

COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION

DES RECHERCHES ET ÉTUDES RELATIVES
À LA GESTION DES MATIÈRES ET DES DÉCHETS RADIOACTIFS

Instituée par la Loi n° 2006-739 du 28 juin 2006

RAPPORT D'ÉVALUATION N° 14

Juin 2020

COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION
DES RECHERCHES ET ÉTUDES RELATIVES
À LA GESTION DES MATIÈRES ET DES DÉCHETS RADIOACTIFS

Instituée par la Loi n°2006-739 du 28 juin 2006

RAPPORT D'ÉVALUATION N° 14

JUIN 2020

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|-----------|
| AVANT-PROPOS | 5 |
| RESUME - CONCLUSION | 7 |
| INTRODUCTION | 11 |
| CHAPITRE I : IMPACTS DE LA PPE ET CYCLE DU COMBUSTIBLE | 13 |
| 1.1 LES NOUVELLES DISPOSITIONS INTRODUITES PAR LA PPE..... | 13 |
| 1.2 LES IMPACTS SUR LES RECHERCHES RELATIVES AUX REACTEURS..... | 14 |
| 1.2.1 <i>Moxage des réacteurs de 1300 MWe</i> | 14 |
| 1.2.2 <i>Adaptation des EPR2 au multi-recyclage</i> | 14 |
| 1.2.3 <i>Les recherches relatives aux RNR</i> | 15 |
| 1.2.4 <i>Le maintien des compétences pour la gestion du parc</i> | 17 |
| 1.2.5 <i>Le programme Nuward</i> | 17 |
| 1.3 LES RECHERCHES ET TRAVAUX RELATIFS AUX COMBUSTIBLES ET AUX MATIERES | 18 |
| 1.3.1 <i>Le combustible URE</i> | 18 |
| 1.3.2 <i>Le combustible MOX et les combustibles destinés au multi-recyclage</i> | 18 |
| 1.3.3 <i>L'impact sur les usines du cycle et leur renouvellement vers 2040-2050</i> | 19 |
| 1.3.4 <i>L'impact sur les besoins en entreposage</i> | 20 |
| 1.4 LES RECHERCHES ET TRAVAUX RELATIFS AUX DECHETS HA | 22 |
| 1.4.1 <i>L'impact sur les inventaires</i> | 22 |
| 1.4.2 <i>Les travaux sur la séparation et la transmutation</i> | 22 |
| 1.5 CONCLUSION | 23 |
| CHAPITRE II : ASSAINISSEMENT – DEMANTELEMENT ET DECHETS TFA | 25 |
| 2.1 DES TECHNIQUES MAITRISEES MAIS DES MOYENS LIMITES | 25 |
| 2.1.1 <i>Une réelle maîtrise technique</i> | 25 |
| 2.1.2 <i>Des moyens limités</i> | 26 |
| 2.2 LE TRAITEMENT DES DECHETS ISSUS DES OPERATIONS D'ASSAINISSEMENT ET DEMANTELEMENT | 26 |
| 2.2.1 <i>Des estimations de volumes de déchets à parfaire</i> | 26 |
| 2.2.2 <i>La réduction des volumes de déchets nucléaires issus des opérations d'assainissement</i> <i>démantèlement</i> | 27 |
| 2.2.3 <i>L'augmentation des capacités de stockage des déchets TFA</i> | 27 |
| 2.2.4 <i>Les études relatives au recyclage des déchets TFA métalliques</i> | 28 |
| 2.3 CONCLUSION | 29 |
| CHAPITRE III : LA GESTION DES DECHETS FAVL | 31 |
| 3.1 LES DECHETS CONCERNES | 31 |
| 3.2 CONTEXTE REGLEMENTAIRE ACTUEL | 32 |
| 3.3 L'APPROCHE GENERALE DE SURETE | 32 |
| 3.4 LES ETUDES PREALABLES AU STOCKAGE..... | 33 |
| 3.5 CONCLUSION SUR LES ACQUIS DE L'ANDRA | 34 |

| | |
|---|-----------|
| CHAPITRE IV : CIGÉO | 35 |
| 4.1 LES GRANDS JALONS DU PROJET EN 2020 | 36 |
| 4.1.1 <i>La déclaration d'utilité publique</i> | 36 |
| 4.1.2 <i>La demande d'autorisation de création</i> | 37 |
| 4.2 GOUVERNANCE | 38 |
| 4.3 ASPECTS SOCIO-ECONOMIQUES | 39 |
| 4.3.1 <i>Coûts et étude socio-économique</i> | 39 |
| 4.3.2 <i>Organisation industrielle</i> | 40 |
| 4.3.3 <i>Impact sur l'environnement et surveillance</i> | 41 |
| 4.4 INVENTAIRES ET REVERSIBILITE | 41 |
| 4.4.1 <i>Réversibilité</i> | 42 |
| 4.4.2 <i>Inventaire de référence et de réserve</i> | 42 |
| 4.5 ENROBES BITUMES | 43 |
| 4.6 LES AVANCEES TECHNIQUES EN VUE DU DEPOT DE LA DAC | 46 |
| 4.6.1 <i>Structuration et capitalisation des connaissances</i> | 46 |
| 4.6.2 <i>Avancées scientifiques et techniques</i> | 46 |
| 4.7 CONCLUSION | 49 |
| CHAPITRE V : PANORAMA INTERNATIONAL CONCERNANT LES OPTIONS D'ENTREPOSAGE ET DE STOCKAGE FAVL..... | 51 |
| 5.1 L'ENTREPOSAGE ET SA DUREE D'EXPLOITATION | 51 |
| 5.2 LES DIFFERENTES APPROCHES INTERNATIONALES | 52 |
| 5.2.1 <i>Les besoins et leur évolution prévisible</i> | 52 |
| 5.2.2 <i>Les pays ayant une stratégie de gestion de l'aval du cycle déjà mise en œuvre</i> | 52 |
| 5.2.3 <i>Les pays ayant une stratégie de gestion de l'aval du cycle différée</i> | 53 |
| 5.2.4 <i>Les pays n'ayant pas encore adopté une stratégie de gestion de l'aval du cycle</i> | 53 |
| 5.3 LES ENJEUX LIES A L'ENTREPOSAGE DE LONGUE DUREE | 54 |
| 5.3.1 <i>Les enjeux réglementaires</i> | 54 |
| 5.3.2 <i>Les enjeux techniques de l'entreposage à sec</i> | 55 |
| 5.3.3 <i>Les enjeux techniques de l'entreposage sous eau</i> | 55 |
| 5.3.4 <i>Les enjeux organisationnels</i> | 56 |
| 5.3.5 <i>Les enjeux financiers</i> | 56 |
| 5.3.6 <i>Les enjeux de société</i> | 56 |
| 5.4 LES ENSEIGNEMENTS POUR L'ENTREPOSAGE EN FRANCE | 57 |
| 5.5 QUELQUES EXEMPLES DE GESTION DES FAVL DANS LE MONDE | 58 |
| 5.5.1 <i>Suède</i> | 58 |
| 5.5.2 <i>Allemagne</i> | 59 |
| 5.5.3 <i>Finlande</i> | 60 |
| 5.6 CONCLUSIONS SUR LA GESTION DES FAVL | 60 |
| ANNEXE I : COMPOSITION DE LA COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION..... | 61 |
| ANNEXE II : ACTIVITÉ DE LA COMMISSION | 63 |
| ANNEXE III : PRÉSENTATIONS ET VISITES DE LA COMMISSION | 65 |
| ANNEXE IV : AUDITIONS REALISÉES PAR LA COMMISSION | 67 |
| ANNEXE V : LISTE DES PERSONNES AUDITIONNÉES PAR LA COMMISSION | 69 |
| ANNEXE VI : LISTE DES DOCUMENTS TRANSMIS À LA COMMISSION EN 2019-2020 | 71 |
| ANNEXE VII : PPE ET ORIENTATION DE LA R&D DANS LE NUCLÉAIRE | 73 |
| ANNEXE VIII : NOTE D'INFORMATION AU PARLEMENT SUR LE RAPPORT FINAL DE LA REVUE EXTERNE SUR LA GESTION DES DÉCHETS BITUMÉS (NOVEMBRE 2019)..... | 83 |
| ANNEXE IX : CORROSION ACCÉLÉRÉE DES VERRES DANS CERTAINES SITUATIONS | 89 |

