

Comité d'expertise et de dialogue sur les alternatives au stockage en couche géologique profonde

Rapport d'étape

Résumé

La 5^{ème} édition du Plan national de gestion des déchets et matières radioactifs (PNGMDR) inscrit la gestion des déchets de Haute activité (HA) et de Moyenne activité à vie longue (MA-VL) dans un double principe : poursuivre la mise en œuvre du projet Cigéo tout en tirant parti du temps long de son déploiement pour poursuivre une dynamique de recherche sur les options de gestion alternatives ou complémentaires. Une instance dédiée a été mise en place, conformément à l'action HAMAVL.7 du PNGMDR : le comité d'expertise et de dialogue sur les alternatives au stockage en couche géologique profonde. Ce comité a pour objectifs principaux d'échanger et débattre sur les travaux scientifiques produits, de faire des propositions sur les orientations des recherches à conduire et d'informer le public de l'état d'avancement des recherches autour des options de gestion complémentaires ou alternatives au stockage en couche géologique profonde. Ce document constitue le premier rapport d'étape du comité.

Un premier panorama international des recherches sur les solutions alternatives au stockage en couche géologique profonde des déchets HA et MA-VL a été réalisé en 2019 par l'IRSN. Six grandes familles de solutions alternatives avaient été historiquement considérées mais seules trois d'entre elles paraissent réalistes : le stockage en forages de type pétrolier, la séparation / transmutation et enfin l'Entreposage de longue durée (ELD) renouvelé, ce dernier ayant été écarté par la plupart des pays dont la France en 2006. Les seules solutions alternatives examinées dans ce rapport sont l'ELD renouvelé et la séparation / transmutation. Le stockage en forages profonds fera l'objet d'un complément d'analyse par le comité en 2025.

Après avoir défini ce qu'est un stockage de déchets radioactifs et les caractéristiques de ce que pourraient être des solutions alternatives ou complémentaires, ce rapport dresse un panorama des options pour le stockage des déchets dans le monde. Il rappelle aussi le contexte et les divers processus décisionnels qui ont conduit la France à opter pour le stockage en couche géologique profonde comme solution de référence avant de considérer les voies pour d'éventuelles solutions alternatives ou complémentaires.

Au stade d'une année de travail, le comité considère qu'il n'y a pas actuellement de piste pour une *solution alternative* au stockage en couche géologique profonde. Au vu des connaissances actuelles, il n'est pas aujourd'hui possible de s'affranchir du stockage en couche géologique profonde pour la gestion des déchets HA et MA-VL.

Les principaux éléments qui avaient conduit à écarter l'ELD renouvelé, en surface comme en subsurface, comme une solution alternative au stockage en couche géologique profonde restent d'actualité : la nécessité de disposer d'une solution de stockage passive et de ne pas reporter sur les générations futures le devoir de gérer des déchets à vie longue.

Les pistes de recherche actuelles pourraient toutefois ouvrir la voie à des *modes de gestion complémentaires*. C'est le cas des travaux de R&D sur la transmutation, par exemple dans les réacteurs à sels fondus bruleurs d'actinides, comme des travaux visant à améliorer le conditionnement ou rendre possible un jour le recyclage de certaines matières. Ces travaux ont un dénominateur commun : la séparation des matières. Sans technique de séparation performante, opérée de façon sûre au stade industriel, ces pistes seraient inopérantes.

Toute approche permettant la réduction des volumes de déchets à stocker et l'éventuel réemploi de matières doit être étudiée en vue d'une mise en œuvre possible. Il convient, cependant, de garder une vision systémique comprenant l'impact sur les déchets produits, les installations, la radioprotection des travailleurs, le transport des matières et des déchets ainsi que les coûts, tout en considérant le temps nécessaire pour élaborer une telle approche et les engagements qu'elle implique.

Table des matières

I.	Avant-propos	4
II.	Introduction - Définitions	4
III.	Contexte historique	6
IV.	Les options pour le stockage des déchets dans le monde	7
V.	Le stockage en couche géologique profonde en France	9
VI.	Examen des solutions alternatives au stockage en couche géologique profonde	10
1.	<i>Le point de départ de l'analyse du comité</i>	10
2.	<i>Séparation / transmutation</i>	10
a.	Principe	10
b.	Analyse du comité	11
3.	<i>Entreposage de longue durée (ELD)</i>	15
a.	Principe	15
b.	Analyse du comité	15
VII.	Conclusion provisoire et perspectives	16
VIII.	Textes officiels	17
IX.	Annexe I – Composition du comité	18
X.	Annexe II – Synthèse des présentations sur la séparation/transmutation	20
XI.	Annexe III – Synthèse des projets financés par France 2030 présentés au comité	25
XII.	Annexe IV - Aperçu des projets en cours sur les traitements - conditionnements alternatifs des déchets du cycle	26
XIII.	Annexe V – Synthèse des présentations sur l'entreposage	30
XIV.	Glossaire	33

I. Avant-propos

La 5^{ème} édition du Plan national de gestion des déchets et matières radioactifs (PNGMDR) [6] inscrit la gestion des déchets de Haute activité (HA) et de Moyenne activité à vie longue (MA-VL) dans un double principe : poursuivre la mise en œuvre du projet Cigéo tout en tirant parti du temps long de son déploiement pour poursuivre une dynamique de recherche sur les options de gestion alternatives ou complémentaires.

Une instance dédiée a été mise en place, conformément à l'action HAMAVL.7 du PNGMDR [6] à [8] : le comité d'expertise et de dialogue sur les alternatives au stockage en couche géologique profonde (« comité » dans la suite du présent rapport). Ce comité pour objectif de :

- échanger et débattre sur les travaux scientifiques produits ou à encourager ;
- questionner les domaines de validité ou d'application des pistes envisagées ;
- faire des propositions sur les orientations de recherche à conduire ou sur des expertises à mener ainsi que sur les actions pertinentes à envisager pour faire émerger de nouvelles solutions ;
- faire des recommandations sur la valorisation de ces travaux à des fins d'information et d'alimentation des travaux de la commission de gouvernance du PNGMDR ;
- faciliter la mise en relation entre les instituts étrangers et les acteurs de la recherche française en vue d'un partage d'informations et de la mise en place de partenariats de recherche le cas échéant ;
- informer régulièrement le public de l'état d'avancement des recherches autour des options de gestion complémentaires ou alternatives au stockage en couche géologique profonde.

La composition de ce comité est détaillée en Annexe I. Le comité rend régulièrement compte de ses travaux auprès de la gouvernance du PNGMDR et en dressera un bilan en vue de l'élaboration de la prochaine édition du PNGMDR. Dans ce contexte, le présent document constitue le premier rapport d'étape du comité.

II. Introduction - Définitions

Il convient tout d'abord de rappeler que le terme « *stockage* » sous-entend ici le déploiement et la maîtrise d'un ensemble de procédés, ou d'une méthodologie qui peut s'étaler dans le temps, permettant de confiner les déchets HA/MA-VL et de les isoler définitivement de l'homme et de l'environnement.

Le projet Cigéo résulte du choix fait par le Parlement en 2006 de retenir le stockage réversible en couche géologique profonde pour la gestion de ces déchets HA/MA-VL. Ainsi, le stockage en couche géologique profonde est devenu la « *solution de référence* ». Notons qu'une telle décision était conforme au principe de précaution, qui consiste à mettre en œuvre des solutions à un problème au regard des connaissances actuelles¹. Celui-ci conduisait donc à privilégier le stockage en couche géologique profonde pour gérer, au mieux des connaissances, les déchets HA et MA-VL.

La Demande d'autorisation de création (DAC) est en cours d'instruction. Si celle-ci devait déboucher sur un avis favorable, Cigéo serait alors confirmé comme une solution possible, par rapport à laquelle une autre solution pourrait être considérée, l'ensemble formant une « **alternative** »². Dans la suite, on parlera

¹ Charte de l'environnement (2004) [3] : « *Lorsque la réalisation d'un dommage, bien qu'incertaine en l'état des connaissances scientifiques, pourrait affecter de manière grave et irréversible l'environnement, les autorités publiques veilleront, par application du principe de précaution, et dans leurs domaines d'attribution, à la mise en œuvre de procédures d'évaluation des risques et à l'adoption de mesures provisoires et proportionnées afin de parer à la réalisation du dommage* ».

² Une alternative est le choix entre deux possibilités (le Larousse précise « *obligation de choisir entre deux possibilités, situation où il n'y a que deux choix possibles* »). Au pluriel, « alternatives » signifie toujours une situation dans laquelle il n'existe que deux

de « **solutions alternatives** » pour désigner ces autres solutions. On parlera aussi de « **solutions complémentaires** » pour désigner des modes de gestion différents de ceux projetés pour Cigéo, mais qui nécessitent toujours le recours à un stockage en couche géologique profonde.

Qu'est-ce qu'une solution alternative au stockage en couche géologique profonde ?

La Commission nationale d'évaluation (CNE) avait proposé dans son rapport n°15 (p. 23) une définition : « une [solution] alternative au stockage profond est une installation, ou combinaison d'installations éventuellement associée(s) à des procédés de traitement et de conditionnement spécifiques, qui permet de garantir le même niveau de sûreté qu'un stockage profond pendant la même durée et sous les mêmes contraintes ».

Parmi les contraintes qui ne sont liées ni au temps ni à la sûreté, il faut inclure en particulier celles liées au développement durable : l'activité d'aujourd'hui ne doit pas se faire au détriment de celle des générations futures.

Réfléchir à une solution alternative signifie considérer des méthodes et/ou procédés entièrement ou partiellement différents de ceux élaborés pour le stockage en couche géologique profonde permettant de respecter le même cahier des charges (durée, sûreté et éthique). Pour ces considérations, il ne faut pas que les cadres réglementaires constituent un obstacle. Il importe, dans un premier temps au moins, de s'en affranchir tant que la Recherche et développement (R&D) se situe en phase amont. Le bénéfice d'un procédé nouveau serait alors à mettre en regard avec les évolutions réglementaires nécessaires pour procéder plus en avant, vers une solution industrielle.

L'appréciation de la différence entre une solution alternative et le stockage en couche géologique profonde mérite une clarification afin de ne pas confondre solution alternative et variante du projet existant (variantes qui existeront forcément du fait de l'étalement de la durée de construction du stockage et du progrès des connaissances). Par différent, et donc caractéristique d'une alternative, on peut sous-entendre :

- la réalisation d'un ouvrage accueillant les déchets qui ne serait pas construit en couche géologique profonde, ou dont le principe de construction s'éloignerait de celui d'une mine (e.g. par forage) ;
- le stockage d'espèces chimiques différentes et/ou transformées à partir de celles prévues d'être stockées actuellement, à la suite d'un processus de traitement, permettant de s'affranchir du stockage en couche géologique profonde. Cela pourrait s'appliquer à l'ensemble des déchets (solution alternative)³, ou à certains radionucléides qu'ils contiennent (solution complémentaire) ;
- le traitement des déchets à produire afin d'en requalifier en matière une partie, s'il permettait de s'affranchir du stockage en couche géologique profonde (solution alternative) ou de réduire les déchets à stocker (solution complémentaire).

Par ailleurs, une alternative implique *in fine* de faire un choix. Il convient de définir l'ensemble des critères d'évaluation (bénéfices et inconvénients respectifs) qui permettrait ce choix. Outre la sûreté, la préservation de l'environnement et la dimension « *développement durable* » déjà mentionnés, l'impact sur la radioprotection des travailleurs (par exemple en cas de traitement supplémentaire), les transports de déchets ou matières nucléaires, la faisabilité dans des délais raisonnables, les coûts, l'acceptabilité du public, en incluant les activités induites par la mise en œuvre de chaque solution potentielle (nouvelles installations industrielles ou nucléaires par exemple) sont des critères de choix.

partis possibles (le Robert). Dans le cas présent, il s'agit du stockage en couche géologique profonde ou d'autres solutions possibles.

³ A noter que les avis d'experts reconnaissent unanimement que les colis HA déjà vitrifiés ne peuvent plus être retraités car cela nécessiterait des procédés très coûteux, notamment en termes de sûreté.

Une solution alternative mais quand ?

La **temporalité** de la disponibilité d'une solution alternative est un facteur important au regard des recherches en cours, à venir, et de leur transposition en solution industrielle. Le stockage en couche géologique profonde concerne aujourd'hui deux catégories de déchets (MA-VL et HA). Ces derniers présentent des caractéristiques très différentes qui conduisent à des concepts de stockage différents et aussi à des horizons de mise en œuvre bien distincts : pour la majorité des HA, il convient de les entreposer pour décroissance thermique avant mise en stockage, soit à l'horizon 2080 ; alors que pour les MA-VL, le stockage pourrait débuter dès la disponibilité de l'ouvrage, soit actuellement à l'horizon 2050 selon l'instruction de la DAC de Cigéo.

S'engager dans des recherches en vue de déboucher sur des solutions alternatives qui seraient disponibles dans 20 ans ou dans 50 ans et plus ne recouvre pas les mêmes contingences :

- en phase amont de recherche de nouveaux principes ou de nouveaux procédés, aucune contingence ne doit être fixée *a priori* (d'autant plus que les moyens requis sont souvent très modestes, ce qui justifie une prise de risque). C'est le principe de la recherche dite « *blue sky* » ;
- lorsque la maturité progresse, la démonstration de faisabilité doit aussi progresser. Les dimensions sociétales et économiques liées à la mise en œuvre de la solution prennent de l'importance. L'insertion dans la filière industrielle et le temps de transfert sont aussi des paramètres à examiner avec attention (une solution qui arrive dans un horizon de temps trop lointain n'en est peut-être pas une...).

