifères. Une pièce supplémentaire a été mise à la disposition du laboratoire d'uranium dans le but d'être dédiée à l'utilisation essentielle du thorium. Différentes mesures ont été mises en place tout au long de l'année :

- Le ministère de Bavière pour la protection environnementale et le TÜV (Association d'inspection technique allemande) ont été informés des activités qui seront mises en place au sein du Programme de Valorisation du Thorium. Les conditions requises pour

une modification de la licence « zone radioactive » et son application dans la nouvelle pièce ont été discutées et les documents nécessaires élaborés.

- Une demande de permis de construire a été déposée auprès des autorités compétentes.
- Des améliorations / reconstructions au niveau du sol, des murs, et des alimentations en eau et électricité dans la pièce supplémentaire ont été mises en œuvre afin de satisfaire les conditions requises pour l'obtention de l'autorisation dite « de manipulation en zone radioactive ».
- Les autorisations administratives sont attendues en fin d'année.
- En parallèle, des mesures de radioprotection et de sécurité ont été prises pour chaque poste de travail où les matières thorifères sont traitées et manipulées.
- Dans l'objectif d'éviter toute contamination entre les voies de l'uranium et celles du thorium, la matière thorifère doit être séparée de la matière uranifère. Des équipements dédiés aux manipulations avec le thorium ont été définis ainsi que des infrastructures qui permettront de gérer les déchets de Th et leur entreposage dans le laboratoire.

En Avril 2014, 10kg du dioxyde de Thorium et 10L de nitrate de Thorium ont été reçus de Solvay.



a) *Dioxyde de Thorium*



b) *Nitrate de Thorium*

Des premiers essais de caractérisation de la poudre initiale de ThO₂ ont été réalisés, tels que des essais de granulométrie, de surface spécifique, de densité, ainsi que l'analyse des impuretés dans la poudre.

Pastilles ThO₂, UO₂

Des pastilles ont été préparées par voie sèche à partir de la poudre de ThO₂, puis ont subi différents traitements thermiques pour évaluer le comportement au frittage de la matière thorifère. Les densités et microstructures ont été analysées.



Pastilles de thorium frittées à partir de poudres de ThO₂, avec des densités entre 83 et 92%TD.

Pastilles (Th/U)O₂

Des pastilles préparées à partir de mélange de poudres de ThO₂ et d'UO₂ sont en cours de réalisation.

L'obtention de pastilles directement à partir de nitrates est envisagée par voie humide qui permet de meilleures homogénéité et uniformité des produits. La voie humide inclut un procédé sol-gel tel que celui mis en oeuvre dans les années 80 par KWU (Kraftwerk Union, Siemens), NUKEM (Cameco) et Nuclebras (Brésil) pour obtenir des grains de Th/U (à partir de nitrates, suivi par des étapes de pressage et de frittage). Ce procédé est en cours de transposition au laboratoire d'Erlangen.

Pastilles (Th/Pu)O₂

Dans l'optique d'élaborer de pastilles (Th/Pu)O₂, la manipulation de plutonium doit être envisagée. L'autorisation de manipuler « en zone radioactive » dans le laboratoire à Erlangen ne comporte pas pour l'instant les autorisations nécessaires à la manipulation de plutonium. Des contacts ont donc été pris avec SCK.CEN (Belgique) et un laboratoire à Sellafield (UK) qui ont des autorisations et des installations compatibles pour manipuler le plutonium. Des visites dites « techniques » sur les 2 sites ont été faites pour envisager une éventuelle collaboration.

Sur 2015-2018 – « poursuite de la phase 1b », le programme futur comprend la qualification de la fabrication de poudres, de pastilles et de crayons de combustible et l'analyse des scénarios possibles de déploiement du combustible au thorium en vue de détailler les combustibles et le cycle à développer. Des tests d'irradiation sont prévus en fin de programme (2018). Ces tests et les programmes d'analyses des scénarios constituent également une démarche en vue d'un dossier d'autorisation de chargement d'assemblages au thorium en REL à échéance 2030.

Ce programme est un programme appliqué (fabrication de crayons), à court terme (2018), avec des moyens significativement accrus en partenariat et ciblé (irradiation en 2018, combustible qualifié pour 2030).

AREVA et Solvay considèrent que 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. 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.

L'utilisation du thorium demande encore cependant des efforts d'industrialisation significatifs. Par exemple le traitement et le recyclage des combustibles au thorium 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.