AVANT-PROPOS

La préparation de ce 14^{ème} rapport de la CNE a été menée dans le contexte très particulier de la crise sanitaire que nous avons connue en France. Habituellement, la mise en commun des propositions de rédaction du rapport est réalisée lors de deux séminaires résidentiels au printemps. Ces rencontres n'ont pas pu avoir lieu, mais un travail intense a été réalisé par vidéoconférences.

Le renouvellement tardif de la Commission a créé une difficulté supplémentaire. La composition de la Commission qui a assisté aux auditions en 2019-2020 a évolué en cours d'année et tous les membres (ancienne et nouvelle Commissions) ayant assisté aux auditions ont contribué à notre rapport annuel.

Le contenu de ce rapport reste donc le fruit d'un travail collectif et il a reçu l'approbation de tous les membres de la Commission.

Pendant la rédaction du rapport, les membres de la CNE n'ont pas manqué de s'interroger sur les conséquences de la période de confinement du printemps 2020. Même si les études et recherches sur les matières et déchets radioactifs se déroulent sur un temps long, il est probable que cette période particulière aura un impact à court terme sur les plannings d'activité des acteurs de la Loi. La Commission a observé maintes fois par le passé que ces plannings avaient une tendance naturelle à s'allonger.

La Commission demande à tous les acteurs de la Loi de lui présenter, dès la reprise de ses auditions en septembre 2020, les dispositions qu'ils ont prises ou entendent prendre pour minimiser l'impact de la pandémie. Elle souhaite que lui soit présentées une mise à jour des différents plannings des activités et procédures administratives d'instruction des projets, dont Cigéo.

Avec la crise sanitaire vient le temps aujourd'hui d'une crise économique et sociale. S'agissant des études et recherches sur la gestion des matières et des déchets radioactifs, le déploiement de la PPE demandera probablement une clarification des options stratégiques en matière de politique énergétique.

La Commission rappelle qu'il appartient à notre génération, qui a bénéficié de l'énergie électronucléaire, de prévoir les modalités de gestion des matières et des déchets nucléaires. Les projets et les recherches qui s'y rattachent doivent rester prioritaires malgré la prévision d'un contexte économique difficile.

En tout état de cause, la Commission considère que le projet de stockage géologique Cigéo est suffisamment mature pour qu'une demande d'autorisation de création puisse être déposée dans un avenir proche. La Commission souligne que les travaux relatifs au stockage des déchets FAVL demandent une impulsion forte et immédiate ; elle note aussi que l'extension des capacités d'entreposage est une nécessité pour mettre en œuvre la PPE et préparer le démantèlement des installations.

RESUME - CONCLUSION

Ce 14^{ème} rapport de la CNE a été rédigé dans le contexte de la crise sanitaire due à l'épidémie de SARS-Cov-2. Il est probable que cette crise aura des conséquences à court et moyen terme sur les calendriers d'activité des acteurs de la Loi. La Commission leur demande de lui présenter, dès la reprise de ses auditions en septembre 2020, ces conséquences et les dispositions qu'ils ont prises ou entendent prendre.

Selon les dispositions de la loi de 2006, la gestion à long terme des déchets radioactifs comporte trois volets complémentaires : l'entreposage industriel des déchets n'ayant pas encore d'exutoire ou des matières en attente de valorisation, le stockage des déchets ultimes et la séparation – transmutation des éléments radioactifs à vie longue. Ce rapport évalue, à la date du 15 mars 2020, l'état d'avancement des études et recherches sur ces sujets, à la lumière des orientations fixées aujourd'hui par la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE).

IMPACTS DE LA PPE ET CYCLE DU COMBUSTIBLE

Plusieurs dispositions de la PPE modifient profondément l'aval du cycle du combustible, le cycle des matières et les études et recherches qui s'y rattachent.

Les réacteurs à neutrons rapides (RNR) doivent permettre de valoriser le stock de plutonium issu du retraitement du combustible usé du parc nucléaire actuel, de fermer le cycle du combustible, et de réaliser partiellement la transmutation des actinides mineurs présents dans les déchets afin de réduire leur inventaire et leur radiotoxicité. La Commission prend note des nouvelles orientations de la PPE sur les RNR : l'arrêt du programme Astrid et le redémarrage des projets de RNR au mieux dans 30 ans.

La définition d'un programme ambitieux à l'échelle nationale est indispensable pour relever les défis scientifiques et technologiques en cohérence avec la fermeture du cycle et éviter la perte de compétences en transmettant un savoir-faire internationalement reconnu à la prochaine génération de scientifiques et d'ingénieurs. La Commission considère que le programme proposé par le CEA est trop modeste pour répondre à ces objectifs. Les possibilités de coopération internationale sont limitées. Les études envisagées dépendent de l'emploi d'un RNR russe sans qu'il existe de projet en parallèle pour s'en affranchir si besoin. Ce dernier constat souligne l'intérêt de disposer d'une installation d'irradiation avec des neutrons rapides, *a minima* au niveau européen. La Commission rappelle que les études et recherches sur la séparation et la transmutation sont intimement liées à celles sur les RNR puisqu'elles nécessitent des outils similaires. Ces recherches seront drastiquement ralenties avec l'arrêt du projet Astrid.

La diminution de la part de l'électricité nucléaire prévue par la PPE entraînera la fermeture de 12 réacteurs parmi les 24 unités de 900 MWe en fonctionnement aujourd'hui. Or, ces réacteurs sont les seuls autorisés aujourd'hui à utiliser du combustible MOX. EDF envisage donc de qualifier l'utilisation du MOX dans les réacteurs de 1300 MWe pour compenser cette fermeture et poursuivre le mono-recyclage. La Commission recommande de ne pas sous-estimer le travail nécessaire à l'adaptation de ces réacteurs au moxage et à l'obtention des autorisations requises.