Les projets qui ont vu le jour dans le cadre des initiatives actuelles présentent cette diversité.

III. Contexte historique

La loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 [4], prise à l'issue de 15 années de recherches⁴ et de leur évaluation par la CNE, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN)⁵ et une revue internationale, désigne le stockage en couche géologique profonde comme la solution de référence pour gérer les déchets HA et MA-VL en France. Ce choix a été effectué au terme d'un débat public conduit en 2005 qui a mis en exergue une défiance de certains publics vis à vis du stockage en couche géologique profonde, dont les ressorts vont au-delà de l'analyse purement scientifique et technologique.

Considérant que le sujet des déchets HA et MA-VL emporte des décisions à très long terme, la controverse participe d'une vision du futur de nos sociétés :

- celle-ci est parfois optimiste en faisant confiance à la recherche qui débouchera certainement vers des solutions aux problèmes posés aujourd'hui, sans pour autant d'ailleurs accorder la même confiance à celles menées jusqu'à aujourd'hui pour concevoir un stockage en couche géologique profonde sûr ;
- cette vision est parfois beaucoup plus pessimiste sur le devenir de nos sociétés, qui pourraient ne plus disposer des connaissances et des moyens que nous avons aujourd'hui pour gérer les déchets HA et MA-VL, ou s'agissant de la nécessité de préserver notre environnement et de le confier aux générations futures dans le même état que celui dans lequel nous l'avons trouvé.

Une proposition, issue du débat public qui a eu lieu en 2005, consistait à réaliser un entreposage à sec, éventuellement en subsurface. Exploité pendant une durée à déterminer, celui-ci avait pour objet principal de donner le temps à la recherche de trouver une solution acceptable, éventuellement une solution alternative au stockage en couche géologique profonde.

Pour autant, la stratégie actuelle a bel et bien été définie en 2006, positionnant l'entreposage comme un acte nécessaire techniquement mais temporaire (pour refroidir les déchets HA) avant de disposer des

⁴ Le comité a fait le choix de ne pas faire remonter l'historique à la loi « *Bataille* » (1991).

⁵ Désormais Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR)

déchets dans un stockage en couche géologique profonde. Les études et recherches sur la gestion des déchets HA et MA-VL ont donc porté depuis sur le stockage en couche géologique profonde et sur la transmutation.

La défiance vis-à-vis des décisions prises par l'institution perdure depuis. Les décisions actées en 2006 s'accompagnaient d'une nouvelle notion destinée à rétablir une certaine confiance des parties prenantes : la réversibilité. Cette notion a été précisée en 2016 par une nouvelle loi [5] : « *La réversibilité est la capacité, pour les générations successives, soit de poursuivre la construction puis l'exploitation des tranches successives d'un stockage, soit de réévaluer les choix définis antérieurement et de faire évoluer les solutions de gestion* ». Elle s'exerce selon plusieurs leviers : progressivité, adaptabilité, flexibilité et récupérabilité. La réversibilité permet de se donner du temps pour faire autrement en cas d'urgence de solutions alternatives ou complémentaires, tout en maîtrisant autant que possible le risque de se trouver sans solution aucune. Le projet Cigéo, s'il venait à être réalisé, doit être selon la loi un stockage *réversible pendant au moins une centaine d'années*.

IV. Les options pour le stockage des déchets dans le monde

Le stockage en couche géologique profonde des déchets est la solution de référence adoptée par tous les pays réfléchissant à un exutoire pour les déchets HA (voire MA-VL) ou les Combustibles usés (CU) lorsque ceux-ci sont considérés comme déchets. Une vue d'ensemble de la gestion de ces déchets au niveau international permet de distinguer quatre grandes catégories décrites ci-après.

Les pays qui ont choisis le stockage en couche géologique profonde et en ont autorisé la construction.

La Finlande : en 2015, le gouvernement a accordé le permis de construire le stockage et l'autorité de sûreté en a autorisé la construction en 2016. Celle-ci a démarré en décembre 2016 ; en 2019, un test en vraie grandeur, destiné à suivre l'évolution du stockage aussi longtemps que possible a été mis en place. En 2024, l'essai final de l'installation de stockage a démarré en inactif, la fin est prévue en 2025.

La Suède : en 2022, l'autorisation de construire le stockage a été accordée par le gouvernement. Le permis de construire et d'exploiter a été accordé en 2024 par le tribunal foncier et environnemental, le processus d'autorisation pas à pas poursuit son cours (construction, essais, exploitation, démantèlement, fermeture). En Suède, la responsabilité du stockage est reprise par l'Etat après fermeture, celle-ci devant être autorisée par le gouvernement.

Les pays où le stockage en couche géologique profonde est choisi et la procédure de choix de site en cours.

Le Canada : en 2023, le gouvernement canadien a adopté la « *stratégie intégrée pour la gestion des déchets radioactifs* » : consentement des communautés et des peuples autochtones, protection de l'eau, obligation de suivi à long terme, ne pas transmettre la responsabilité aux générations futures. Le processus de sélection de sites a été lancé en 2010 par appel à candidatures ; 22 communautés se sont portées candidates. Le processus de sélection se déroule selon une « *gestion adaptative progressive* » : méthode technique (ce que nous envisageons de construire) et une approche de gestion (comment nous travaillons avec les gens pour y parvenir). Suite à la publication des rapports de confiance en la sûreté, en 2024, deux sites subsistaient dans la province d'Ontario et ont fait l'objet d'un consentement des communautés locales ; les discussions se sont poursuivies avec les peuples autochtones. Un site vient d'être choisi en novembre 2024.

La Suisse : en 2006, le concept de stockage en couche géologique profonde a été considéré faisable et sûr en Suisse. Ensuite, les critères et la procédure de choix de sites ont été approuvés en 2008. La procédure a abouti en 2018 à retenir trois sites pour études approfondies. En 2022 le site de Nord des Lägern (Stadel) a été considéré comme celui qui convenait le mieux car présentant de plus grandes marges de sûreté. Le 19 novembre 2024, la demande d'autorisation générale pour la réalisation d'un dépôt en couches géologiques profondes destiné à accueillir les déchets radioactifs des centrales nucléaires existantes (60 ans d'exploitation) ainsi que de la médecine, de l'industrie et de la recherche a été déposée.

La République tchèque : en 2002, le gouvernement a retenu le stockage en couche géologique profonde des CU en Tchéquie comme option préférée ; le retraitement des combustibles n'est pas exclu de même

que le stockage partagé. En 2017, le gouvernement a confirmé cette option et exclu l'ELD. Actuellement, quatre sites sont en cours d'évaluation détaillée.

Les pays où le stockage en couche géologique profonde est choisi mais la procédure de choix de site est encore complètement ou partiellement à définir.

La Belgique a commencé à réfléchir à la destination des déchets de haute activité dès le démarrage des premières centrales. En 1974 une cartographie des formations potentielles a été effectuée ; plus tard, en 1980, un laboratoire souterrain a été creusé à Mol dans l'argile peu indurée. En 2007, une expérience en vraie grandeur a été commencée. Un dossier destiné à obtenir une décision de principe a été introduit auprès du gouvernement en 2010 sans toutefois aboutir. En 2022, la Belgique a adopté le stockage en couche géologique profonde comme politique nationale de gestion des déchets de haute activité et des CU tout en maintenant une veille technologique sur les solutions alternatives. Le processus de choix de site est en cours de définition.

En Allemagne, le stockage en couche géologique profonde est l'exutoire pour tous les déchets. Le gouvernement allemand a décidé de redémarrer le processus de sélection de site en 2013 ; l'exploration du site de Gorleben avait auparavant été interrompue en 2012 (et le remblaiement du laboratoire souterrain a commencé en 2024). En 2017, des zones favorables ont été identifiées ; depuis 2020, des régions sont en cours d'identification pour caractérisation à partir de la surface, établissement d'un rapport préliminaire de sûreté et évaluation sur base de critères de pondération scientifiques et socioéconomiques.

Au Japon, la recherche sur le stockage en couche géologique profonde a débuté en 1976. Deux lois ont été adoptées établissant le stockage en couche géologique profonde comme mode de gestion des déchets de haute activité et de moyenne activité respectivement en 2000 et 2007. En 2002, un appel à candidature pour un site de stockage s'est révélé infructueux. En 2017, une carte des « *caractéristiques scientifiques* » classant les régions en défavorables (stabilité, intrusion), favorables et préférables a été établie par le gouvernement. En 2020 : deux municipalités ont consenti à une étude d'évaluation des données existantes (Hokkaido).

En 1988, la Corée du Sud a opté pour l'entreposage suivi du stockage en couche géologique profonde en tant que politique de gestion de ses déchets de haute activité. Depuis 2021, un projet générique est en cours de développement.

Les pays en situation d'attente ou de blocage.

L'Espagne : le plan déchets du gouvernement prévoyait, en 2006, le stockage en couche géologique profonde à un horizon de 70 ans précédé d'un entreposage centralisé. La révision du plan, en 2023, confirme le stockage géologique pour 2070 mais abandonne l'entreposage centralisé. L'entreposage se fera sur les sites des centrales existantes au nombre de 7. L'Espagne procède à une R&D générique.

En 2006, le gouvernement britannique a accepté la recommandation faite par la Commission sur la gestion des déchets (CoRWM) radioactifs la même année. Un processus de sélection de site basé sur le principe du consentement des communautés locales avec possibilité de retrait (Angleterre, Pays de Galle) a été lancé en 2008 ; ce processus s'est terminé en 2013, toutes les communautés s'étant retirées. En 2014, un nouveau processus de sélection a été défini et lancé par le gouvernement. En 2024 les discussions sont engagées dans trois communautés (Angleterre). A noter que la politique du gouvernement écossais est la gestion en surface ou subsurface à proximité des sites de production.

Les Etats-Unis ont opté très tôt pour le stockage en couche géologique profonde. Suite à une recommandation de l'Académie des Sciences, le Congrès a fixé la procédure de choix des sites en 1982 pour aboutir à retenir le site unique de Yucca Mountain (Nevada) en 1987. Celui-ci a finalement été déclaré non réaliste en 2010. Les CU sont depuis entreposés à sec sur les sites des centrales. Depuis 2013, le Département de l'Energie (DOE) promeut une approche basée sur le consentement pour la recherche de site. Un projet bipartisan de création d'une agence fédérale indépendante pour gérer l'aval du cycle du combustible a été déposé au Congrès en septembre 2024.

Constats

De l'examen de la situation dans ces différents pays, l'on peut tirer plusieurs constats :

- le stockage en couche géologique profonde est la solution de référence au niveau international pour les pays dits « fortement nucléarisés » ;
- les délais imposent des entreposages sur de longues durées ;
- l'entreposage multiséculaire n'est pas considéré comme une solution de gestion à long terme car il suppose en particulier une surveillance active ;
- l'implication des communautés locales dans l'élaboration d'une solution est généralisée.

Il est important de souligner que, dans tous les cas, le stockage direct des combustibles est privilégié : le retraitement n'est pas exclu mais les capacités de retraitement sont limitées au niveau mondial (un peu plus d'un millier de tonnes de métal lourd (tML) par an) au regard des quantités de métal lourd en stock (plus de 400.000 tML).

La France semble bien être le seul pays à se poser encore des questions sur des alternatives éventuelles, bien qu'elle ait pris la décision de principe de s'engager dans le stockage en couche géologique profonde.

V. Le stockage en couche géologique profonde en France

Le projet de centre de stockage Cigéo est le fruit de démarches de conception concertées, menées par l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) depuis les années 1990 en vue de la création d'une Installation nucléaire de base (INB) pour le stockage réversible en couche géologique profonde des déchets radioactifs français (HA et MA-VL).

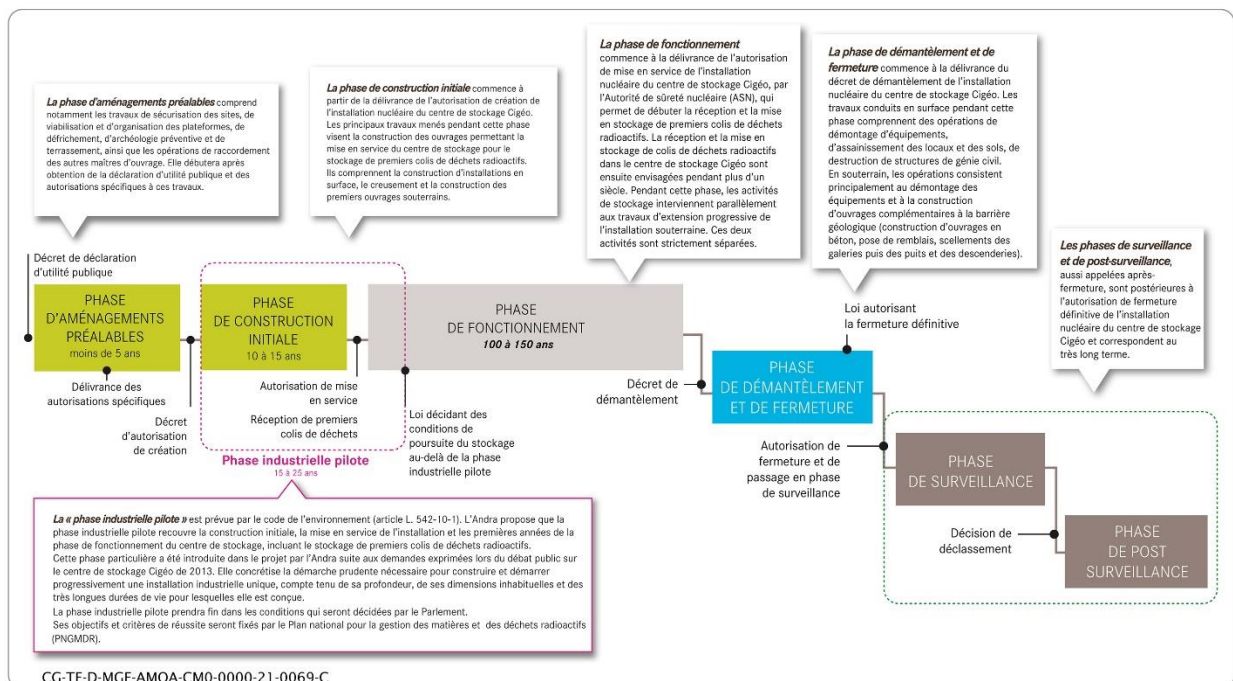


Figure 1. Les différentes phases temporelles de déploiement du centre de stockage Cigéo.