L'ensemble de ces développements montrent que cette voie de valorisation est effectivement et concrètement envisagée par AREVA et Solvay.

7.1.2. Valorisation des matières thorifères pour la production de traitements anticancéreux

Valorisation des NiTh d'AREVA

La radio-immunothérapie (RIT) alpha consiste à associer un isotope radioactif tel le plomb 212 (^{212}Pb) à un anticorps monoclonal 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 (ovaires, pancréas, colon, estomac,...).

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 d'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 de radio-immunothérapie alpha au ^{212}Pb pour combattre le cancer.

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

L'extraction de ^{212}Pb peut désormais être 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 mis en œuvre dans le nouveau LMT (ICPE) 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 injecté aux personnes malades. Suite aux autorisations reçues des autorités américaines (Food and Drug Administration), des essais cliniques sur des personnes malades ont été initiés en 2012, et la première phase de ce développement clinique sera achevée fin 2014,

(<http://jnm.snmjournals.org/content/early/2014/08/25/jnumed.114.143842.abstract>)

Des essais précliniques sont également en cours avec l'Inserm en France, et un nombre croissant de sites académiques Français et internationaux discute actuellement avec AREVA Med pour obtenir du ^{212}Pb et conduire de nouveaux essais précliniques. Les partenariats scientifiques d'AREVA Med sont nombreux. Une collaboration existe avec l'institut national américain du cancer (NCI) depuis 2008. Un nouveau partenariat a été conclu avec l'Université d'Alabama (USA) en 2009, de même qu'un autre accord sur le cancer de la prostate en 2010 avec l'université de Cincinnati en Ohio. En 2011, AREVA Med a acquis Macrocyclics Inc (Texas), le leader mondial de la production des chélateurs de métaux pour la médecine nucléaire.

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 .

Depuis 2006 les avancées industrielles et scientifiques, tant précliniques que cliniques, 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 que la région Caennaise accueillerait sa future installation, 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 nano-médecine nucléaire est donc une réalité tangible, impliquant l'un des plus grands laboratoires pharmaceutiques du monde. La concrétisation de cette valorisation prend aussi corps au fil des avancées cliniques et des confirmations scientifiques qui en découlent.

Cette concrétisation est également validée par :

- l'implication industrielle et financière croissante d'AREVA et de ses partenaires et actionnaires, dont le CEA impliqué dans la sécurisation techniques 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 224Ra/212Pb dans différents sites académiques et/ou cliniques, tant en France (LMT, laboratoire ARCoLab de Razes, Inserm Montpellier, Nantes, Dijon, IGR, Limoges, Caen etc.) qu'à l'étranger, (San Diego-CA Charlottesville VA, Dallas (TX), Melbourne/Australie, etc.),
- un nombre également croissant de demandes d'autorisations vétérinaires permettant de réaliser des essais précliniques de RIT au 212Pb, 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 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 les services de l'Etat en 2014),
- l'évolution constante des effectifs d'AREVA Med et des emplois induits par le développement de la filiale depuis sa création en 2009 (estimation d'environ 80 emplois induits en 2014),
- la volonté de l'Etat d'accompagner AREVA Med et de développer une filière d'excellence de la RIT au 212Pb. Le Commissariat Général à l'Investissement a d'ailleurs été rencontré à plusieurs reprises au cours des derniers mois, et l'attribution de subventions publiques, dans le cadre d'un PSPC (projet « CARAT »), est activement discutée actuellement avec le commissariat général et ses partenaires (BPI et DGE, ex DGCIS). Le lancement officiel du projet CARAT, soutenu par le CGI est prévu en Décembre 2014.

Valorisation des HBTh de Solvay

Un autre développement dans la radio-immunothérapie concerne l'utilisation du 223Ra, émetteur alpha à vie courte (11,4 jours). Le 223Ra est un des descendants de 227Ac, de période beaucoup plus longue (21,8 ans). La production d'actinium 227 est « classiquement » obtenue par activation neutronique de sources de 226Ra. 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 227Ac par tonne de terres rares.

La société Algeta est à l'origine d'un traitement, par injection de chlorure de 223Ra, 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 XOFICO sur le cancer de la prostate.

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 ²²³Ra sur une dizaine d'années. Ceci est considéré comme une voie de valorisation de l'HBTh.