Pour limiter l'accumulation du combustible usé contenant du plutonium, et dans l'attente d'un éventuel parc de RNR, la PPE prévoit que des études seront conduites en vue du déploiement du multi-recyclage du plutonium en réacteur à eau pressurisée (REP) à l'horizon 2040. A cette fin, des tests de combustibles prototypes en réacteur sont prévus vers 2028. Toutefois le multi-

recyclage en REP devra faire appel à des réacteurs d'un parc EPR2 dont la réalisation n'est pas décidée à ce jour. De plus, cette stratégie requiert la conception de nouvelles installations de fabrication et de retraitement du combustible et nécessite des investissements lourds.

Compte tenu du report à la fin du siècle des projets de RNR, et donc de l'objectif de fermeture du cycle, il faudra inévitablement entreposer une plus grande quantité du combustible usé avant traitement et recyclage. La Commission observe qu'une saturation des capacités d'entreposage se profile au tout début des années 2030. Elle est préoccupée par les marges, probablement insuffisantes, du calendrier de réalisation des opérations programmées pour faire face à cette difficulté.

Les nombreux projets envisagés tels que le moxage des réacteurs existants, le multi-recyclage en REP, le développement de nouveaux réacteurs, la fabrication de nouveaux combustibles et le traitement des combustibles usés présentent une grande interdépendance. La Commission constate que les programmes et les calendriers qui lui ont été présentés sont encore au stade d'ébauche. Elle demande que des éléments plus tangibles lui soient présentés lors des auditions de l'exercice 2020-2021 et que les moyens nécessaires soient précisés.

ASSAINISSEMENT ET DEMANTÈLEMENT

La Commission exprime sa préoccupation devant le report ou l'allongement continu, sous contrainte budgétaire, de la durée des opérations complètes de démantèlement et l'incidence inévitable de cet allongement sur les coûts de maintien en sûreté des installations, notamment. Le démantèlement générera la majorité des déchets TFA à stocker. La Commission recommande que la chronique prévisionnelle de production des TFA soit mise à jour pour prendre en compte le calendrier d'arrêt des réacteurs REP envisagé par la PPE. Elle encourage vivement la poursuite des études visant la réduction du volume des TFA et leur décontamination en vue d'un recyclage éventuel.

8

DÉCHETS FAVL

Les déchets FAVL sont divers et classés aujourd'hui par grandes familles. Chaque famille de déchets devrait bénéficier de modalités de stockage spécifiques tenant compte de leurs natures et compositions radiologiques et chimiques. Leur volume total pourrait atteindre 250 000 m³. L'Andra a lancé dès 2008 une recherche de sites favorables pour y implanter un stockage de déchets FAVL (graphites et radifères) qui n'a pas encore abouti. La Commission encourage l'Andra à poursuivre son effort et à réaliser les études nécessaires à l'identification d'un ou plusieurs sites. Elle recommande également aux acteurs institutionnels concernés de mettre en place la concertation indispensable pour faire face aux multiples enjeux, parfois contradictoires.

La Commission souligne l'urgence de la mise en place d'une gestion satisfaisante des FAVL et demande que lui soit présenté l'an prochain un état détaillé des progrès obtenus depuis 2018.

CIGÉO

L'Andra a annoncé le dépôt, au printemps 2020, du dossier en vue de l'instruction de la déclaration d'utilité publique de Cigéo (DUP). Le calendrier général du projet prévoit un dépôt du dossier de demande d'autorisation de création (DAC) fin 2020, une enquête publique courant 2023, un décret d'autorisation de création en 2025, et la descente du premier colis actif entre 2035 et 2040. Depuis plusieurs années, la date de dépôt du dossier de DAC est régulièrement repoussée et la Commission recommande que ce calendrier soit mieux maîtrisé.

Des avancées substantielles ont été réalisées dans la conception de Cigéo afin de répondre aux avis exprimés lors de l'instruction du dossier d'options de sûreté (DOS).

La Commission considère que l'Andra a atteint un niveau de maturité scientifique et technique suffisant pour lui permettre de déposer rapidement une DAC. A cette fin, la Commission recommande de définir dès maintenant une configuration de référence, fondée sur les connaissances scientifiques et les capacités technologiques du moment, en cohérence avec l'inventaire de référence des déchets.

La Commission souligne l'urgence de définir un cadre opérationnel pour la maîtrise des évolutions de Cigéo, dès maintenant et pour toute la phase d'exploitation qui s'étalera sur 150 ans. Elle recommande que l'Andra se dote d'une procédure formalisée de gestion de la configuration de Cigéo au cours du temps, appuyée sur la définition exhaustive et détaillée de l'installation dans une maquette numérique, afin d'éviter qu'une évolution puisse en particulier affecter la sûreté du stockage.

A la demande de l'OPECST, la Commission a analysé les conclusions du groupe de revue internationale sur le stockage des déchets bitumés MAVL qui était missionné par le ministre de la transition écologique et solidaire et par l'ASN. Elle souligne la pertinence des avis émis et préconise de mettre en œuvre les recommandations du groupe de revue sans tarder, pour que les résultats des travaux proposés soient disponibles pendant l'instruction de la DAC. La Commission suivra aussi avec vigilance l'avancement des travaux visant à démontrer, avant la fin de l'instruction de la DAC, la faisabilité du creusement de galeries de grand diamètre (12 m), des alvéoles HAVL étendus à 150 m de long, du stockage des bitumes, ou encore de la réalisation des scellements surface-fond.

L'Andra est le maître d'ouvrage du projet Cigéo. La Commission souligne la nécessité de la mise en place d'un niveau de gouvernance autonome et adapté au pilotage opérationnel de Cigéo, sous l'autorité de l'Andra, afin que les décisions courantes nécessaires à la conduite du projet puissent être instruites sans retard. La Commission sera consultée sur tout point relevant de la réversibilité comme le prévoit la loi de 2016.

L'évaluation socio-économique de Cigéo prévue par le décret 2013-1211 est en cours. Elle vise à estimer les coûts et les bénéfices économiques, sociaux et environnementaux du projet par rapport à trois solutions alternatives. La Commission demande que les résultats obtenus lui soient présentés dès que possible. Plus généralement, la Commission pourra évaluer les études et recherches qui seraient consacrées à des solutions alternatives au stockage géologique des déchets HAVL et MAVL.

PANORAMA INTERNATIONAL : ENTREPOSAGE DE LONGUE DURÉE ET STOCKAGE FAVL

Dans la plupart des pays, l'allongement des délais pour mettre en place le stockage du combustible usé et des déchets de haute et moyenne activité à vie longue entraîne l'allongement des durées d'entreposage, parfois bien au-delà du siècle. La Commission rappelle que l'entreposage de longue durée tient de l'attentisme et qu'une politique volontariste de développement d'une solution pérenne de stockage doit être menée en parallèle. La Commission constate que le niveau des connaissances applicables au contexte français concernant le comportement des entreposages séculaires et des matières ou déchets entreposés est faible et peu consolidé.