Ces déchets sont issus principalement de l'industrie électronucléaire, mais aussi de la Défense nationale et de la recherche.

S'il est construit, le centre de stockage Cigéo sera localisé dans les départements de la Meuse et de la Haute Marne. La conception, la construction et l'exploitation du centre de stockage Cigéo visent à garantir son caractère réversible (article L. 542-10-1 du code de l'environnement [1]).

Conformément aux exigences de l'article L.542-10-1 du code de l'environnement [1], l'Andra intègre au projet une phase industrielle pilote (dénommée Phipil) dont l'objectif est de « conforter le caractère réversible et la démonstration de sûreté de l'installation ». Sur la base des résultats de cette phase industrielle pilote, c'est le Parlement qui décidera des conditions de poursuite du stockage. L'INB Cigéo est la seule installation industrielle pour laquelle la réglementation prévoit, après son autorisation par décret, un rendez-vous parlementaire précisant les conditions de son éventuelle poursuite.

Dans l'hypothèse de la poursuite du stockage, la phase de fonctionnement du centre de stockage Cigéo, qui suit la phase de construction (dénommée phase de construction initiale), se poursuivra pendant une durée d'ordre séculaire. Des opérations de réception et de mise en stockage de colis de déchets radioactifs seront menées en parallèle de travaux d'extension des ouvrages de stockage, réalisés par tranches successives. Ce déploiement progressif permet, dans son principe, de tenir compte d'éventuelles évolutions dans les programmes de livraison des colis et de bénéficier des progrès scientifiques et technologiques, ainsi que de l'expérience acquise lors du fonctionnement du centre lui-même. Les différentes phases temporelles de déploiement du centre de stockage Cigéo sont présentées sur la Figure 1. Elles définissent une temporalité importante pour l'élaboration d'éventuelles solutions alternatives ou complémentaires au projet initial.

VI. Examen des solutions alternatives au stockage en couche géologique profonde

1. Le point de départ de l'analyse du comité

En 2019, dans le cadre de la préparation du débat public relatif à la 5^{ème} édition du PNGMDR, l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) a produit un rapport (n° 2019-00318) dressant un panorama international des recherches sur les solutions alternatives au stockage en couche géologique profonde des déchets HA et MA-VL. Six grandes familles de solutions alternatives étaient présentées : l'envoi dans l'espace des déchets, leur immobilisation dans la glace, leur stockage dans les fonds marins, leur stockage en forages (de type pétrolier), l'ELD renouvelé et enfin la séparation / transmutation.

Certaines voies n'ont pas fait l'objet de recherches en France et sont abandonnées aujourd'hui au plan international (envoi dans l'espace, immobilisation dans la glace). D'autres ont été abandonnées rapidement par la France, à la suite de travaux de recherche préliminaires (stockage dans les fonds marins, stockage en forages). C'est la raison pour laquelle la loi de 1991 [2] ne considérait pas de telles solutions alternatives.

Parmi les six grandes familles considérées en 2019 dans le rapport de l'IRSN, les seules solutions alternatives examinées dans ce rapport sont l'ELD renouvelé et la séparation / transmutation.

Le stockage en forage profond se distingue techniquement du stockage en couche géologique profonde par le fait qu'il ne s'agit pas de creuser une mine accessible. Le stockage d'effluents liquides ou l'empilement de déchets conditionnés dans un forage profond sont toujours examinés au plan international. Ce sujet fera l'objet d'un complément d'analyse par le comité en 2025.

2. Séparation / transmutation

a. Principe

Le terme « *transmutation* » s'applique ici aux radionucléides à vie longue pour lesquels aucune valorisation énergétique n'est envisageable à court ou long terme. Il est à noter que le Plutonium est déjà valorisé en France dans les combustibles MOX⁶ et dont le recyclage est envisagé dans les réacteurs de

⁶ Il s'agit de combustibles constitués d'un mélange d'oxyde d'uranium et d'oxyde de plutonium.

3^{ème} génération, et, à plus long terme, le multi-recyclage dans les Réacteurs à neutrons rapides (RNR). Cette technologie, que seuls quelques pays sont capables de mettre en œuvre, constitue une étape de transmutation déjà acquise en France et n'est donc par développée dans la suite du document.

La transmutation concerne donc potentiellement, et uniquement, les Produits de fission (PF) issus de la fission des noyaux lourds (Iode, Césium, ...) et les Actinides mineurs (AM : Neptunium, Américium, Curium). Rappelons que pour 1 tML chargée en réacteur (UOX à 3,7%, burn-up 45GWj/t), on obtient dans le combustible usé environ 49 kg de PF (dont 42 kg d'isotopes stables, 3 kg de PF à vie moyenne et 4 kg de PF à vie longue), 11 kg de Plutonium et 1,4 kg environ d'AM (ce qui représente une production par le parc français d'environ 1 t/an)⁷.

La transmutation des PF est effectuée par capture neutronique (ex : la capture d'un neutron par un isotope le transmute en un isotope à vie courte, qui devient rapidement stable). Elle se heurte à plusieurs difficultés :

- des captures parasites sont possibles, on détruit des noyaux tout en créant d'autres, c'est le cas pour le Césium (135, 137, ...);
- il faut des matériaux qui contiennent l'élément à transmuter et qui se comportent de façon sûre pendant l'irradiation en réacteur : difficulté pour l'iode par exemple ;
- la transmutation consomme des neutrons. Seuls les réacteurs produisant des neutrons de façon rentable énergétiquement peuvent être utilisés.

La transmutation des AM est produite par fission induite par des neutrons. En multi-recyclant les AM en réacteur, on peut envisager de les détruire par fission. Toutefois, ceci n'est effectif que dans le cas d'un recyclage en RNR. Dans un Réacteur à eau pressurisée (REP), les matières fissiles capturent plus de neutrons et l'équilibre entre la production d'AM et leur transmutation n'est pas favorable.

Dans le cas d'un parc de RNR électrogène, la transmutation peut s'envisager dans des assemblages dédiés introduits dans ces RNR (par exemple en couverture) en mode « *simple strate* ». Le taux de transmutation en RNR serait d'environ 4% (AM) par an. Si on dispose des installations ad-hoc (et en gardant la puissance du parc électrique actuelle), on peut espérer atteindre un « *équilibre* » après une période de l'ordre de plusieurs dizaines d'années. Cet équilibre signifie que *la transmutation compenserait la production de nouveaux AM*.

La transmutation des AM s'inscrit donc dans un temps long (minimum 1 siècle), durant lequel des installations nucléaires doivent être disponibles et opérationnelles. Elle postule le multi-recyclage du plutonium, et suppose que les procédés de séparation du plutonium, des AM et des PF existent à une échelle industrielle, de même que les installations permettant de fabriquer les nouveaux combustibles et les moyens de transport correspondants pour ces matières hautement radiotoxiques.

Dans le cas d'un parc d'installations composé de REP, il faudrait disposer d'une « *seconde strate* » d'installations (réacteurs rapides) dédiées à la transmutation des AM. Cela suppose à nouveau que le plutonium est multi-recyclé, sinon il serait le principal contributeur à la radiotoxicité à long terme des déchets et sa décroissance conduit, elle aussi, à la formation d'AM.

Globalement, la transmutation des AM (Américium et Curium) pourrait réduire (d'un facteur 10 à 100) leur radiotoxicité sur une période allant de 100 à 1 000 000 années, et potentiellement réduire l'emprise du stockage d'un facteur 2 à 4,6 en diminuant la production de chaleur résiduelle dans le stockage car l'Américium 241 est un déchet très exothermique⁸.

b. Analyse du comité

L'annexe II présente la synthèse des recherches sur la séparation / transmutation présentées au comité. L'annexe III comprend aussi le panorama des projets financés par France 2030 en réponse à l'appel lancé

⁷ R. Guillaumont, techniques de l'Ingénieur, 2013.

⁸ Cf. Avis IRSN 2012-00363 du 3 août 2012 relatif à l'examen du rapport d'étape du CEA, d'octobre 2010, portant sur les évaluations technico-économiques des options de séparation / transmutation.

sur les solutions alternatives au stockage en couche géologique profonde. Le lecteur pourra s'y reporter pour avoir plus de détails.

En préambule, le comité souligne que le cycle du Plutonium contribue le plus à la radiotoxicité à long terme des éléments contenus dans les CU. Par ses conséquences en termes de production d'énergie, de développement d'un parc électronucléaire et des installations correspondantes, et en termes de gestion de l'uranium dans le cycle, le choix du retraitement de l'uranium et du Pu (hors de la saisine du comité), présente plus d'intérêt pour la société que celui de la transmutation éventuelle des PF et des AM.

➤ **Un consensus international motivant la R&D sur la séparation / transmutation.**

La lutte contre le changement climatique et la nécessaire sécurité en matière d'approvisionnement et de disponibilité de l'énergie sont les deux grandes motivations à l'origine d'un consensus d'experts pour valoriser le Plutonium en prônant un cycle du combustible « fermé » et dynamiser la recherche sur la séparation et sur la transmutation afin de réduire les déchets et leur radiotoxicité à long terme. Le comité retient aussi du panorama international présenté trois enjeux importants :

- améliorer la collaboration avec la communauté du stockage pour trouver ensemble les solutions les plus favorables. Le projet D-CLIC¹⁰ financé par France 2030 est une bonne illustration de cette démarche ;
- augmenter les efforts dans le domaine de la modélisation, pour accélérer les programmes de recherche amont tout en évitant autant que possible des programmes expérimentaux très coûteux ;
- établir des collaborations avec les start-ups sur les Small modular reactors (SMR) et surtout les Advanced modular reactors (AMR), en vue d'un débat de fond technique sur les conditions de leur exploitation, incluant la gestion de tous les déchets produits et leur retraitement potentiel.

➤ **La transmutation ne peut constituer une solution alternative au stockage en couche géologique profonde. C'est une piste complémentaire, uniquement pour les déchets HA.**

Dès 2012, il a été constaté que la transmutation ne pouvait résoudre l'intégralité du problème posé par les déchets HA. S'agissant des déchets MA-VL, la faible concentration en radionucléides et les techniques de séparation disponibles ne permettaient pas d'envisager un traitement efficace par transmutation.

Les recherches se sont focalisées sur les déchets HA et sur la transmutation de l'américium, seule piste jugée envisageable pour des raisons de sûreté et de rendement. Pourtant, les AM sont parmi les radionucléides les moins mobiles dans la solution de stockage en couche géologique profonde envisagée en France. Ils sont donc ceux qui ne présentent pas de difficulté vis-à-vis de la dose à l'exutoire (comparée à certains PF), ce qui constitue un paradoxe du point de vue de la radioprotection de l'homme et de l'environnement.

Les radionucléides les plus impactant sur la dose à l'exutoire sont l'Iode, le Chlore, le Sélénium et le Carbone. Pour ceux-ci, aucune piste qui permettrait de les transmuter industriellement n'existe à la connaissance du comité. Pour aboutir à une véritable solution alternative, la recherche exploratoire devrait donc aussi porter sur une gestion différente des PF, permettant d'éviter leur mise en stockage en couche géologique profonde. A ce jour, le comité n'a pas connaissance de tels travaux.

Il ne faut donc pas laisser penser que la transmutation des AM peut être une solution qui permettrait de s'affranchir complètement d'un stockage en couche géologique profonde. Par ailleurs, **le comité souligne que les déchets déjà produits et vitrifiés seraient, en l'état des connaissances et savoir-faire actuels,**

⁹ Qui dans le cas idéal ne fait plus appel à l'uranium naturel.

¹⁰ Le projet s'intéresse au conditionnement de trois radionucléides à vie longue (14C, 36Cl et 129I) caractérisés par une mobilité élevée dans l'environnement. L'enjeu est de les immobiliser dans une matrice à haute durabilité chimique (i.e. présentant un faible niveau d'altération par interaction avec des vecteurs de dissémination tels que l'eau). Pour ce faire, il est proposé de recourir à une matrice de phosphate de calcium à structure apatitique, minéral dont les propriétés remarquables de durabilité sont bien établies.

particulièrement difficiles à reprendre pour séparer et isoler les AM et PF qu'ils contiennent en vue d'une éventuelle gestion différente de celle envisagée aujourd'hui. Leur mode de conditionnement a été développé justement pour garantir leur immobilisation la plus sûre possible. Pour ces derniers, le stockage en couche géologique profonde est aujourd'hui la seule voie logiquement envisageable.