L'ensemble de ces éléments montre bien que la valorisation des matières thorifères est très concrètement en devenir.

7.1.3. Valorisation des matières thorifères pour leurs terres rares

Les terres rares contenues dans l'HBTh représentant une source complémentaire de ses approvisionnements traditionnels, Solvay a depuis 2009 repris des études sur un procédé permettant leur valorisation.

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 matières ou déchets (HBTh, MES et RSB) 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,
- les opportunités de valorisation de l'uranium, sous forme de nitrate d'uranyle (client potentiel AREVA) et des terres rares,
- 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 FAVL 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. En conclusion de ces développements, une étude préliminaire d'ingénierie sur l'ensemble du nouvel atelier de recyclage a été menée en 2012-2013.

En mars 2013, le projet Valor+ a été présenté à la DREAL et l'ASN et n'a fait l'objet d'aucune remarque préliminaire significative.

Développements ultérieurs

Suite à l'investissement réalisé en 2008 permettant le traitement de ses Matières en Suspension (MES) non radioactives, Solvay a décidé cette année de poursuivre en 2015 par un 2^{ème} investissement de près de 5 M€ pour le traitement des MES très faiblement radioactives.

Concernant le retraitement de l'HBTh, il reste maintenant à mener les étapes de validation suivantes concernant :

- les technologies de filtration/lavage parmi celles existantes sur le marché: filtre-presse, filtre rotatif... ;
- les technologies de compaction des déchets FA/VL permettant d'optimiser le remplissage des containers.

Ces essais de validation sont prévus en 2015-2016 et pourront être menés sur le site de la Rochelle. Cette dernière étape devrait permettre de mener l'Etude d'Ingénierie de Base et d'optimiser le scénario.

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

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

Cependant, indépendamment de ces études, l'utilisation du thorium dans la filière nucléaire, à un prix d'accès similaire à celui de l'uranium naturel, rend l'intérêt économique du projet Valor+ indéniable.

Le projet Valor+ a été retenu en mars 2014 parmi les projets « Pilotes de Performance Environnementale » dans le cadre du programme « Usines du Futur » initié par le Ministère du Redressement Productif. Ce projet fait partie de la liste des projets qui seront étudiés dans le cadre de la deuxième vague d'investissements de ce programme.

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 par Solvay de façon crédible et opérationnelle.

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 AREVA sont propriétaires d'environ 8552 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 35 tonnes sous forme oxyde et oxalate) et sur le site de Cadarache pour le compte d'AREVA (2 300 tonnes de thorium sous forme de nitrate, reconditionné en surfûts inox).

Le tableau ci-dessous décrit ces quantités.

Tonnage de matières thorifères - Solvay – La Rochelle	
Th Nitrate coulé à 46% ThO ₂ – fûts Inox 1m ³	7400 t
Th Nitrate coulé à 46% ThO ₂ – fûts PE 120l	3127 t
Th Nitrate Solution à 28.5% ThO ₂ – Cubitainer PE 1m ³	201 t
HBTh, hydroxydes bruts de thorium – fûts PE 120l + vrac	21750 t
Th Oxyde – fûts acier 25l	3 t
Th Oxalate – fûts PE 120l	77 t
Tonnage de matières thorifères - 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.

Les matières détenues par 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 donc 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 (2t ThO₂ en 2013).

7.2.2. Perspectives de valorisation et adéquation aux quantités

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	80	35
Th Nitrates - 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 légère 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 (8552 t) pourrait permettre de faire fonctionner au niveau mondial environ 20 réacteurs, soit moins de 4 % du parc seulement - cette proportion très limitée paraît « raisonnablement atteignable » à l'horizon 2030-2050.

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 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 prévus 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, 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 récente le 8 novembre 2014 d'un accord-cadre entre la CNNC et Candu Energy⁶ 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. Un groupe de 22 experts chinois, piloté par la China Nuclear Energy Association, a en parallèle réalisé une vérification de la technologie de ce réacteur à eau lourde utilisant un combustible avancé, et a conclu que ce réacteur satisfaisait aux plus récentes exigences de sûreté, aux critères des réacteurs nucléaires de génération III, et qu'il présentait une bonne performance économique et faisabilité technique. Selon ces experts, ce réacteur pourra devenir une plate-forme qui permettra d'étudier l'utilisation du thorium comme source d'énergie, en association avec ce combustible avancé.

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 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 », 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.