Les programmes de gestion des déchets FAVL dans le monde sont encore embryonnaires. Le stockage en profondeur est privilégié car il procure un plus haut degré de confinement et d'isolement que les stockages en surface.

La Commission suivra avec attention l'évolution des programmes de recherche internationaux sur ces thématiques.

INTRODUCTION

En 1991, dans une première loi en France sur la gestion des déchets radioactifs, le Parlement, conscient de la spécificité et de la nouveauté des problèmes qui se posaient, a confié pour 15 ans l'évaluation de l'état d'avancement des recherches dans ce domaine, à une Commission nationale d'évaluation (CNE). Selon cette loi, les évaluations de la CNE donnent lieu à un rapport annuel au Parlement qui en saisit l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST). Cette première commission (CNE 1) a rendu un ensemble de 13 rapports entre les années 1991 et 2006.

En juin 2006, une seconde loi sur la gestion des matières et déchets radioactifs a confirmé l'existence et le rôle de la Commission, devenue l'actuelle CNE 2. La CNE 2, composée de douze personnalités bénévoles (Cf. Annexes I), est indépendante. Elle évalue les recherches en cours et formule des recommandations afin d'éclairer les décisions de la puissance publique. Ce document constitue son 14^{ème} rapport transmis au Parlement.

Cette année, la Commission a conduit 11 auditions d'une journée, rassemblant en général une soixantaine de personnes représentant l'ensemble des acteurs de la filière. Elle a aussi procédé à 4 auditions restreintes et à plusieurs visites (Cf. Annexes II à V). Pour ce 14^{ème} rapport, elle a tenu compte des documents qui lui ont été transmis jusqu'à la date du 15 mars 2020 (Cf. Annexe VI).

Les lois de 1991 et de 2006 préconisent que des recherches soient conduites sur la séparation, puis sur la transmutation des éléments radioactifs à vie longue présents dans les déchets, afin d'en réduire la radiotoxicité à long terme. Jusqu'à la date de publication de son rapport 13, la Commission avait observé que les études et recherches sur l'aval du cycle du combustible et le cycle des matières étaient entreprises en adéquation avec ces préconisations. Plusieurs dispositions de la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE), adoptée le 21 avril 2020, modifient profondément le contexte et les motivations de ces travaux. La Commission fait une analyse de l'impact de la PPE sur les études et recherches en cours ou programmées par les acteurs de la Loi.

En France, le démantèlement de nombreuses installations nucléaires produira de très grandes quantités de déchets de faible et très faible radioactivité et leur gestion doit être prévue sur le long terme. C'est pourquoi la Commission examine l'évolution des études et recherches sur l'assainissement et le démantèlement (A&D) des installations nucléaires et suit les travaux relatifs à la gestion des déchets de faible à très faible activité issus, pour partie, de ces opérations.

Comme lors des années précédentes, la Commission a consacré une grande partie de ses travaux à l'analyse et à l'évaluation des recherches et des études sur le projet Cigéo piloté par l'Andra. L'application des dispositions de la loi de 2006 prévoit expressément que les déchets radioactifs de haute et de moyenne activité à vie longue soient stockés « en couche géologique profonde ». Aussi l'Andra prépare-t-elle actuellement les dossiers administratifs et techniques en vue de la création d'un stockage souterrain à 500 m de profondeur dans une formation argileuse épaisse de plus de 100 m et située à la limite des départements de la Meuse et de la Haute Marne.

Enfin, la PPE prévoit la mise en œuvre du multi-recyclage du plutonium en réacteur à eau pressurisée (REP) et reporte le déploiement des réacteurs à neutrons rapides (RNR) dont la mise en œuvre pourrait permettre la fermeture du cycle des combustibles. Nul doute que les besoins en entreposage vont s'accroître pour accompagner ce changement. La Commission consacre son panorama international annuel aux questions soulevées par l'entreposage de longue durée (de l'ordre du siècle) des combustibles usés et déchets radioactifs à vie longue et par le stockage des déchets FAVL.

CHAPITRE I : IMPACTS DE LA PPE ET CYCLE DU COMBUSTIBLE

Jusqu'à la date de publication de son 13^{ème} rapport, la Commission avait observé que l'aval du cycle du combustible et le cycle des matières répondaient à plusieurs impératifs :

- la recherche d'une indépendance énergétique après le choc pétrolier de 1973 ;
- le classement de l'uranium appauvri, de l'uranium de retraitement et du plutonium en matières nucléaires énergétiques, donc valorisables ;
- la loi de 1991 comportant trois volets : entreposage, stockage et séparation – transmutation ;
- la loi de 2006 prévoyant la réalisation d'un prototype de réacteur à neutrons rapides (RNR GEN IV) pour un déploiement à l'horizon 2040.

Dans le cadre de la stratégie énergétique découlant de la loi de 2006, les réacteurs à neutrons rapides (RNR) permettent de valoriser le stock de plutonium issu du retraitement des combustibles usés du parc nucléaire actuel, de fermer le cycle du combustible RNR et de réaliser partiellement la transmutation des actinides mineurs présents dans les déchets afin de réduire leur inventaire et leur radio-toxicité. Par ailleurs, un parc de RNR utilisant un combustible recyclé assurerait l'indépendance totale de la France vis-à-vis de la ressource en uranium naturel.

Plusieurs dispositions de la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) modifient profondément cette approche. La Commission a partiellement abordé ce sujet dans son rapport n°13. Dans le présent rapport (n°14), la Commission analyse l'impact de la PPE sur les études et recherches en cours ou programmées par les acteurs de la Loi. Certains aspects sont développés dans l'annexe VII.

1.1 LES NOUVELLES DISPOSITIONS INTRODUITES PAR LA PPE

Le Ministère de la transition écologique et solidaire a publié dans son intégralité le projet de PPE qui « *constituera le fondement de l'avenir énergétique de la France pour les prochaines années* ». La PPE a été adoptée par décret du Premier ministre en date du 21 avril 2020, après un débat public et l'avis des instances appelées par la loi à se prononcer. L'analyse de la Commission est basée sur ces éléments.

Pour ce qui concerne plus particulièrement la production d'électricité d'origine nucléaire, la PPE définit plusieurs évolutions majeures par rapport à la stratégie qui prévalait jusqu'alors. Certaines d'entre elles auront un impact très significatif sur la gestion des matières et des déchets nucléaires et sur le contenu des recherches conduites ou à conduire sur ces questions.