➤ **La transmutation des AM pour optimiser le stockage en couche géologique profonde des déchets HA.**

Focaliser les études et recherches sur la transmutation des AM est aujourd'hui motivé par un éventuel gain en densité de déchets dans le stockage. Les études du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) ont évalué ce gain, même si elles ont pointé le surplus de déchets MA-VL, dont l'emprise est nettement plus faible que celle des déchets HA.

Ce gain est à mettre en regard des efforts à consentir d'un point de vue technico-économique. Il convient de garder présent à l'esprit les problématiques de radioprotection bien réelles qui seraient associées à l'ensemble du process de transmutation. La transmutation des AM requiert la séparation, la manipulation et le transport de matières hautement radioactives en quantités pondérales, dans des installations qui sont à concevoir. L'ensemble de ces facteurs fait que, *avec les techniques et procédés actuels*, la balance coût-bénéfice de la transmutation des AM paraît défavorable.

➤ **La mise en œuvre éventuelle de la transmutation, opération complexe qui s'inscrit dans un temps long, comprend de nombreux verrous technologiques et requiert une vision de la stratégie nucléaire à très long terme.**

La faisabilité de la transmutation de l'américium a été démontrée. Cependant, sa mise en œuvre industrielle rencontrerait de grandes difficultés technologiques qui, pour être résolues, nécessiteraient des investissements particulièrement lourds pour résoudre les problèmes liés à la séparation des matières, à la sûreté de leur transport et à la fabrication (et certification) de nouveaux combustibles. A cela pourraient s'ajouter les difficultés de traitement de nouveaux combustibles dans d'éventuels Advanced modular reactors (AMR) / Small modular reactors (SMR) (si ces derniers sont très différents des combustibles actuels).

Engager de tels moyens demande une visibilité accrue de la stratégie nucléaire. On parle de plusieurs dizaines d'années pour parvenir à un équilibre, c'est à dire une transmutation qui compenserait la production des déchets, tout cela dans des installations qui n'existent pas aujourd'hui. Plus on reporte les décisions sur la mise en œuvre éventuelle de la transmutation, plus on accroît le volume de déchets produits à l'atteinte de cet équilibre, qu'il faudra bien traiter/stocker, sans compter ce qui resterait dans le cycle lorsque la filière serait arrêtée.

➤ **Des pistes de recherche « à bas TRL » (Technology readiness level : niveau de maturité d'une technologie) sont développées.**

La transmutation des actinides mineurs « *en double strate* » consisterait à adjoindre dans le cycle électronucléaire un dispositif destiné à transmuter les actinides une fois séparés de l'uranium et du plutonium. Seraient mis en stockage en couche géologique profonde les PF et une très faible quantité d'AM et de plutonium (car les process de séparation ne permettent pas d'isoler 100% d'une matière).

Malgré un assez grand nombre de programmes lancés dans le monde, il y a peu de progrès visibles permettant de démontrer un avantage évident par rapport à la technologie en « *simple strate* » qui consiste à transmuter les actinides mineurs dans des RNR électrogènes. Parmi ces programmes, deux voies faisant l'objet de projets financés par France 2030 ont été examinées par le comité, considérant que l'utilisation des lasers était à un niveau de recherche trop amont et ne fait pas actuellement l'objet d'un projet soutenu par France 2030 :

- la transmutation des actinides mineurs en ADS (Accelerator driven systems) a été bien étudiée en France⁸ et également à l'étranger (Suisse, Belgique, Japon, Russie,...). On en connaît les atouts et les limites : la source de neutrons nécessaires pour la transmutation est pilotable (accélérateur de particules), les combustibles peuvent contenir une grande quantité de matière à transmuter. La sûreté du système repose sur le contrôle de la criticité du réacteur, et c'est justement sur ce sujet que la R&D se focalise. Ce contrôle doit être réalisé en fonctionnement permanent, et c'est là l'enjeu de cette technologie car cela n'a encore jamais été réalisé dans des conditions de puissance représentatives d'un dispositif réel ;.

- les réacteurs à sels fondus (RSF) constituent une seconde voie, revisitée aujourd'hui après le quasi-abandon des recherches sur ce sujet dans les années 1960. Les RSF (éventuellement brûleurs d'AM) figurent parmi les concepts susceptibles de pouvoir permettre des gains notables : en mélangeant le combustible au fluide caloporteur sa concentration peut être accrue avec des modalités de mise en œuvre moins pénalisantes si un retraitement au « *pied du réacteur* », pouvait être réalisé. **Cette technologie a pour principal avantage d'éviter les multiples manipulations de matières hautement radioactives pour fabriquer un combustible solide.** Le temps passé par le combustible en réacteur serait beaucoup plus grand (amélioration du rendement de la transmutation) et la sûreté du dispositif serait intrinsèque. Les défis scientifiques et technologiques sont forts : chimie des sels à explorer, matériaux résistants à un environnement hautement corrosif, fabrication des sels. De nombreux systèmes restent à développer : instrumentation, échangeurs, systèmes de purification et de traitement, ... Cette voie a aussi été choisie par un des projets de SMR soutenu par France 2030. Les RSF ont certainement un potentiel qui mérite une R&D soutenue, d'autant plus qu'il s'agit d'une recherche à très bas niveau de TRL (1 à 3), nettement moins onéreuse que la R&D et les installations requises pour faire une démonstration industrielle.

➤ **Les avantages d'une recherche collaborative.**

La séparation et la transmutation des AM nécessitent l'accès à des infrastructures de recherche parfois uniques dans le monde (dont l'accessibilité est parfois soumise à des contraintes géopolitiques). Les perspectives éventuelles de recyclage de matières contenues dans les déchets actuels imposent aussi une vision systémique qui ne peut s'acquérir sans confronter les points de vue disciplinaires et industriels.

Ces constatations plaident pour une recherche collaborative et pluripartenaire, aussi bien en France qu'avec des acteurs internationaux, non pas avec le seul objectif de partager les coûts, mais bien avec pour perspective d'embrasser au mieux les sujets et de développer des solutions cohérentes et réalistes avec toutes les parties prenantes.

➤ **Une logique d'économie circulaire que les projets français commencent à s'approprier par des recherches sur la séparation.**

La logique consistant à déployer de la R&D sur la séparation et la transmutation en vue de diminuer le volume des déchets à stocker n'est pas la seule perspective possible : celle qui aborde **la séparation en vue du recyclage de matières** dont l'importance industrielle serait grande **est une autre perspective** (voir annexe IV). Cette logique s'applique principalement aux déchets MA-VL contenant une faible quantité de radioéléments à vie longue. Les projets actuels sont à l'état de pistes (par exemple s'agissant des coques et des embouts dans le cadre du projet REGAIN financé par France 2030). S'ils pourraient permettre d'en réduire le volume, ils ne se substitueront pas à un stockage en couche géologique profonde.

L'obstacle majeur pour aboutir avec une application réelle et durable du recyclage est d'abord la difficulté à séparer les matières (dont certaines pourraient éventuellement être transmutes et d'autres recyclées). Les éléments séparés contiennent toujours un pourcentage d'isotopes radioactifs plus ou moins grand. La maturité des techniques de séparation (surtout sur base lasers) est donc essentielle pour une réussite de ces projets (c'est l'objet du projet EPONA financé par France 2030 s'agissant des platinoïdes). Le recyclage dans le domaine conventionnel est une seconde difficulté, mais la voie réglementaire pour cela a été entrouverte en France.

*Toute approche **complémentaire** permettant la réduction des volumes de déchets à stocker et l'éventuel réemploi de matières doit être étudiée en vue d'une mise en œuvre possible. Il convient, cependant, de garder une vision systémique comprenant l'impact sur les déchets produits, les installations, la radioprotection des travailleurs, le transport des matières et des déchets, les coûts, tout en considérant le temps nécessaire pour élaborer une telle approche et les engagements qu'elle implique.*

3. Entreposage de longue durée (ELD)

a. Principe

Un entreposage de colis contenant des matières ou des déchets radioactifs est une installation temporaire. Elle est soumise à la réglementation des INB, qui impose des exigences spécifiques en matière de traçabilité, de surveillance et de possibilité de reprise des colis à tout moment, outre les exigences générales de sûreté et de radioprotection. En tout état de cause, les colis sont destinés à être repris pour être placés dans un nouvel entreposage ou dans un stockage définitif. Lorsque la durée d'entreposage envisagée est très longue (plusieurs centaines d'années comme cela a pu être étudié par le passé), des aspects cruciaux tels qu'une conception adaptée, la surveillance, la maintenance et la gestion du vieillissement ainsi que le maintien de la connaissance des colis prennent une importance particulière.

Un ELD nécessite des conceptions simples et robustes, distinctes de celles des autres types d'installations. Celles-ci visent à intégrer les problématiques liées au vieillissement, qui s'amplifient avec le temps, ainsi que l'apparition de phénomènes non anticipés ou l'obsolescence de matériels. Ces conceptions doivent garantir des marges de sûreté suffisantes tout au long de la durée de vie de l'installation, tout en intégrant la possibilité d'évacuer les colis. À cet effet, il est important de prévoir la possibilité de remplacer ou de réparer les éléments de l'installation ou les colis. Cela peut nécessiter de prévoir des espaces réservés pour entreposer temporairement une partie des colis.

Les marges de sécurité doivent également permettre à l'installation de s'adapter aux changements des niveaux d'aléas retenus pour chaque agression prise en compte dans l'analyse de sûreté (changement climatique, évolution des connaissances ou des risques d'origine anthropique...). Il est également essentiel d'anticiper le maintien des moyens supports de l'installation (fournisseurs matériels et utilités, laboratoires, logistique, gestion déchets et effluents ...), indispensables à son exploitation, sa maintenance et sa surveillance. À cet égard, les différentes phases d'exploitation (remplissage, entreposage, désentreposage, cessation d'activité) présentent chacune des enjeux, des exigences et des équipements spécifiques, dont certains sont directement liés à de futures opérations. Le maintien et la surveillance de ces équipements tout au long de l'exploitation sont importants, nécessitant des moyens particuliers et des opérations d'exploitation régulières. Enfin, l'état des colis, qui constituent une barrière de confinement lors de l'entreposage ainsi que lors des opérations de reprise ou de futur entreposage ou stockage, doit faire l'objet d'une surveillance rigoureuse.

Il est également primordial de prendre en compte des scénarios d'abandon de l'exploitation, qu'ils soient temporaires ou prolongés, afin de garantir la résilience de l'installation.

b. Analyse du comité

Le comité a souhaité consacrer une partie de sa réflexion à l'ELD, considéré ici comme solution alternative au stockage en couche géologique profonde. Cette question a pourtant déjà été tranchée par la loi de 2006 [4], mais cela ne signifie pas qu'il ne soit pas utile de revisiter périodiquement les choix faits par le passé. C'est d'ailleurs ce que l'Évaluation socio-économique (ESE) du stockage Cigéo a fait en examinant plusieurs scénarios basés sur le stockage en couche géologique profonde et l'ELD renouvelé périodiquement, tout en considérant d'ailleurs que techniquement, chacun était possible aujourd'hui. L'annexe V présente la synthèse des travaux présentés au comité.

- **Aucun nouvel argument ne permet aujourd'hui de considérer à nouveau l'ELD renouvelé comme une solution alternative.**

Les principaux éléments qui avaient conduit à écarter l'ELD renouvelé (en surface comme en sub-surface) comme une solution alternative au stockage en couche géologique profonde restent d'actualité : la nécessité de disposer d'une solution de stockage passive, et de ne pas reporter sur les générations futures le devoir de gérer des déchets à vie longue. L'ESE du stockage Cigéo montre bien que l'entreposage renouvelé ne se justifie que sous l'hypothèse d'une société future prospère et stable, hypothèse que notre passé proche n'incite pas forcément à accepter avec confiance.

L'ELD ne répond pas à la nécessité d'avoir une gestion passive c'est-à-dire ne faisant pas appel à l'intervention humaine pendant toute la période, de l'ordre du million d'années, au long de laquelle les déchets présentent un danger pour l'homme et l'environnement. S'il est situé en surface ou en

subsurface, l'ELD n'offre pas le même niveau de protection face aux agressions externes qu'un stockage en profondeur.

La proposition émise en 2005 de réaliser un entreposage à sec pour accueillir les déchets HA n'était d'ailleurs pas considérée comme une solution alternative, mais plutôt une *solution d'attente*, avec l'espoir que les progrès d'une discipline encore jeune – les sciences nucléaires – puissent déboucher d'ici une période convenue à l'avance, sur une autre solution que le stockage en couche géologique profonde.

➤ **Un stockage réversible en couche géologique profonde peut-il devenir un entreposage ?**

Si l'exercice de la réversibilité conduisait à prendre la décision d'arrêter l'exploitation de la solution de référence envisagée aujourd'hui (le stockage en couche géologique profonde), par exemple pour des raisons de sûreté à très long terme, celle-ci deviendrait, de fait, une installation d'entreposage de déchets radioactifs, le temps de le vider de son contenu. Certes, on pourrait alors penser que vu les coûts induits par la construction d'une telle installation souterraine, il aurait été plus économique d'entreposer les déchets en surface dès le départ. Cependant, sur le plan des principes, un stockage en couche géologique profonde ainsi requalifié devrait pouvoir satisfaire aux principales exigences d'une installation d'ELD (pourvu que la récupérabilité des colis soit assurée, de manière concomitante à la réversibilité). De fait, le stockage réversible pourrait jouer ce rôle de solution d'attente, certes en déployant des moyens techniques plus importants que ce qui serait *a priori* strictement nécessaire.