⁶ <http://www.candu.com/en/home/news/mediareleases/NewphaseofCanadaChinanuclearenergy.aspx>

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, 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 d'AREVA-Solvay (dont c'est l'objectif) ou d'autres R&D (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....et AREVA 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. Le cycle thorium 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 grandes quantités, 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 à quelques centaines de tonnes par an, alors que des ressources naturelles très importantes existent. Solvay a ainsi vendu 2t d'oxyde de thorium en 2013.

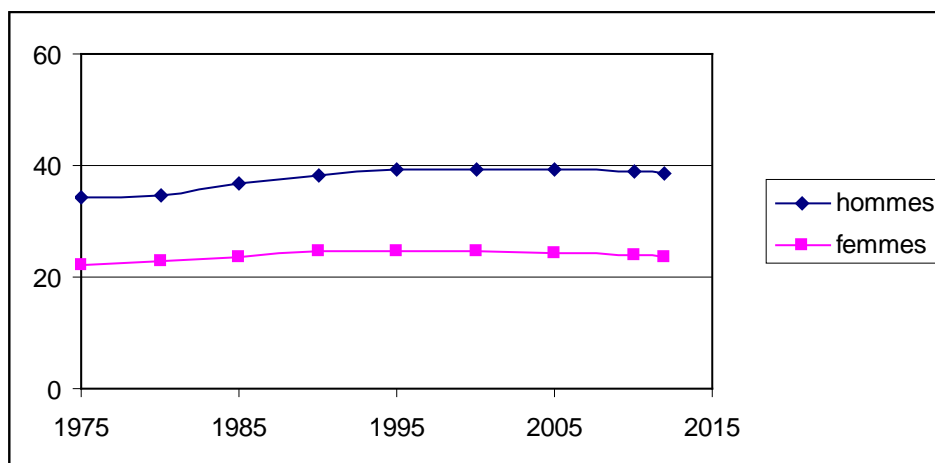
L'ensemble des acteurs s'accorde donc pour considérer que le marché actuel ne peut pas faire l'objet d'une croissance significative et que la seule voie tangible d'ouvrir une nouvelle voie de valorisation est l'utilisation du thorium comme combustible dans la filière nucléaire.

Valorisation des matières thorifères pour des applications médicales

En termes de ressource, le plomb ^{212}Pb 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. Les patients atteints de pathologies actuellement visées par l'essai clinique d'AREVA Med se comptent par dizaines de milliers. Il y a par exemple plus de 30 000 nouveaux cas de cancer de colon diagnostiqués en France chaque année, plus de 100 000 aux USA .



Incidence du cancer colorectal en France, en « cas pour 100 000 ».

Eu égard au 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 administration à un patient correspond aujourd'hui des quantités de ^{212}Pb de quelques 2ng, mais là aussi, 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 un besoin sans cesse 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 la RIT 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, 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.

A partir de 2020, tel que prévu dans le plan industriel d'AREVA Med, il est donc raisonnable d'envisager une valorisation progressive des nitrates de thorium, sur la période 2020-2050 (période de fonctionnement initial planifié à ce stade par AREVA Med).

Concernant l'utilisation du ²²³Ra 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 de Ra223 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.

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 septembre 2014, 12800t ont ainsi été valorisées. Compte-tenu d'une production annuelle de 900t/an, le stock de MES est de 16400t à fin septembre 2014.

La ressource en terres rares à valoriser s'évalue dès lors globalement à 7700 tonnes

	tonnage matières/déchets	tonnage terres rares
HBTh	21750	3000
RSB	8400	1000
MES	16400	3700