La mesure la plus emblématique de la PPE est la réduction à 50 % de la part du nucléaire dans la production d'électricité en France à l'horizon 2035 et, en conséquence, la mise à l'arrêt de 14 réacteurs nucléaires d'ici 2035 (tranches de 900 MWe). Dans le même temps, la politique de recyclage des combustibles usés, telle qu'elle existe aujourd'hui, sera poursuivie, au moins jusqu'en 2040 qui est l'échéance prévue pour le renouvellement des principales installations de retraitement et de fabrication du MOX. Comme ce sont les tranches de 900 MWe qui utilisent aujourd'hui le combustible MOX, cette orientation rend indispensable l'adaptation au MOX (moxage) d'un nombre suffisant de réacteurs de 1300 MWe pour consommer le plutonium issu du retraitement.

L'autre mesure forte contenue dans la PPE est l'arrêt du programme Astrid (déjà annoncé mi-2019) et le report à la fin du 21^{ème} siècle de la construction éventuelle d'un démonstrateur suivie du déploiement de RNR.

Pour limiter l'accumulation de combustibles usés contenant du plutonium, la PPE prévoit que « des études seront menées en vue du déploiement du multi-recyclage des combustibles dans les réacteurs du parc actuel ». Ce multi-recyclage, s'il est déployé industriellement et probablement pas avant 2040, ne pourrait l'être que si les six nouveaux réacteurs EPR2, (pour lesquels EDF doit faire des propositions au gouvernement pour 2021), sont construits. Le multi-recyclage en REP est présenté comme une étape en vue de la fermeture du cycle. Celle-ci ne pourra être atteinte qu'avec le déploiement de RNR. Les performances et l'intérêt au plan scientifique, technique, économique et stratégique du multi-recyclage pour la préparation de l'étape RNR, restent à confirmer.

Lors de leurs auditions, EDF, Orano et le CEA ont fourni à la Commission des informations sur la manière dont ils envisagent de mettre en œuvre la PPE. EDF, notamment, a indiqué à la Commission que les éléments connus à ce jour ne lui permettent pas d'extrapolation au-delà de 2035. D'autre part, l'ASN a demandé qu'une évaluation de l'impact de la PPE sur le cycle du combustible soit réalisée six mois après sa mise en place.

1.2 LES IMPACTS SUR LES RECHERCHES RELATIVES AUX REACTEURS

1.2.1 Moxage des réacteurs de 1300 MWe

La diminution de la part de l'électricité nucléaire au profit des énergies renouvelables prévue par la PPE entraînera la fermeture de 12 réacteurs de 900 MWe entre 2027 et 2035 (en plus des deux réacteurs de Fessenheim arrêtés en 2020). Or les réacteurs de 900 MWe sont les seuls autorisés, aujourd'hui, à utiliser du combustible MOX. EDF étudie donc les modifications à apporter à des réacteurs de 1300 MWe afin de demander une autorisation à l'ASN pour utiliser du combustible MOX, en complément des réacteurs de 900 MWe restant en fonctionnement. Six réacteurs de 1300 MWe utilisant un combustible MOX maintiendraient le recyclage du plutonium tel qu'il est mis en œuvre aujourd'hui. Ce recyclage permet une économie de 10 % des importations d'uranium naturel.

La Commission recommande de ne pas sous-estimer le travail nécessaire à l'adaptation des réacteurs de 1300 MWe au moxage et à l'obtention des autorisations requises.

A plus long terme, un projet de construction de six EPR2 doit être proposé en 2021 pour remplacer les réacteurs de 900 MWe qui arriveront progressivement en fin de vie. L'ajout de ces réacteurs au parc permettrait de poursuivre la politique de mono-recyclage du plutonium à l'aide du combustible MOX.

1.2.2 Adaptation des EPR2 au multi-recyclage

EDF a présenté à la Commission le multi-recyclage en REP comme une conséquence de la PPE qu'elle va s'efforcer de mettre en œuvre, avec l'objectif principal de ne pas perturber la production d'électricité.

La stabilisation des inventaires de combustibles usés et de plutonium est un objectif secondaire. Les auditions conduites par la Commission ont montré que les paramètres qui gouvernent cette stabilisation ne sont pas encore précisément définis ni *a fortiori* quantifiés.

La PPE prévoit un déploiement industriel vers 2040. La Commission souligne que le calendrier sera difficile à tenir :

- *EDF prévoit des tests de combustibles prototypes en réacteur vers 2025-2028. Conduire de tels tests dans des délais aussi courts paraît peu réaliste ;*
- *Le multi-recyclage en REP fera appel aux réacteurs d'un parc EPR2 dont la réalisation n'est pas décidée à ce jour.*

Dans le cadre de la PPE, EDF doit fournir un plan de développement chiffré du multi-recyclage, incluant l'impact sur les usines du cycle et le développement d'installations spécifiques. Les données actuelles ne permettent pas de l'établir.

Le multi-recyclage est présenté par la PPE comme une première étape vers le déploiement de RNR. Il nécessitera probablement d'investir des ressources très significatives. La Commission souhaiterait savoir dans quelle mesure les investissements consacrés au multi-recyclage en REP contribueront effectivement à la R&D concernant les RNR.

1.2.3 Les recherches relatives aux RNR

a) Bilan d'Astrid et programme de recherche sur les RNR post 2019

Les travaux menés dans le cadre du programme Astrid jusqu'en 2019 ont abouti au volumineux dossier de fin de convention (DFC : 2000 documents), capitalisant dix ans de recherches et d'innovations technologiques sur les RNR de quatrième génération utilisant le sodium comme caloporteur (RNR-Na).

Avec l'arrêt du programme Astrid, l'objectif majeur aujourd'hui est de préserver la capacité nationale à redémarrer un projet de RNR-Na de quatrième génération à l'horizon de la deuxième moitié de ce siècle. Pour cela, trois axes de recherche seront mis en œuvre par le CEA : rationaliser les acquis d'Astrid, démontrer le caractère recyclable des matières en RNR et explorer des procédés de nouvelle génération pour le cycle du combustible. Tous comporteront des travaux d'amélioration des modèles de simulation. Certains des grands outils expérimentaux mis en service à l'occasion d'Astrid pour qualifier ces modèles seront réutilisables. Cependant quelques outils seront arrêtés faute de nouveaux partenaires.

Le CEA envisage donc un nouveau programme de R&D, conforme à la PPE, fondé essentiellement sur la simulation. Il comporte un socle de travaux sur la physique et les

matériaux, la poursuite de développements technologiques ciblés autour du concept de RNR-Na (justification de la durée de vie de composants, visualisation dans le sodium...) et des travaux d'esquisses et de veille technologique sur d'autres concepts de RNR, ou destinés à minimiser le coût d'un RNR-Na par rapport aux hypothèses de conception d'Astrid. Les travaux de démonstration s'appuieront principalement sur des expériences conduites ou à conduire dans le réacteur russe BOR 60.