➤ **Faut-il mener aujourd'hui des études et recherches spécifiques sur l'ELD ?**

S'agissant de la gestion des déchets HA, engager des travaux sur l'ELD (séculaire ou pluriséculaire) doit être examiné à la lumière de trois considérations au moins :

- les opportunités offertes par les jalons définis dans le cadre du projet Cigéo. La majorité des déchets HA ne seront stockés que dans plus de 50 ans, ce qui laisse plus de temps et requiert d'ores et déjà un entreposage pour lequel des études et recherche se poursuivent afin d'optimiser le développement ;
- réaliser un ELD pluriséculaire signifie être capable de maîtriser le vieillissement des matériaux et des systèmes, dans des conditions extrêmes liées à la présence de radioactivité, et de maîtriser les modalités de surveillance de l'entreposage tout en veillant à la maintenance de l'ouvrage. Il faut aussi s'assurer de la possibilité de récupérer les déchets entreposés en toute sécurité. Quelques pistes de solutions existent mais elles doivent être confirmées par une recherche qui, dès lors que l'on parle de vieillissement par exemple, ne pourra pas déboucher sur des solutions validées expérimentalement d'ici 10 à 20 ans.

Considérant que des installations d'entreposage des déchets HA ont déjà été conçues et existent déjà, faut-il en concevoir de nouvelles ayant une durée de vie plus longue, nécessitant donc une R&D dédiée ?

Certains déchets HA produits actuellement auront été, selon le calendrier actuel, entreposés pendant une centaine d'années avant d'être mis en stockage. Ainsi, les ouvrages existants ou à venir et les éventuelles études menées pour améliorer et garantir la sûreté des entreposages actuels de déchets HA contribuent à maintenir un niveau qui pourrait convenir à une solution d'attente. Mener des études spécifiques sur l'ELD apparaît donc redondant aux yeux du comité.

VII. Conclusion provisoire et perspectives

Au stade d'une année de travail, **le comité considère qu'il n'y a pas actuellement de piste pour une solution alternative au stockage en couche géologique profonde. Il y a des travaux de recherche qui, à terme, pourraient ouvrir la voie à des modes de gestion complémentaires.** C'est le cas des travaux de R&D sur la transmutation comme des travaux visant à améliorer le conditionnement ou rendre possible un jour le recyclage éventuel de certaines matières. **Au vu des connaissances actuelles, il n'est pas aujourd'hui possible de s'affranchir du stockage en couche géologique profonde pour la gestion des déchets HA et MA-VL.**

Cependant, cela ne signifie pas pour autant qu'il faille stopper les efforts de recherche sur la séparation / transmutation. Il importe de communiquer sur les qualités et les attentes des efforts de

recherche et de développement industriels à entreprendre, en les replaçant dans une temporalité réaliste au regard des connaissances et des acquis à ce jour.

Le comité considère enfin qu'il **ne faut pas sursoir au déploiement prudent d'un stockage en couche géologique profonde** (qui est aujourd'hui à un stade industriel) **dans l'espoir d'une complémentarité éventuelle liée à la transmutation**. Les enjeux soulevés par les déchets HA et la maturité trop faible d'une piste complémentaire utilisant la transmutation des AM ne le justifieraient pas (la transmutation des PF n'apparaissant pas possible). Entreposer les PF et AM (car le plutonium serait le premier à être séparé et multi-recyclé) dans l'attente de progrès présenterait aussi trop de risques au regard de la toxicité et de la thermicité des matières concernées.

Pour l'année 2025, il est proposé de tenir, à une date qui reste à préciser, une unique réunion de travail du comité dont l'ordre du jour pourrait comprendre les points suivants :

- actualité globale, notamment en lien avec les projets France 2030 ;
- état de l'art relatif au stockage en forages ou « *deep borehole disposal* », sujet faisant l'objet d'une tâche dédiée au sein du Work package (WP) ASTRA (« *Alternative radioactive waste management strategies* ») d'EURAD2 (« *European joint programme on radioactive waste management* ») ;
- tout sujet identifié à la faveur de la veille à conduire par le comité.

VIII. Textes officiels

[1] Code de l'environnement.

[2] Loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs (NOR INDX9100071L).

[3] Loi constitutionnelle n° 2005-205 du 1^{er} mars 2005 relative à la charte de l'environnement (NOR JUSX0300069L).

[4] Loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs (NOR ECOX0600036L).

[5] Loi n° 2016-1015 du 25 juillet 2016 précisant les modalités de création d'une installation de stockage réversible en couche géologique profonde des déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue (NOR DEVX1614324L).

[6] Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs 2022-2026.

[7] Décret n° 2022-1547 du 9 décembre 2022 prévu par 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 (NOR ENER2231732D).

[8] Arrêté du 9 décembre 2022 pris en application du décret n° 2022-1547 du 9 décembre 2022 prévu par 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 (NOR ENER2231735A).

IX. Annexe I – Composition du comité

Constitution du comité

Les membres du comité ont été nommés par le ministère chargé de l'énergie, sur la base des propositions émises par la CNE2, l'IRSN, l'Andra, le CEA, EDF et la commission de gouvernance du PNGMDR. Le comité est piloté par une personnalité qualifiée choisie par le ministère chargé de l'énergie et son secrétariat est confié à l'Andra.

Pilotage

Gilles PIJAUDIER-CABOT Université de Pau et des Pays de l'Adour

Secrétariat technique Andra

Membres experts

Corinne BAUER	Andra
Bernard BOULLIS	CNE2
Sylvain DAVID	CNRS IN2P3
Christophe GIROLD	CEA
Jean-Paul GLATZ	CNE2
Igor LE BARS	IRSN
Henri LE MONIES DE SAGAZAN	EDF
Audrey LEBEAU-LIVE	IRSN
Jean-Paul MINON	CNE2
Delphine PELLEGRINI	IRSN
Magali SALUDEN	CEA
François SUDREAU	CEA
Virginie WASSELIN	Andra

Membres issus de la commission de gouvernance du PNGMDR

Jean-Dominique BOUTIN	France nature environnement (FNE)
Joseph DUPUIS	Sauvons le climat (SLC)
Pierre FORBES	Orano
Bruno FREDET	Sauvons le climat (SLC)
Stéphane GRANDJEAN	DGRI/SSRI
Dominique GRENECHE	Patrimoine nucléaire et climat (PNC-France)
Claude JAOUEN	Les Voix du Nucléaire
Benoît JAQUET	Comité local d'information et de suivi (CLIS) de Bure
Bernard LAPONCHE	Global Chance
Olivier LAREYNIE	ASN
Xavier MOYA	Mission de la sûreté nucléaire et de la radioprotection (MSNR)
Viviane NGUYEN	ASN
Coralie PINEAU	Association nationale des comités et commissions locales d'information (ANCCLI)

Gerald SENENTZ
Vincent THIEBAULT
Mélanie VARNUSSON
Adrien WATT
Estelle YUNG

Orano
Assemblée Nationale
Groupement d'intérêt public (GIP) Objectif Meuse
ASN
Conseil départemental de la Meuse

X. Annexe II – Synthèse des présentations sur la séparation/transmutation

1. Transmutation – principes de base

Le terme « *transmutation* » s'applique ici aux radionucléides à vie longue pour lesquels aucune valorisation énergétique n'est envisageable à court ou long terme. Cela exclut le Plutonium qui est valorisé en France dans les combustibles MOX et dont le recyclage est envisagé dans les réacteurs de 3^{ème} génération, et, à plus long terme, un multi-recyclage dans les RNR. La transmutation concerne donc potentiellement les PF issus de la fission des noyaux lourds (Iode, Césium, Technétium, ...) et les AM (Neptunium, Américium, Curium).

Rappelons que pour 1 tML chargée en réacteur (UOX à 3,7%, burn-up 45GWj/t), on obtient dans le combustible usé environ 49 kg de PF (dont 42 kg d'isotopes stables, 3 kg de PF à vie moyenne et 4 kg de PF à vie longue), 11 kg de Plutonium et 1,4 kg environ d'AM (ce qui représente une production par le parc français d'environ 1 t/an).

La transmutation des PF est effectuée par capture neutronique (ex : la capture d'un neutron par un isotope le transmute en un isotope à vie courte, qui devient rapidement stable). Elle se heurte à plusieurs difficultés :

- Des captures parasites sont possibles, on détruit des noyaux tout en créant d'autres, c'est le cas pour le Césium (135, 137, ...)
- Il faut des matériaux qui contiennent l'élément à transmuter et qui se comportent de façon sûre pour l'irradiation en réacteur : difficulté pour l'iode par exemple ;
- La transmutation consomme des neutrons. Seuls les réacteurs produisant des neutrons de façon rentable énergétiquement peuvent être utilisés. La transmutation peut diminuer les « *performances neutroniques* » d'un réacteur.

En France, les recherches sur la transmutation des produits de fission ne sont plus très actives depuis environ 20 ans.

La transmutation des AM est produite par fission induite par un neutron. En les multi-recyclant en réacteur, on peut envisager de les détruire par fission. Toutefois, ceci n'est effectif que dans le cas d'un recyclage en RNR. Dans un REP, les matières fissiles capturent plus de neutrons et l'équilibre entre la production d'AM et leur transmutation n'est pas favorable (le stock total atteint des valeurs élevées). Dans le cas d'un parc d'installations composé de REP, cela suppose l'existence d'une « *strate* » d'installations dédiées à la transmutation des AM (et aussi leur séparation). Cela suppose aussi que le plutonium est multi-recyclé lui aussi, sinon il serait le principal contributeur à la radiotoxicité à long terme des déchets et sa décroissance conduit, elle aussi, à la formation d'AM. Dans le cas d'un parc de RNR électrogène, la transmutation peut s'envisager de façon homogène dans ces RNR électrogènes, dans des assemblages dédiés introduits dans ces RNR, par exemple en couverture) ou dans des réacteurs rapides dédiés en mode « *double strate* ».

Globalement, la transmutation des AM (Américium et Curium) pourrait réduire (d'un facteur 10 à 100) leur radiotoxicité sur une période allant de 100 à 1 000 000 années, et réduire l'emprise du stockage en diminuant la production de chaleur résiduelle dans le stockage pendant les premiers siècles (l'Américium 241 est un déchet très exothermique).

Le taux de transmutation dans le cas d'un multi-recyclage est d'environ 4% (AM) par an. Si on dispose des installations ad-hoc (et en gardant la puissance du parc électrique actuelle), on peut espérer atteindre un « *équilibre* » après une période de l'ordre de *plusieurs dizaines d'années*. *Cet équilibre signifie qu'il n'y a plus de nouveaux déchets produits* (la transmutation compense la production de nouveaux déchets). Pour autant, les AM contenus dans les déchets vitrifiés actuels et produits avant l'équilibre subsisteront et une

quantité importante d'AM sera dans le cycle du combustible en quantité constante. Cette quantité, ajoutée au stock d'AM produits avant de mettre en œuvre la transmutation, est linéairement croissante dans le temps, tant que la transmutation n'est pas mise en œuvre.

La transmutation des AM s'inscrit donc dans un temps long (minimum 1 siècle), qui suppose une stratégie nucléaire nationale à très long terme stable. Elle postule le multi-recyclage du plutonium, et suppose que les procédés de séparation du plutonium, des AM et des PF existent à une échelle industrielle, de même que les installations permettant de fabriquer les nouveaux combustibles et les moyens de transport correspondants pour des matières hautement radiotoxiques. L'arbitrage coûts/bénéfices de la transmutation, tel qu'envisagé à ce jour, y compris le traitement des déchets restant dans le cycle lors de l'arrêt éventuel de la filière, est défavorable.

2. Synthèse des études menées par le CEA

Le traitement des CU, tel qu'il est pratiqué actuellement en France avec la mise en œuvre du procédé PUREX, permet de séparer l'uranium et le plutonium, mono-recyclé dans les réacteurs nucléaires d'EDF, des PF et des AM, qui sont actuellement destinés au stockage en couche géologique profonde après vitrification dans les usines de La Hague opérées par Orano. De nombreuses études ont été menées dans le cadre des lois de 1991 [2] et de 2006 [4] pour étudier la faisabilité et la pertinence de transmuter ces radioéléments, PF et AM, pour les transformer en éléments stables ou en radioéléments à vie courte.

Les PF, bien que comprenant les principaux éléments contributeurs à la dose à l'exutoire du stockage en couche géologique profonde, s'avèrent très difficiles à transmuter et l'industrialisation de ce mode de gestion des PF ne paraît pas aujourd'hui envisageable. La transmutation des AM seuls permettrait de diminuer la radiotoxicité des déchets stockés et la transmutation de l'²⁴¹Am en particulier, radioélément contribuant fortement à la thermique des colis durant les 300 premières années, permettrait de densifier le stockage des colis de déchets vitrifiés.