Ressources terres rares des HBTh, RSB et MES –Sept. 2014

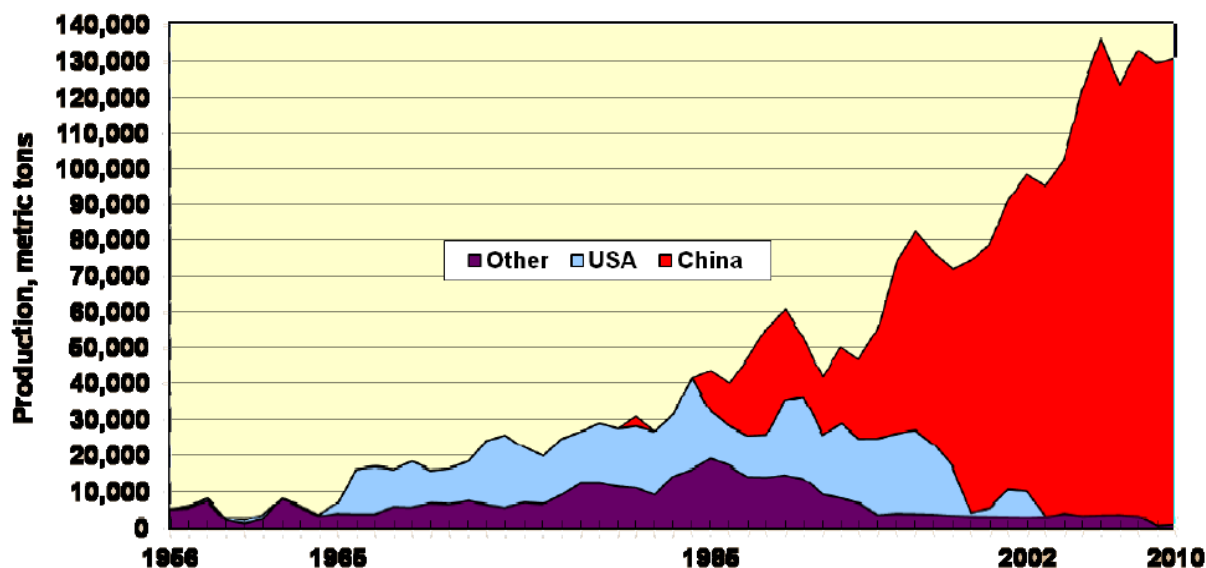
La potentialité de cette valorisation reste largement soutenue par la demande.

En raison de leurs propriétés très spécifiques les terres rares sont utilisées dans la fabrication d'équipements électroniques divers, d'écrans plats, de téléphones, de catalyseurs, d'ampoules, d'optiques de précision, de radars, Les terres rares sont également utilisées pour leurs propriétés catalytiques (raffinage et dépollution) ou magnétiques en tant qu'aimants permanents dans la fabrication de turbines d'éoliennes (jusqu'à plusieurs centaines de kg de néodyme par éolienne offshore), de moteurs électriques ou d'alternateurs. Ainsi la demande croissante pour l'ensemble de ces produits génère une demande en terres rares également très significative.

Il faut noter également que les politiques environnementales, en général en expansion (éolien, véhicules électriques, ...) contribuent à soutenir la demande en terre rares (la Prius de Toyota nécessite de 10 à 15 kg de lanthane pour la batterie et 1 à 2 kg de néodyme pour le moteur électrique ; les éoliennes de nouvelle génération nécessite de 500 kg à 1 tonne d'aimants, contenant 30% de néodyme, par mégawatt).

La consommation actuelle en terres rares est en effet de l'ordre de 120000 t/an.

La production des matières premières est quant à elle essentiellement localisée en Chine ce qui crée de fortes tensions. Du fait des restructurations en cours et de la croissance rapide de sa propre économie, la Chine a réduit ses exportations, créant des tensions sur l'offre. Dans cette situation, d'autres pays déjà producteurs, comme les USA et l'Australie, ont redémarré récemment la valorisation de leurs propres ressources. De même d'autres pays non producteurs tels le Canada, l'Afrique du Sud et la Malaisie, visent également à développer leur ressource nationale et à sécuriser l'approvisionnement pour des raisons stratégiques et économiques.



Evolution de la production mondiale de terres rares

Au regard de cette situation, il est clair que les 3000 tonnes de terres rares générées par le retraitement des HBTh de Solvay pourront être valorisées au fil de la mise en œuvre de ce retraitement et intégrées aux productions standard de l'usine de La Rochelle.

La valorisation des terres rares des matières thorifères présentes en France est donc dès aujourd'hui possible. Elle peut être mise en œuvre dès qu'une opportunité de gestion se présente. L'ouverture d'ici 2030 d'un futur centre FAVL qui recevra les déchets ultimes issus du retraitement des HBTh confère au projet de Solvay un objectif de mise en œuvre de moyen terme.

On notera également que Solvay, achetant des terres rares pour ses propres besoins, peut, sur une base technico-économique, optimiser son approvisionnement entre importation de concentrés purifiés, recyclage sur site et traitement des HBTh.