La Commission prend note, suite à l'arrêt du projet Astrid, des nouvelles orientations sur les RNR. Elle rappelle la recommandation de son rapport précédent : la définition d'un programme ambitieux à l'échelle nationale est indispensable pour relever les défis scientifiques et technologiques en cohérence avec la fermeture du cycle. Le redémarrage de projets sur les RNR étant prévu dans 30 ans au mieux, il mobilisera donc la prochaine génération de scientifiques et d'ingénieurs à qui il faudra transmettre un savoir-faire aujourd'hui reconnu comme étant de premier plan au niveau international.

La Commission considère que le programme proposé par le CEA est trop modeste pour répondre à ces objectifs. Elle estime qu'un programme de R&D associant simulation et plateformes expérimentales exigerait un projet consolidé de réacteur RNR expérimental pour permettre la pleine valorisation des acquis d'Astrid.

b) La collaboration internationale

La collaboration internationale est l'un des moyens avancés pour conserver et valoriser les compétences françaises malgré l'arrêt du programme Astrid. Le CEA a établi des relations bilatérales avec tous les acteurs mondiaux du développement de RNR :

- le partenariat le plus engagé est celui avec le Japon qui avait manifesté son intérêt en s'associant au projet Astrid ;
- la collaboration avec la Russie consiste en des projets d'irradiation dans les réacteurs RNR russes mais sans projet commun ;
- les contours de la collaboration avec les Etats-Unis doivent encore être définis ;
- les collaborations avec la Chine et l'Inde sont embryonnaires.

Si la France souhaite valoriser ses acquis et conserver les connaissances accumulées sur les RNR, la Commission note que le nombre des partenaires possibles pour établir un projet dynamique en collaboration internationale est très limité.

La Commission constate par ailleurs que les travaux menés en France dépendent de l'emploi d'un RNR russe sans qu'il existe de projet en parallèle pour s'en affranchir en cas d'indisponibilité de ce dernier.

Ce constat souligne la nécessité de disposer d'une installation d'irradiation avec des neutrons rapides a minima au niveau européen.

1.2.4 Le maintien des compétences pour la gestion du parc

Dans ses rapports précédents, la Commission a insisté sur la nécessité d'un maintien et même d'un développement des compétences pour une gestion responsable du parc, et donc des matières et des déchets.

S'agissant notamment de la séparation, la France, grâce aux travaux du CEA et d'Orano, a acquis une compétence unique en matière de traitement du combustible usé, et il est très important que la R&D indispensable à la mise au point des futurs procédés de traitement applicables au multi-recyclage du MOX REP et du MOX RNR puisse disposer des meilleurs experts. Il s'agit donc de pouvoir attirer de nouveaux talents, ce qui n'est possible qu'en affichant une ambition collective nationale au travers d'un grand projet dédié aux réacteurs du futur. En effet, la Commission considère qu'une partie des retards des programmes de construction des réacteurs EPR, ainsi que du réacteur d'irradiation Jules Horowitz (RJH), est imputable à une perte de compétences scientifiques et industrielles liée à une longue période sans projet.

Pour relever les défis technologiques indispensables à la réalisation des réacteurs du futur et à la gestion optimale des matières et déchets à un coût acceptable, la Commission renouvelle sa recommandation (Cf. rapport n°13) d'un ambitieux programme national de R&D, appuyé sur des projets concrets.

17

1.2.5 Le programme Nuward

Dans le but de diversifier leur offre, les fournisseurs de centrales électronucléaires s'intéressent aux réacteurs nucléaires de faible puissance. Dans les années récentes, des projets de petits réacteurs modulaires (SMR) ont vu le jour. Quatre acteurs de la filière française (EDF, Technicatome, le CEA et Naval Group) se sont associés pour développer un petit réacteur à eau pressurisée, baptisé NUWARD™, exclusivement destiné à l'exportation sur le segment de marché de 300 MWe à 400 MWe. Parallèlement, lors du sommet de l'AIEA de septembre 2019, un accord de coopération exploratoire a été signé entre EDF, le CEA et Westinghouse pour le développement d'un SMR.

Un projet, actuellement au début de la phase d'avant-projet sommaire, a été présenté par EDF à la Commission. EDF a rapporté que de nombreux programmes similaires sont actuellement en cours de développement dans plusieurs pays (USA, Chine, Russie, Corée du Sud, Argentine). Le programme NUWARD™ accuse d'emblée un retard très significatif par rapport à ses concurrents. Par ailleurs, le contenu du partenariat en cours de négociation entre le CEA et Westinghouse sur la thématique SMR reste pour une grande part à négocier.

La Commission observe que le programme NUWARD™ n'en est encore qu'aux prémices. L'exportation de SMR devra s'accompagner de propositions de gestion des matières et des déchets en adéquation avec les accords internationaux.

Enfin, en l'absence d'application sur le sol national, au moins à titre d'exemple, ce projet pourrait se heurter à quelques difficultés pour rencontrer le succès espéré sur un marché international qui sera, à n'en pas douter, très concurrentiel.

1.3 LES RECHERCHES ET TRAVAUX RELATIFS AUX COMBUSTIBLES ET AUX MATIERES

1.3.1 Le combustible URE

Entre 1994 et 2013, quatre réacteurs de Cruas ont utilisé de l'uranium de retraitement enrichi (URE) par l'industriel russe TENEX. Bien que le retour d'expérience de l'URE en réacteur soit excellent, la filière a été arrêtée en 2013 à la suite de différends entre la société TENEX et Orano.

EDF a décidé en 2018 de reprendre la filière URE avec le même fournisseur. En effet, TENEX s'engage désormais à conditionner ses effluents par vitrification, ce qui lève les réserves environnementales partiellement à l'origine de l'arrêt de la filière. Cette décision est liée à l'économie faite sur l'importation d'uranium naturel, mais aussi à la saturation imminente des capacités d'entreposage de l'uranium de retraitement (URT).

18

1.3.2 Le combustible MOX et les combustibles destinés au multi-recyclage

Actuellement, un seul type de combustible MOX est fabriqué pour les besoins français et utilisé dans les réacteurs de 900 MWe ; d'autres compositions de MOX sont fabriquées par l'usine Melox pour l'exportation.

Le combustible MOX qui sera utilisé par les réacteurs de 1300 MWe sera très comparable à celui des réacteurs actuels de 900 MWe (teneur maximum en Pu : 9.08 % ; isotopie et zonage identique). Seule la longueur de l'assemblage change. Pour autant, il convient de rappeler qu'en raison de la dégradation de l'isotopie du plutonium, l'utilisation du combustible MOX en réacteur est limitée à un cycle dans les conditions d'utilisation actuelles, ce qui conduit à un besoin croissant d'entreposage de MOX usés.

Le multi-recyclage du plutonium en REP nécessitera des combustibles nettement plus riches en Pu. Leur fabrication s'appuiera sur l'expérience acquise de 1963 à 1999 avec les combustibles RNR des réacteurs Rapsodie, Phénix et Superphénix. De nombreuses études sont en cours concernant la métallurgie des poudres pour la fabrication de ces combustibles. Orano prévoit de modifier le procédé de production d'oxyde d'uranium appauvri entrant dans la composition du MOX dans le but de limiter les rebuts lors de la fabrication.