La transmutation des AM a été envisagée suivant trois grands modes, tous mettant en œuvre des RNR : le mode homogène dans lequel l'uranium, le plutonium et les actinides mineurs sont recyclés ensembles dans le combustible nourricier, le mode hétérogène dans lequel les AM sont également transmutés dans les réacteurs électrogènes, mais dans des combustibles spécifiques, et le mode hétérogène mettant en œuvre une strate de réacteurs dédiés à la transmutation. Pour ces 3 modes de gestion, des procédés de séparation ont été développés et validés à l'échelle laboratoire entre 2005 et 2010. En particulier, deux grandes expériences réalisées par le CEA peuvent être mentionnées :

- Le traitement de 15 kg de CU a conduit, après mise en œuvre successives des procédés PUREX, DIAMEX et SANEX, à isoler les actinides mineurs avec des taux de récupération aux différentes étapes supérieurs à 99,9 % ;
- Le traitement de 3 kg de CU UOx et de 1,6 kg de CU MOX a permis d'isoler 2,4 grammes d'américium par la mise en œuvre des procédés PUREX et EXAM. L'américium a ensuite été coprécipité sous forme d'(U,Am)O₂ et des pastilles représentatives de celles qui pourraient permettre la transmutation en mode hétérogène dans des réacteurs de puissance de type RNR refroidis au sodium ont été fabriquées.

Ainsi la faisabilité de la séparation des actinides mineurs a été montrée à l'échelle du laboratoire, pour chacune des voies de transmutation. Ces procédés restent cependant à consolider en conditions industrielles. On considère qu'un niveau de TRL 5-6 a été atteint pour le recyclage en mode homogène et 3-4 pour le recyclage en mode hétérogène.

A chacun des modes de transmutation, correspond des combustibles différents, contenant plus ou moins d'AM. Les impacts sur le cœur du réacteur et la fabrication, le traitement et la qualification du combustible sont également très dépendants du mode de transmutation : de faibles et modérés pour la transmutation en mode homogène à forts, voire très forts, pour la transmutation en réacteurs dédiés. Ainsi, une démarche de qualification de ces combustibles très innovants a été mise en œuvre et de nombreuses irradiations expérimentales ont été réalisées dans des réacteurs d'essais à neutrons thermiques (SILOE et OSIRIS en France, HFR au Pays-Bas et ATR aux USA), mais également dans des réacteurs à neutrons rapides (Phénix en France, JOYO au Japon et BOR60 en Russie). *Ce processus est long, un cycle complet de conception, études de sûreté, fabrication et examens post irradiations durant entre 10 et 15 ans.* L'ensemble de cette R&D a permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- En mode homogène, le comportement du combustible ne semble pas affecté par l'américium. Cependant, la démonstration complète (utilisation d'Américium issu du retraitement de CU, procédé de fabrication représentatif, puissance représentative, burn up élevé, ...) reste à faire pour vérifier les performances en réacteur et dans le cycle ;
- En mode hétérogène, des options intéressantes ont été identifiées mais elles sont à un stade préliminaire de développement. Ainsi, des irradiations expérimentales seraient nécessaires pour améliorer la conception des combustibles et les procédés de fabrication de ces combustibles très innovants restent à développer.

Cependant, la transmutation en mode homogène pénalise l'ensemble du cycle du combustible et la transmutation en mode hétérogène en RNR (ou en ADS) impose, pour atteindre les performances souhaitées, des cycles multiples de traitement recyclage car la durée de vie des gaines de combustibles en réacteur nécessite de les changer régulièrement. Les étapes d'extraction, de transport, de traitement, de refabrication, à nouveau de transport et de chargement en réacteur pénalisent très fortement la transmutation dans ces réacteurs.

Pour cette raison, le CEA et ses partenaires (Orano, le CNRS, EDF et Framatome) ont lancé, dans le cadre de France Relance, un projet (ISAC) en vue d'étudier la faisabilité des Réacteurs à Sels Fondus à Neutrons Rapides, ces réacteurs ayant, théoriquement, des atouts forts pour la transmutation, en particulier car leur combustible sous forme liquide pourrait séjourner en réacteur sur des durées beaucoup plus longues que les combustibles solides gainés.

3. Synthèse de la 16^{ème} réunion d'échange d'informations de l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) sur la séparation et la transmutation des actinides et des PF (16IEMPT)

La 16^e édition de la réunion d'échange d'information sur la séparation et la transmutation des actinides et des PF (16IEMPT) s'est tenue au siège de l'AEN du 24 au 27 octobre 2023, attirant plus de 90 participants de 13 pays et 3 organisations internationales. L'évènement a été inauguré par des remarques du Directeur Général de l'AEN, suivies de deux sessions spéciales :

- La première, dédiée au 30^e anniversaire de l'IEMPT, a retracé les principales avancées dans la séparation / transmutation au cours des trois dernières décennies, offrant un panorama de l'évolution du domaine.
- La deuxième session, s'est concentrée sur l'innovation et les développements futurs, offrant une perspective tournée vers l'avenir.

Le programme de la réunion a couvert un large éventail de sujets techniques et stratégiques, incluant des présentations sur les programmes nationaux et internationaux ainsi que des contributions spécifiques sur les stratégies et scénarios du cycle du combustible, les systèmes avancés et les infrastructures de R&D, la modélisation, les combustibles avancés, les avancées dans les procédés de séparation, la gestion des déchets, et les utilisations innovantes des actinides et des produits de fission. Les conclusions de chacune des sessions figurent dans la présentation.

Une session de synthèse a conclu l'évènement, avec la présentation des principales considérations et conclusions de chaque session. Cette session finale a également favorisé une discussion ouverte, permettant l'échange d'idées et de perspectives. Les participants ont souligné la nécessité d'améliorer la communication avec les parties prenantes, y compris les gouvernements et le grand public, en mettant l'accent sur les avantages des cycles du combustible fermés tels que la durabilité, l'économie circulaire et la sécurité énergétique. L'importance de renforcer les liens avec la « communauté du stockage géologique » a également été mise en avant.

4. Avis de la CNE

Une solution alternative au stockage en couche géologique profonde est une installation ou une combinaison d'installations, éventuellement associées à des procédés de traitement et de conditionnement spécifiques, qui permet de garantir le même niveau de sûreté qu'un stockage en couche géologique profonde pendant la même durée et sous les mêmes contraintes. Et c'est à ce titre que

l'entreposage, dont la durée est par essence très inférieure à celle du stockage en couche géologique profonde, n'est pas considéré comme une solution alternative à celui-ci.

La transmutation ne permet pas de s'affranchir d'un stockage en couche géologique profonde et n'en modifie pas fondamentalement les aspects de sûreté. Elle pourrait offrir une opportunité de réduire significativement l'emprise des stockages en couche géologique profonde en diminuant la puissance thermique de colis de déchets qui ne sont pas encore produits. Cela supposerait de lever de nombreux verrous technologiques et de maintenir à long terme un parc nucléaire approprié.

Les radionucléides contenus dans les déchets susceptibles d'être transmutés doivent être séparés avant d'être incorporés au combustible du réacteur ou d'être conditionnés dans des combustibles ou cibles spécifiques. Le procédé ne peut pas s'appliquer aux déchets MA-VL, ni aux déchets HA déjà vitrifiés et il n'est envisageable que si l'on dispose d'installations et de procédés performants et opérationnels pour la séparation des éléments contenant les radionucléides à transmuter et pour la fabrication des combustibles ou cibles de transmutation.

Dans tous les cas, les solutions de transmutation (RNR, ADS, réacteurs à sels fondus ou les lasers) sont incompatibles avec un arrêt de la politique de retraitement des combustibles. De même, compte tenu des efforts scientifiques et industriels qu'elles supposent, elles ne peuvent s'inscrire dans un scénario d'arrêt du recours à l'énergie nucléaire en France.

5. Avis de l'IRSN

En 2012, à la suite des travaux du CEA sur la séparation et la transmutation des éléments radioactifs à vie longue contenus dans les CU, l'IRSN a émis un avis constatant que la transmutation des PF était difficile, voire impossible et que celle-ci ne pouvait porter que sur une partie des AM (²⁴¹Am). L'avis concluait sur la nécessité de disposer d'un stockage, la transmutation ne pouvant, à elle seule, répondre au problème de gestion des déchets à vie longue.

Saisie par l'ASN sur l'examen des bénéfices potentiels de la transmutation sur le stockage des déchets à vie longue et sur les conséquences sur les installations du cycle du combustible, l'IRSN a travaillé en 2012 sur des scénarios élaborés par le CEA dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Un déploiement d'un parc de réacteurs RNR à partir de 2040, en remplacement de réacteurs REP / EPR (European pressurized reactor : réacteur pressurisé européen),
- Un recyclage du plutonium,

et selon le scénario :

- L'absence de transmutation des actinides mineurs (Np, Am, Pu) ;
- La transmutation de tous les actinides mineurs ;
- La transmutation uniquement de l'américium ;
- Le déploiement possible, en parallèle des réacteurs de puissances, d'ADS.

Les conclusions de l'expertise par l'IRSN sont :

- La durée importante (nécessaire transmuter tous les déchets) qui implique de renouveler au moins deux fois les installations du cycle du combustible ;
- L'inventaire des matières et déchets restant dans le cycle à la fin des scénarios qui doit être intégré dans l'appréciation des scénarios ;
- La complexité des installations (sûreté, radioprotection, production de déchets) avec des verrous technologiques persistants pour une mise en œuvre industrielle ;
- La complexité des modalités de transport des déchets et matières dans le cycle.

Mis en regard des gains potentiels sur l'architecture du stockage Cigéo (accroissement de la densité du stockage des déchets HA, diminution de la radiotoxicité mais pour des éléments facilement confinés dans l'argile, réduction du délai d'attente avant stockage), l'IRSN avait conclu en 2012 que les gains espérés de la transmutation des actinides mineurs n'apparaissent pas décisifs au vu notamment des contraintes induites sur les installations du cycle du combustible, incluant les réacteurs et transport. Ces conclusions restent valables aujourd'hui, avec une méfiance accrue du fait de l'expérience industrielle à l'usine Melox

dont la capacité de production a diminué pour des raisons de procédés (empoussièremement des boîtes à gants, sensibilité au procédé d'élaboration de l' UO_2 ...).

XI. Annexe III – Synthèse des projets financés par France 2030 présentés au comité

1. Le projet ISAC (Innovative System for Actinides Conversion)

Le projet ISAC vise à étudier la faisabilité d'un réacteur à sels fondus (RSF) « convertisseur d'actinides », en particulier l'américium, via la réalisation d'une étude d'esquisse (évaluation des options de conception, performance du concept, analyse de fonctionnement et de sûreté) en lui associant des premières expérimentations à petite échelle sur les principaux verrous de cette filière : la chimie des sels, le traitement/recyclage, la prévention de la corrosion appliquée aux matériaux constitutifs du circuit primaire. Des études de scénarios permettront d'intégrer cette R&D dans une approche systémique visant à évaluer l'impact final sur l'inventaire et le type de déchets à stocker selon différentes hypothèses.

L'objectif global du projet ISAC est d'augmenter la maturité de ce type de réacteur (à sels fondus chlorures, à spectre rapide) afin de passer d'un TRL de 2 à un TRL 3. Un objectif technique est de créer des moyens expérimentaux au CEA et au CNRS qui pourront être utilisés au-delà du simple projet ISAC : projets européens, futures thèses communes, collaborations internationales... Un autre objectif de ce projet est de fédérer les acteurs de la filière nucléaire française CEA, Orano, CNRS, EDF et Framatome, et de créer un réseau de jeunes chercheurs

L'étude d'un RSF convertisseur d'actinides répond à la demande des pouvoirs publics d'élargir les recherches sur les concepts de transmutation des actinides mineurs. La R&D réalisée dans le cadre de ce projet sera aussi d'intérêt pour évaluer plus largement les potentialités de la filière RSF y compris simplement pour la production d'électricité, et pour approfondir l'approche à mettre en œuvre pour conformer ce type de réacteur très particulier aux exigences de sûreté en vigueur.

2. Le projet SPATIAL

La transmutation des AM dans des réacteurs sous-critiques pilotés par accélérateur (ADS) permettrait de réduire la quantité de déchets radioactifs HA destinés au stockage en couche géologique profonde. Cependant l'utilisation des ADS impose d'en mesurer en permanence la réactivité.

Le projet SPATIAL (**S**ystème **P**iloté par **A**ccélérateur pour la **T**ransmutation et la **r**éduction des stock**A**ges **g**éo**L**ogiques), porté par le CNRS-IN2P3 et financé par la Banque publique d'investissement (BPI) dans le cadre de France 2030, vise à mettre au point une méthode fiable de mesure de la réactivité, en quantifiant le plus précisément possible les biais et incertitudes qui impacteront la mesure de réactivité d'un ADS de puissance. Le projet SPATIAL consiste à :

- Étudier très précisément les effets spatio-énergétiques qui perturbent la mesure de réactivité en réalisant des expériences inédites auprès d'une maquette d'ADS, l'installation GUINEVERE (SCK CEN, Belgique).
- Transposer les résultats précédents à un ADS de puissance chargé en AM, afin de quantifier les biais et les incertitudes sur la mesure de sa réactivité.

XII. Annexe IV - Aperçu des projets en cours sur les traitements - conditionnements alternatifs des déchets du cycle

1. Projet PREPAC (Procédés de REcupération des Platinoïdes dans l'Aval du Cycle) – CEA/CNRS

Le projet PREPAC propose de développer des procédés de récupération de matières critiques (ruthénium, technétium, molybdène, rhodium et palladium) dans les usines de traitement-recyclage des combustibles nucléaires usés avec un double objectif : 1. augmenter les marges d'opérabilité des usines de traitement et minimiser le volume de déchets associés, notamment dans le cadre du multi-recyclage du plutonium et 2. permettre la valorisation et le réemploi industriel des matières ainsi récupérées.