Suivant le plan du projet de retraitement, Valor+, les quantités de terres rares en jeu, 7700 tonnes au total sur une durée d'une quinzaine d'années, ne présentent aucune difficulté à écouler dans un marché mondial de 120000 tonnes par an. En termes de traitement, sur cette 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.

A noter également que la commercialisation directe (sans retraitement) de matières thorifères de type HBTh est envisagée. Par exemple, mi- 2013, plus de 15000 tonnes d'un résidu de traitement de monazite, appelé TORTA II (« Cake II »), et contenant environ 4000t de thorium, 120t tonnes d'uranium et 900t de terres rares, ont fait l'objet d'un projet de cession entre Industrios Nucleares do Brasil (INB) et la société taiwanaise Global Green Energy Science Technology. Le TORTA II a été obtenu à partir de monazite, selon un procédé de fabrication similaire à celui de l'HBTh ⁽⁷⁾.

Le montant de la transaction est estimée à 65 M\$ et serait régularisée par échange de contrats de fourniture d'uranium pour la fabrication de combustible pour les centrales nucléaires brésiliennes ⁽⁸⁾. Relevant d'une opération commerciale, cet exemple illustre bien l'intérêt économique et technique que peut représenter l'HBTh.

Nécessité de valoriser le thorium pour exploiter de nouveaux gisements de terres rares.

Quelle que soit la voie de valorisation envisagée, il existe une forte demande de valorisation des matières thorifères en soutien à l'exploitation de gisements de terres rares. La valorisation du thorium est perçue comme un soutien à la mise en production de gisements de terres rares. Dans la mesure où les minerais de terres rares présentent également un contenu en thorium, la valorisation après séparation du thorium permet de rendre certains gisements économiquement plus attractifs et/ou plus acceptables sur le plan environnemental ou sociétal. Les descendants radioactifs du thorium décroissent très rapidement, contrairement à ce qui se passe avec ceux de l'uranium. L'extraction du thorium pour valorisation laisse donc des résidus miniers ou de séparation qui ne posent pas de véritable problème de gestion à long terme.

La Malaisie et l'Inde considèrent donc que la valorisation du thorium permet d'accéder à de nouvelles ressources en terres rares et d'assurer la sécurité de leur approvisionnement. Les industriels producteurs y voient également le moyen de faciliter l'exploitation de certains minerais..

Aux Etats-Unis, l'arrêt des activités de la mine de terres rares de Mountain Pass en 2002 a eu comme conséquence de renforcer la dépendance à la Chine pour l'approvisionnement des métaux rares et conséquemment de composants dans les secteurs stratégiques, à commencer par l'armée. La prise de conscience de la nécessité de gérer le thorium pour faciliter le traitement des minerais de terres rares aux Etats-Unis s'est traduite récemment au niveau politique par le dépôt au Sénat du « National Rare Earth Cooperative Act » (HR 4883, déposé le 17 juin 2014). Cette proposition recommande :

- de développer des nouveaux marchés et utilisations pour le thorium,
- de développer des systèmes énergétiques qui utilisent du thorium,
- de développer, gérer et contrôler des plateformes nationales et internationales de distribution d'énergie produite par des systèmes au thorium.

⁷ Paulo E.O. Lainetti, « Review of recent experience in purification of thorium and rare earths compounds from different concentrates at IPEN-CNEN/SP, BRAZIL », IAEA Technical Meeting on Thorium Resources and Provinces 24 – 27 September 2013

⁸ <http://g1.globo.com/mg/sul-de-minas/noticia/2013/08/lixo-nuclear-e-radioativo-sera-exportado-de-caldas-para-china.html>

Le mouvement lobbyiste « Thorium Energy Alliance » s'appuyant sur le NERC Act défend ainsi la création d'une « Thorium Bank » dédiée au transit des minerais de terres rares comportant du thorium, tout en assurant des conditions sûres de stockage du thorium, ainsi qu'au « développement des utilisations et marchés pour le thorium, y compris l'énergie ».

Finalement, de multiples « drivers » économiques viennent ainsi soutenir la possibilité de valoriser les matières thorifères françaises au cours des prochaines décennies.

7.2.3. Conclusion

En conclusion, les éléments présentés ici permettent d'envisager, sur les périodes 2030-2080, 2030-2045 ou 2020-2050 une valorisation très significative des nitrates de thorium et des hydroxydes de thorium actuellement détenus par AREVA et Solvay.