Deux types de combustibles destinés au multi-recyclage du Pu en REP sont étudiés :

- le CORAIL-A qui associe des crayons UOX et des crayons MOX (concept d'assemblage hétérogène). Le CEA et EDF étudient plusieurs dispositions des crayons UOX et MOX dans l'assemblage ;
- le MIX qui est un mélange de plutonium recyclé (maximum 12 %) avec de l'uranium enrichi, qui compense la dégradation isotopique du plutonium. Il faut donc augmenter la quantité d'uranium enrichi à chaque recyclage, avec un taux maximum de 4 %.

La Commission souligne que le MIX serait mieux adapté pour atteindre l'objectif de diminution de l'inventaire de déchets et de matières car il permet de consommer plus de Pu. Par contre, il nécessiterait plus de travaux de développement que le Corail-A, qui peut être réalisé grâce à une adaptation des procédés actuels.

Les combustibles Corail-A ou Mix demandent des installations de fabrication du combustible MOX, mais aussi des installations de retraitement du combustible usé adaptées aux teneurs en Pu et U et à leurs isotopies. Pour utiliser les usines Melox et de La Hague jusqu'en 2050, des investissements importants, encore à évaluer, seront nécessaires en vue d'adapter les installations actuelles.

La Commission attire l'attention sur un inconvénient majeur d'une telle stratégie de multi-recyclage. En raison du changement des proportions isotopiques du Pu au cours du multi-recyclage (augmentation des isotopes pairs), la manipulation du Pu devient radiologiquement plus complexe. Par ailleurs, le Pu disponible et de qualité adéquate pour lancer un parc RNR à la fin du 21^{ème} siècle, comme prévu par la PPE, pourrait s'avérer insuffisant.

19

1.3.3 L'impact sur les usines du cycle et leur renouvellement vers 2040-2050

D'après Orano, les installations actuelles permettant de traiter du combustible usé UOX et de produire du combustible MOX seront opérationnelles en l'état jusqu'en 2040 sans investissement de jouvence important (leur maintien en fonctionnement nécessitera probablement quelques interventions comme le changement des évaporateurs). Orano possède déjà un retour d'expérience du remplacement de modules importants. Les installations actuelles peuvent accepter sans difficultés de l'UOX avec des taux de combustion jusqu'à 45/50 GWj/t et peuvent produire jusqu'à 30 - 40 t/an de MOX REP (jusqu'à 12 % de Pu).

Le multi-recyclage du Pu en REP implique tout d'abord la maîtrise du traitement des MOX usés. A ce jour, le plutonium utilisé pour la fabrication des MOX est issu du traitement à La Hague des combustibles UOX usés. Le multi-recyclage en REP nécessitera la construction de nouvelles usines de traitement, approximativement à l'échéance prévue de renouvellement des usines actuelles (pour La Hague, au plus tard en 2050), avec une radioprotection adaptée et permettant la mise en œuvre de matières induisant des effets radiolytiques importants.

Depuis 1992, des campagnes de traitement de MOX REP usés ont été réalisées à La Hague dans le cadre d'une collaboration CEA - Orano. En 1998, une première campagne de traitement par dilution avec du combustible UOX usé a été suivie de campagnes de démonstration industrielle de 2004 à 2008 ; 70 tonnes de MOX usés (étrangers) ont ainsi été traitées entre 2004 et 2008.

Le traitement des MOX par dilution, actuellement employé, ne pourra pas être utilisé dans le cas d'un parc pratiquant le multi-recyclage des MOX en raison de l'inhomogénéité de la répartition du Pu dans les pastilles irradiées. Aussi le CEA conduit-il des recherches pour :

- mettre au point un nouveau procédé de séparation uranium/plutonium et produits de fission, utilisant un amide et s'affranchissant ainsi de la phase de réduction de Pu du procédé Purex. Ce procédé respecterait les directives de l'emploi industriel des substances chimiques (REACH) ;
- modifier la nature des verres pour permettre le conditionnement des produits de fission et des actinides mineurs dont les teneurs sont augmentées dans les MOX usés comparativement aux UOX usés. Pour les MOX RNR, les verres devront également pouvoir accepter les produits de corrosion de la gaine (Fe, Cr, Ni).

Le multi-recyclage du Pu en REP nécessite aussi de fabriquer de nouveaux combustibles MOX recyclés. Pour cette raison, des aménagements sont en cours à l'usine Melox afin de gérer les évolutions de composition isotopique du plutonium, ce qui nécessite des dispositions de radioprotection renforcées et la prise en compte des dégagements thermiques.

Le multi-recyclage nécessitera enfin la maîtrise des étapes de fabrication, mise en réacteur, refroidissement en piscine, séparation, refabrication... Il faudra être en capacité d'irradier un MOX fabriqué à partir de Pu issu du traitement d'un MOX usé (MOX 2), puis de fabriquer un nouveau combustible à partir de ce même Pu recyclé (MOX 3) et ainsi de suite. La Commission constate que cet enchaînement conduit à fabriquer la génération MOX 2 aux alentours de 2040 – 2050. Cette échéance correspond au renouvellement de l'usine de La Hague dans une nouvelle conception.

Les très nombreux projets envisagés tels que le moxage des 1300 MWe, le multi-recyclage en EPR2, voire dans de nouveaux réacteurs (SMR, réacteurs à sels fondus), la fabrication des combustibles URT, MOX, ou encore le traitement des combustibles usés, présentent une grande interdépendance. La Commission note l'absence d'un calendrier stabilisé organisant ces actions. Le financement de opérations de R&D et de développement industriel mériterait également d'être précisé compte tenu de l'engagement qu'elles présupposent pour les prochaines décennies.

1.3.4 L'impact sur les besoins en entreposage

Compte tenu du report des projets de RNR et de la mise en place du multi-recyclage en REP, la PPE conduira inévitablement à entreposer une plus grande quantité de combustible usé avant traitement et recyclage. Cette perspective s'ajoute à la tension actuelle sur les capacités d'entreposage. Orano va procéder à une densification de l'entreposage dédié aux MOX usés permettant de porter la capacité des piscines de 14 000 à 17 000 tonnes, reportant ainsi le niveau de saturation actuel de dix ans.

Les études réalisées dans le cadre du PNGMDR montrent une saturation des capacités d'entreposage de combustibles usés vers 2030, ce qui est cohérent avec l'estimation d'EDF. La réalisation d'une nouvelle installation d'entreposage, pour laquelle un choix doit être fait entre entreposage sous eau ou à sec, est donc indispensable. L'IRSN a conduit des études qui montrent que si les objectifs de sûreté sont atteignables avec les deux options, le stockage à sec ne convient qu'aux combustibles usés très refroidis.

L'entreposage des assemblages de MOX usés, par exemple, ne peut être réalisé que sous eau, au moins pendant les premières décennies, pour garantir l'intégrité de la gaine et donc le confinement des matières radioactives.