Les actions de R&D du projet concernent différentes étapes du procédé de traitement :

- Les premières concernent les méthodes de récupération des éléments critiques au niveau de la tête du procédé, dès l'étape de dissolution du combustible usé. Cette stratégie permettra de proposer des flux séparés de certains éléments d'intérêt tout en simplifiant le schéma global de fonctionnement de l'usine. En effet, le fait d'enlever, par exemple, le molybdène dès cette étape, permettra d'augmenter la cadence de production et de diminuer le nombre d'étapes de purification au niveau du cœur du procédé. Un principe de précipitation contrôlée du MoZr sur anode sacrificielle sera testé.
- Les secondes se focalisent sur le développement de nouvelles briques technologiques qui se combineront aux procédés actuels d'extraction-dés-extraction. Plusieurs méthodes sont évaluées soit par volatilisation (par exemple par dissolution oxydante du ruthénium), précipitation sélective (pour le palladium) ou extraction sélective liquide/liquide (pour le rhodium ou le technétium).

Ces études font appel à de la R&D fine de compréhension de la chimie de coordination des différents éléments, aux tests et au choix de molécules organiques afin de déterminer les sélectivités et les rendements. Le projet met en œuvre à différentes échelles des bancs d'essais en inactif et en actif jusqu'à la haute activité dans l'INB Atalante à Marcoule.

2. Projet EPONA (E.puration du Palladium d'Origine Nucléaire par Avlis) – CEA/Orano/Amplitude Technologie

Les produits de fission issus du traitement des CU contiennent des éléments du groupe des platinoïdes, dont du palladium. La quantité annuelle produite par les opérations de retraitement avoisine les deux tonnes. Ce flux est aujourd'hui vitrifié avec le flux principal de déchets HA, son exutoire est donc le stockage en couche géologique profonde. Le coût, la demande et la rareté du palladium justifient de s'intéresser au recyclage de cette matière qui pourrait, sous réserve de dérogation au code de santé publique, trouver un usage dans le domaine conventionnel. De plus, la limitation de sa quantité dans les effluents vitrifiés est de nature à faciliter les opérations de vitrification.

Pour envisager un retour sur le marché de ce palladium qui présente 6 isotopes, il faut l'épurer du seul isotope radioactif qu'il contient, le ^{107}Pd , radionucléide artificiel émetteur bêta de demi vie 6,5 millions d'années.

La voie « *laser atomique* » (procédé SILVA : Séparation Isotopique par Laser de Vapeur Atomique) a été retenue pour ce projet car il n'existe pas de composé du palladium compatible avec un procédé par ultracentrifugation. Par ailleurs, un procédé de type SILVA a la capacité de traiter des grandes quantités de matière dans une installation plus compacte. Le projet est porté par le CEA en raison des compétences qu'il a acquises sur le procédé SILVA lors de son développement pour l'enrichissement de l'uranium (entre autres) jusqu'en 2003. L'objectif principal du projet est la démonstration à l'échelle de quelques grammes de la faisabilité de séparation de palladium en deux flux, l'un enrichi et l'autre appauvri en ^{105}Pd (simulant du ^{107}Pd car, pour ce projet, il n'est en effet pas envisagé de travailler avec du palladium radioactif, mais seulement sur du palladium d'origine naturelle).

Un banc d'essai spécifique a été construit et la R&D porte sur la mise au point du four d'évaporation et de création de la vapeur atomique du palladium, la recherche de la meilleure séquence de photo ionisation laser qui permette l'excitation sélective de l'isotope à épurer, le développement de laser dans l'Ultraviolet (UV) (longueurs d'onde d'intérêt pour cette application) aux puissances nécessaires. Le projet prépare également la suite qui pourra être donnée après la preuve de concept puisqu'une des tâches consiste à réaliser une étude d'Avant-projet détaillé (APD) d'un pré-pilote industriel à l'échelle de quelques kilogrammes.

3. Projet REGAIN (Recyclage des **G**AInes Nucléaires) – Orano/CNRS/Framatome/CEA

Le projet REGAIN étudie une solution alternative basée sur une approche innovante et totalement en rupture visant à réduire de manière progressive la radioactivité des coques des CU (tranches de gaine sans combustible), ce qui permettrait de limiter le volume à envoyer au stockage MAVL de CIGEO. Potentiellement, ce concept original pourrait permettre de créer un cycle du zirconium nucléaire.

Les objectifs techniques sont dans un premier temps de décontaminer la surface des coques des actinides et produits de fission par une attaque en milieu sel fondu, puis dans une deuxième étape de purifier le zirconium des produits d'activation présents au sein du matériau de gainage par une réaction gaz-solide en voie chlorure.

La R&D met en œuvre plusieurs bancs d'essais ainsi que des pilotes à l'échelle de quelques kg en inactif, mais aussi en actif à l'échelle de quelques coques réelles pour les 2 étapes. Selon les facteurs de décontamination qui seront atteints, le zirconium décontaminé pourra être orienté vers une voie de recyclage, ou un stockage d'un autre type restant à déterminer.

Le projet REGAIN évalue également une solution alternative mettant en œuvre un procédé de fusion décontaminante en une seule étape (métal fondu en contact avec un laitier présentant une affinité plus grande que le métal avec les actinides, produits de fission et produits d'activation). La R&D vise ici essentiellement à identifier, à l'échelle laboratoire en inactif, un laitier adapté.

4. Projet D-CLIC (Conditionnement de déchets **Ch**Lorés, **I**odés et/ou **C**arbonatés dans des apatites phosphocalciques) – CEA/CNRS/Université de Bourgogne/CIRIMAT

Le projet D-CLIC vise à développer une méthode originale d'immobilisation de trois radionucléides à vie longue : ^{14}C , ^{36}Cl et ^{129}I qui sont des contributeurs majeurs de la dose à l'exutoire de sites de stockage en couche géologique profonde en milieu argileux accueillant des déchets radioactifs stabilisés MA-VL ou HA. L'enjeu est de recourir à une matrice de phosphate de calcium à structure apatitique, minéral dont les propriétés remarquables de durabilité sont bien établies, en évitant les écueils des solutions explorées par le passé (verres de phosphate d'argent, apatites vanado-plombeuse) qui recourent à des métaux nobles ou à forte valeur ajoutée tels que l'argent ou à des métaux toxiques comme le plomb. Le projet D-CLIC vise également au développement d'une matrice flexible, pouvant accueillir ces radionucléides seuls ou en mélange.

L'approche explorée est celle de l'incorporation des anions iodate, chlorure et/ou carbonate au sein d'apatites phosphocalciques. Le premier objectif sera de comparer deux voies d'élaboration de ce matériau : 1. une voie dite par céramisation, consistant à former les phases apatitiques par précipitation, puis à mettre en forme les poudres obtenues par frittage à basse température et 2. une voie dite par cimentation, dans laquelle la solution contenant les anions à insolubiliser constituera la solution de gâchage d'un ciment apatitique dont les réactifs seront à déterminer.

Le deuxième objectif est de réduire la surface d'échange des matériaux élaborés pour limiter le terme source de relâchement (l'eau d'un futur site de stockage en couche géologique profonde). Dans le cas de la voie par céramisation, une optimisation du cycle de frittage sera recherchée, incluant une adaptation des vitesses de chauffe et de refroidissement pour éviter le piégeage de gaz consécutif à la déshydratation du matériau. Dans le cas de la voie par cimentation, on évaluera l'intérêt d'une mise en forme par vibro-compaction pour réduire la porosité des matériaux obtenus.

Enfin, le troisième objectif est enfin une première évaluation des performances de durabilité des matériaux obtenus en considérant des environnements d'altération variables (eau pure et milieu aérobie pour se

confronter à la littérature existante ou conditions correspondant à un milieu argileux en conditions anoxiques et en ambiance réductrice, qui pourraient être rencontrées dans un site de stockage à long terme).

1. Le développement prospectif de solutions alternatives aux composants métalliques de l'alvéole HA (Andra)

Contexte

Le projet Cigéo sera développé progressivement sur, *a minima*, une centaine d'années, offrant la possibilité aux générations futures d'intégrer des évolutions de conception rendues notamment possibles par les progrès scientifiques et techniques et le retour d'expérience du fonctionnement de l'INB Cigéo, dans le respect de l'atteinte des objectifs de sûreté en exploitation et en après-fermeture.

Le développement par l'Andra de solutions innovantes concernant l'alvéole HA s'inscrit dans cette démarche prospective, certes à un horizon de temps de 2080, date prévisionnelle de prise en charge des déchets HA du quartier HA1/2, mais permettant d'ores et déjà de tracer des perspectives. Dans cette optique, l'Andra a initié des travaux visant à démontrer la faisabilité scientifique et technique de développer certains composants des alvéoles HA de Cigéo avec des matériaux non métalliques en remplacement des aciers bas carbone retenus actuellement en référence. Il s'agit du conteneur de stockage HA et du chemisage de l'alvéole HA. L'objectif afférent est de contribuer à limiter la production de dihydrogène (induite par la corrosion anoxique des aciers) en après-fermeture afin d'accroître la robustesse de la démonstration de sûreté en après-fermeture vis-à-vis de la fonction de préservation des propriétés favorables du Callovo-Oxfordien.

Différentes approches, avec des TRL compris entre 2 pour le conteneur et 4 pour le chemisage, sont en cours d'évaluation ou d'étude. Elles sont basées sur l'utilisation de céramiques techniques essentiellement de type oxyde, sous forme monolithique ou de composites. Les travaux engagés ou à venir couvrent à la fois la formulation du matériau, sa caractérisation, sa durabilité (définie par sa résistance au chargement mécanique couplé au vieillissement) mais aussi la faisabilité de ces composants de grandes dimensions.

Les céramiques pour les conteneurs de stockage HA

Deux verrous scientifiques et techniques majeurs sont à considérer pour atteindre l'exigence d'étanchéité à l'eau d'un conteneur en céramique durant la phase où l'activité radiologique (et donc la température) est la plus importante, soit 500 ans pour les déchets destinés au quartier de stockage HA. Ces deux verrous sont : (i) la fabrication d'un conteneur en céramique résistant au chargement mécanique imposé par la convergence du milieu couplé au vieillissement induit par le contact avec l'eau porale et (ii) le scellement du corps avec le couvercle du conteneur.

S'agissant de la fabrication du conteneur HA, la nécessité de réaliser des pièces en céramique de très grande épaisseur, de l'ordre de 4 à 6 cm suivant le matériau, constitue un réel défi technique. L'épaisseur peut néanmoins être réduite en optimisant la résistance mécanique du matériau fritté. La réalisation de cet objectif passe par une optimisation de la microstructure et de la composition de la céramique, mais également par l'ajustement et le contrôle des paramètres d'élaboration. Cette démarche s'est concrétisée en 2023 par la fabrication d'un premier prototype en alumine pure (échelle 1/6, soit 30 cm de long et épaisseur 1/2, soit 2 cm) en 2023.

Afin de réaliser un scellement effectif et étanche, il a été montré que la fusion d'un matériau d'apport était la voie la plus pertinente. Deux axes de développement découlent alors de cette assertion : (i) celui d'un matériau d'apport aux propriétés adaptées (coefficient de dilatation, point de fusion, propriétés mécaniques...) et (ii) celui d'une méthode de chauffage efficace et n'induisant pas d'altération de la matrice vitreuse confinant les déchets ; à cet égard, le chauffage résistif ou par micro-ondes apparaissent prometteurs.

Chacun des deux aspects décrits ci-dessus nécessite une poursuite des études engagées afin d'optimiser les matériaux et procédés et de qualifier l'ensemble, en termes de durabilité pour les premiers et de viabilité technique pour les seconds, afin d'atteindre un TRL 6 à l'horizon 2030.

Les Composites à Matrice Céramique pour le chemisage de l'alvéole HA

Des modélisations mécaniques ont montré que la tenue de ce composant réalisé en Composite à Matrice Céramique (CMC) seul n'était pas assurée avec les conditions de chargement (notamment anisotropes) prévues dans l'alvéole HA. Ainsi, une alternative a été développée. Il s'agit d'une structure en sandwich comportant une âme (cylindre creux) en céramique monolithique drapée, à l'intrados et à l'extrados, de CMC. Cette architecture utilise l'effet clé de voute *via* l'âme monolithique et s'affranchit de la fragilité intrinsèque de cette dernière grâce aux CMC qui reprennent les efforts de traction auxquels sont sensibles les céramiques.

Les architectures étudiées sont de deux types, partageant une même âme en alumine, mais différant par la nature des renforts du CMC, fibres d'oxyde ou fibres de carbone. Deux prototypes à l'échelle 1/5 ont ainsi été réalisés en 2022. Des essais de chargement confiné et d'écrasement ont permis de montrer que l'intégrité mécanique des assemblages, des deux types, est maintenue, ce qui satisfait l'exigence afférente à ce composant liée à la récupérabilité des colis de stockage durant une période séculaire. Une étude systématique de l'influence de défauts de fabrication doit être conduite afin de définitivement qualifier ces composants en termes de résistance mécanique. La durabilité et notamment la résistance à la corrosion par l'eau porale du milieu géologique reste aussi à évaluer et valider si elle permet au composant d'atteindre les exigences requises. A cette fin, deux dispositifs d'essais (en statique et en dynamique) viennent d'être conçus. Ces travaux devraient permettre afin d'atteindre un TRL 5 d'ici 2026-2027.

XIII. Annexe V – Synthèse des présentations sur l'entreposage

1. Conclusions du débat public 2005 sur la gestion des déchets HA / MA-VL

Dans le cadre du débat public de 2005, la préférence exprimée par les participants au débat pour l'entreposage des déchets HA, plutôt que leur stockage en couche géologique profonde, trouvait son fondement dans la défiance envers les institutions et les élites, la peur de la radioactivité et l'attachement au territoire. L'alternative alors présentée s'articulait autour de la réversibilité. Ceci a conduit le public à défendre l'entreposage comme l'étalon de la réversibilité puisque la surveillance et la reprise des colis y sont possibles en tant que de besoin. Dès lors, l'ELD a laissé la place dans les débats à l'entreposage dit « pérennisé ». Cette stratégie, basée sur le principe de précaution, permet de faire progresser concomitamment les essais sur le stockage en couche géologique profonde et l'expérimentation d'un entreposage pérennisé ; la décision quant à la gestion des déchets pouvant alors être prise après l'approfondissement, pendant une durée de l'ordre de 15 ans, des deux options.

En 2006, la loi sur la gestion des déchets [4] n'a pas suivi ces conclusions du débat public de 2005. Néanmoins, l'établissement d'un rapport sur la réversibilité et la tenue d'un nouveau débat public, lequel s'est tenu en 2013, ont été initiés.

Par la suite, différents rapports ont mis en évidence le fait que la réversibilité crée plus de peurs qu'elle n'en résout puis, un nouveau débat public relatif au PNGMDR mené de 2019 à 2021 a conclu à la nécessité d'une étude sur les alternatives.

A ce jour, trois constats peuvent être dressés :

- la comparaison de Cigéo à des solutions alternatives qui soient en résonance avec la psychologie collective du public s'est imposée. Cette comparaison pourrait durer le temps de la phase pilote ;
- l'entreposage pérennisé n'est plus d'actualité mais l'implication de la société pendant au moins quelques siècles paraît incontournable ;
- la défiance reste présente.

Une nouvelle proposition consisterait à étudier une « variante » (et non une « solution alternative ») répondant progressivement à la défiance : gérer la réversibilité pendant deux à trois siècles en entreposage puis stocker les colis en couche géologique pour les millénaires suivants. Pendant l'entreposage, il conviendrait de fiabiliser les colis et d'accroître la longévité du colisage avec un programme de recherche approprié (étude industrielle, ESE et recherche scientifique).

2. Enjeux liés à l'entreposage de longue durée

Un entreposage de colis contenant des matières ou des déchets radioactifs est une installation temporaire. Elle est soumise à la réglementation des INB, qui impose des exigences spécifiques en matière de traçabilité, de surveillance et de possibilité de reprise des colis à tout moment, outre les exigences générales de sûreté et de radioprotection. En tout état de cause, les colis sont destinés à être repris pour un nouvel entreposage ou un stockage définitif. Lorsque la durée d'entreposage envisagée est très longue (plusieurs centaines d'années comme cela a pu être étudié par le passé), des aspects cruciaux tels qu'une conception adaptée, la surveillance, la maintenance et la gestion du vieillissement prennent une importance particulière.

Un ELD nécessite des conceptions simples et robustes, distinctes de celles des autres types d'installations. Celles-ci visent à intégrer les problématiques liées au vieillissement, qui s'amplifient avec le temps, ainsi que l'apparition de phénomènes non anticipés ou l'obsolescence de matériels. Ces conceptions doivent garantir des marges de sûreté suffisantes tout au long de la durée de vie de l'installation, tout en intégrant la possibilité d'évacuer les colis. À cet effet, il est important de prévoir la possibilité de remplacer ou de réparer les éléments de l'installation ou les colis. Cela peut nécessiter de prévoir des espaces réservés pour entreposer temporairement une partie des colis.

Les marges de sûreté doivent également permettre à l'installation de s'adapter aux changements dans les risques à prendre en compte dans l'analyse de sûreté (changement climatique, évolution des connaissances ou des risques d'origine anthropique...).

Il est également essentiel d'anticiper le maintien des moyens supports de l'installation (fournisseurs matériels et utilités, laboratoires, logistique, gestion déchets et effluents ...), indispensables à son exploitation, sa maintenance et sa surveillance. À cet égard, les différentes phases d'exploitation (remplissage, entreposage, désentreposage, cessation d'activité) présentent chacune des enjeux, des exigences et des équipements spécifiques, dont certains sont directement liés à de futures opérations. Le maintien et la surveillance de ces équipements tout au long de l'exploitation sont importants, nécessitant des moyens particuliers et des opérations d'exploitation régulières.

Enfin, l'état des colis, qui constituent une barrière de confinement lors de l'entreposage ainsi que lors des opérations de reprise ou de futur entreposage ou stockage, doit faire l'objet d'une surveillance rigoureuse.

Il est également primordial de prendre en compte des scénarios d'abandon de l'exploitation, qu'ils soient temporaires ou plus prolongés, afin de garantir la résilience de l'installation sur une période aussi longue.

3. Evaluation socio-économique de Cigéo

L'ESE de Cigéo vise à comparer le stockage en couche géologique profonde, incluant la phase pilote, à un ELD renouvelé tous les 100 ans.

Les variables de l'ESE sont :

- l'état de la société : prospère avec des institutions fortes (OK) ou en décroissance avec des institutions dégradées (KO) ;
- le taux d'actualisation ;
- les coûts.

Les options étudiées sont :

- la réalisation du projet Cigéo tel que prévu par l'Andra ;
- la réalisation d'une première phase durant laquelle seuls les déchets MA-VL sont stockés ; en parallèle les recherches pour trouver une autre solution pour les déchets HA (transmutation par exemple) se poursuivent. En 2070, soit les recherches sont fructueuses et on retient la solution trouvée, soit elles sont infructueuses et l'on décide de stocker les déchets HA dans Cigéo ;
- la construction de Cigéo débute mais aucun déchet n'est stocké ; en parallèle les recherches pour trouver d'autres solutions (*deep borehole* et/ou transmutation) se poursuivent. En 2070, plusieurs possibilités se présentent en fonction des résultats des recherches ;
- report à 2070 de la décision de réaliser les premiers investissements dans Cigéo : en parallèle des recherches sont menées. Cette option entraîne un risque de perdre le site du fait de la versatilité des opinions locales. Une variante est d'attendre et de transmettre le problème de la gestion de ces déchets aux générations futures.

L'option 1 (Cigéo) est préférable dans 4 cas sur 6 (scénario d'une société KO avec des taux d'actualisation bas, intermédiaire et élevé et scénario d'une société OK avec un taux d'actualisation bas). L'option 4 (ELD) est préférable dans 2 cas sur 6 (scénario d'une société OK avec un taux d'actualisation intermédiaire ou élevé).

Néanmoins, ces options ne sont pas comparables en termes de service rendu à la société. La raison d'être de Cigéo tient à sa capacité à protéger de façon passive les générations futures c'est-à-dire sans intervention humaine et donc à l'abri des évolutions de la société quelles qu'elles soient par exemple en cas de décroissance économique et de société dégradée. A cela s'ajoute une considération morale : c'est la génération actuelle qui a profité de l'énergie nucléaire produite par le parc actuel, c'est donc à elle de gérer ses déchets, même si demain des progrès techniques sont possibles pour se débarrasser de façon efficace de ces déchets. D'autant que les générations futures auront aussi d'autres soucis majeurs à gérer (accidents graves liés au réchauffement climatique par exemple).

Quelle prime d'assurance la société est-elle prête à payer pour avoir la garantie que la solution retenue sera la moins risquée ? Le bénéfice assurantiel varie en fonction du taux d'actualisation et de la probabilité de survenue du scénario KO. Les calculs menés montrent que cette prime, à payer en une fois, est de l'ordre de 8 milliards d'euros soit, 120 euros par Français. En d'autres termes, *si la disposition à payer de chaque Français est au moins égale à 120 euros, la solution Cigéo est la bonne solution*. L'ELD l'emporte uniquement si l'on est optimiste pour le futur et la société ou si l'on prête peu d'attention aux générations futures.

4. *Présentation de l'avis du 1^{er} février 2006 sur les recherches relatives à la gestion des déchets HA menées dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991 [2]*

L'avis de l'ASN du 1^{er} février 2006 s'est appuyé sur les résultats des 15 ans de travaux et de recherches menés par le CEA et l'Andra sur la gestion des déchets radioactifs HAVL conformément à la loi du 30 décembre 1991 [2].

Dans son avis, l'ASN évaluait les trois axes de recherche définis par cette loi [2] :

- séparation et transmutation : L'ASN a estimé que la faisabilité technologique de cette option n'était pas encore prouvée et qu'elle ne permettrait pas d'éliminer totalement les déchets HA. De plus, l'application industrielle n'était pas envisageable avant 2040, et cette méthode générerait toujours des déchets radioactifs résiduels pour lequel une filière de gestion demeure à trouver. L'ASN estimait donc qu'une autre solution de référence était nécessaire ;
- conditionnement et ELD : L'ASN a considéré que l'entreposage ne constituait qu'une solution temporaire, notamment nécessaire pour permettre le refroidissement des déchets avant leur stockage définitif. L'ASN a indiqué que l'ELD ne constituait pas une solution définitive car il suppose le maintien d'un contrôle de la part de la société et leur reprise par les générations futures, ce qui semble difficile à garantir sur des périodes de plusieurs centaines d'années ;
- stockage en couche géologique profonde : L'ASN a considéré le stockage en couche géologique profonde comme une solution de gestion définitive apparaissant incontournable. Les études menées par l'Andra sur la formation géologique de Bure confirment la faisabilité de ce type de stockage.

Concernant la réversibilité, l'ASN considérait, sur le plan des principes, que la réversibilité ne pouvait avoir qu'une durée limitée. En effet, l'accessibilité aisée aux colis de déchets doit être limitée dans le temps car une fermeture du stockage trop longtemps différée pourrait remettre en cause la notion et, peut-être même à long terme, la sûreté du stockage qui est basée sur la capacité de la roche hôte à confiner la radioactivité contenue dans les déchets sur de longues périodes de temps.

L'avis du 1^{er} février 2006 a été rendu en vue d'éclairer les parlementaires dans la préparation de la loi relative à la gestion des déchets du 28 juin 2006 [4] et tous les ans, l'ASN émet une mise à jour sur le sujet dans son rapport annuel.

XIV. Glossaire

ADS : Accelerator driven system (réacteur nucléaire piloté par un accélérateur de particules)

AEN : Agence pour l'énergie nucléaire

AM : Actinide mineur

AMR : Advanced modular reactor (réacteur modulaire avancé)

ANCCLI : Association nationale des comités et commissions locales d'information

Andra : Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs

APD : Avant-projet détaillé

ASN : Autorité de sûreté nucléaire

ASNR : Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection

ASTRA : Alternative radioactive waste management strategies (stratégies alternatives de gestion des déchets radioactifs)

AVLIS : Atomic vapor laser isotope separation (séparation isotopique par laser sur vapeur atomique ou SILVA)

BPI : Banque publique d'investissement

CEA : Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

CLIS : Comité local d'information et de suivi

CNE2 : Commission nationale d'évaluation

CNRS : Centre national de la recherche scientifique

CoRWM : Committee on radioactive waste management

CU : Combustible usé

DAC : Demande / Décret d'autorisation de création

D-CLIC : Conditionnement de déchets chlorés, iodés et/ou carbonatés dans des apatites phosphocalciques

DOE : United states Department of energy (Département de l'énergie américain)

ELD : Entreposage de longue durée

EPONA : Epuration du palladium d'origine nucléaire par AVLIS

EPR : European pressurized reactor (réacteur pressurisé européen)

ESE : Evaluation socio-économique

EURAD2 : European joint programme on radioactive waste management (programme commun européen sur la gestion des déchets radioactifs)

FNE : France nature environnement

GIP : Groupement d'intérêt public

HA : Haute activité

IEMPT : Information exchange meeting on actinide and fission product partitioning and transmutation (Réunion d'échange d'information sur la séparation et la transmutation des actinides et des produits de fission)

INB : Installation nucléaire de base

INP3 : Institut national de physique nucléaire et de physique des particules

IRSN : Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire

ISAC : Innovative system for actinides conversion (système innovant pour la conversion des actinides)

MA-VL : Moyenne activité à vie longue

MMSNR : Mission de la sûreté nucléaire et de la radioprotection

PF : Produit de fission

Phipil : Phase industrielle pilote

PNC France : Patrimoine nucléaire et climat

PNGMDR : Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs

PREPAC : Procédés de récupération des platinoïdes dans l'aval du Cycle

REGAIN : Recyclage des gaines nucléaires

REP : Réacteur à eau pressurisée

R&D : Recherche et développement

RNR : Réacteur à neutrons rapides

RSF : Réacteur à sels fondus

SCK CEN : Studiecentrum voor kernenergie ou Centre d'étude de l'énergie nucléaire

SILVA : Séparation isotopique par laser sur vapeur atomique

SLC : Sauvons le climat

SPATIAL : Système piloté par accélérateur pour la transmutation et la réduction des stockages géologiques

SMR : Small modular reactor (petit réacteur modulaire)

tML : tonne de métal lourd

TRL : Technology readiness level (niveau de maturité d'une technologie)

UV : Ultraviolet

WP : Work package