La Commission, dans ses rapports précédents, a rappelé que l'entreposage de longue durée est en contradiction avec la nécessité pour notre génération de traiter et gérer de manière définitive nos déchets radioactifs. Il convient de noter que l'entreposage à sec peut conduire à modifier la politique de gestion des combustibles usés. En effet, l'intégrité des assemblages, qui ne seraient pas refroidis par l'eau et seraient maintenus longtemps à haute température, peut être affectée, ce qui interdirait tout retraitement ; le combustible usé deviendrait alors un déchet.

La Commission analyse au chapitre V les enjeux associés aux entreposages de longue durée. Elle note qu'au plan international les durées envisagées dépendent fortement de la stratégie adoptée en matière de gestion de l'aval du cycle du combustible.

En cohérence avec les conclusions de l'IRSN, EDF est favorable à l'entreposage sous eau et a présenté à la Commission son projet de nouvelle piscine centralisée pour éviter une saturation des installations à l'horizon 2030. Le dossier d'options de sûreté a fait l'objet d'un avis positif de l'ASN en juillet 2019 et la mise en service du premier bassin est envisagée vers 2030.

Le stock d'Uranium de retraitement (URT) détenu par Orano à fin 2018 est d'environ 32 000 tonnes. Il est en croissance depuis l'arrêt de l'utilisation d'uranium de retraitement enrichi (URE) par EDF en 2013. Orano a présenté un projet d'extension des capacités d'entreposage dont la mise en service est espérée fin 2022. Ce projet devrait être suffisant, à condition qu'EDF reprenne, comme elle l'a annoncé, la consommation d'URE dans ses réacteurs. Dans cette hypothèse, l'inventaire atteindra près de 40 000 tonnes vers 2027, puis décroîtra ensuite.

Le stock d'uranium appauvri détenu par Orano est en croissance et devrait atteindre 400 000 tonnes en 2030 et 470 000 en 2040. La capacité d'entreposage disponible, après la réalisation prévue en 2020 de l'extension approuvée en 2018, s'élèvera à 419 000 tonnes. Les capacités d'entreposage seront donc probablement saturées au début des années 2030.

La Commission observe qu'une saturation des capacités d'entreposage se profile au tout début des années 2030. Les études conduites sur les entreposages sont dans l'ensemble pertinentes, mais la Commission est préoccupée par le calendrier des opérations programmées pour faire face à cette difficulté, ses marges étant probablement insuffisantes :

- *la future piscine centralisée destinée aux combustibles usés pourrait n'entrer en service qu'après 2030 ;*
- *le projet d'extension de la capacité de stockage de l'URT, en cours au Tricastin, ne sera suffisant que si la reprise du traitement de l'URT annoncée par EDF intervient dans le calendrier prévu ;*

- les capacités d'entreposage de l'uranium appauvri devraient également être saturées aux environ de 2030.

1.4 LES RECHERCHES ET TRAVAUX RELATIFS AUX DECHETS HA

L'impact de la PPE sur la production de déchets de haute activité (HA) est lié à la mise en place du multi-recyclage qui va accroître l'inventaire de déchets, mais aussi au report des projets de RNR indispensables pour mettre en œuvre la transmutation des actinides mineurs.

1.4.1 L'impact sur les inventaires

Concernant les déchets HA, le multi-recyclage dans les EPR2 stabiliserait l'inventaire en Pu, tout en dégradant son isotopie et augmenterait sensiblement la production d'actinides mineurs. Ainsi un EPR2 fonctionnant avec un combustible UOX et un taux de combustion de l'ordre de 50 GWj/t produirait 1,5 kg/t d'actinides mineurs (AM) dont 0,7 kg d'américium (Am) ; En revanche, un EPR2 chargé avec du MOX, et pour un taux de combustion équivalent, produirait 7,7 kg/t d'AM dont 6,4 kg d'Am. L'américium étant le principal contributeur à l'effet thermique des verres après la décroissance des principaux produits de fission, cette augmentation entraînera un accroissement de l'emprise des colis dans un stockage géologique.

1.4.2 Les travaux sur la séparation et la transmutation

Depuis de nombreuses années, les études sur la séparation et la transmutation des actinides mineurs, développées par le CEA, concernent essentiellement l'Am. Les études de séparation des actinides mineurs pour laquelle le CEA a développé des procédés permettant d'isoler les différents actinides mineurs se poursuivent dans un contexte européen avec les projets SACSESS, GENIORS...

La Commission note une tendance à la mutualisation de la R&D concernant la séparation au travers de projets européens. Elle rappelle que le CEA est parmi les quelques centres de recherche à disposer des installations permettant la manipulation de quantités pondérables d'actinides, notamment l'installation Atalante. En limitant leur utilisation au seul cadre coopératif européen, ces installations risquent d'être sous employées et leur développement ralenti. La Commission redoute que, dans le contexte international, cette stratégie conduite à une remise en cause de notre leadership mondial.

Les dernières expérimentations sur la transmutation ont été réalisées sur des aiguilles irradiées dans un réacteur à haut flux comportant des disques d'oxydes d'uranium et de plutonium et contenant 15 % d'américium (concept CCAM, Couvertures Chargées en Actinides Mineurs). Les examens post-irradiation montrent qu'une microstructure optimisée du mélange d'oxydes est stable jusqu'à 1000°C et surtout que le dégagement d'hélium qui peut provoquer un gonflement et l'altération du combustible est parfaitement maîtrisé. Des analyses sont en cours pour confirmer que le taux de transmutation de l'américium dans les conditions d'irradiation a atteint

47 %. Un projet européen de 14 partenaires, PATRICIA (Partitioning And Transmuter Research Initiative in a Collaborative Innovation Action), devrait permettre l'analyse des résultats obtenus lors des irradiations MARIOS, DIAMINO, SUPERFACT, MARINE.

Il convient de souligner qu'une expérimentation requiert entre 10 et 15 ans depuis la fabrication de l'aiguille jusqu'à l'analyse complète de tous les paramètres post-irradiation. Au cours des dernières décennies, les réacteurs Osiris, Phénix mais également des réacteurs étrangers (Norvège, Pays-Bas, États-Unis) ont permis de réaliser des irradiations. Aujourd'hui, la France ne dispose plus d'outil d'irradiation avec des neutrons rapides et, mis à part l'installation ATR aux États-Unis, les réacteurs jusqu'alors accessibles sont en fin de vie. Avec l'arrêt du programme Astrid, les installations permettant de conduire des expérimentations sur la transmutation vont donc manquer.

La Commission rappelle que les études et recherches sur la transmutation sont intimement liées à celles sur les RNR puisqu'elles nécessitent de disposer d'outils d'irradiation similaires. Ce constat renforce la nécessité de disposer au moins d'une installation d'irradiation avec des neutrons rapides au niveau européen, dans le cadre d'un ambitieux programme national de R&D.

1.5 CONCLUSION

La Commission constate que les nouvelles orientations de la PPE (moxage des 1300 MWe, multi-recyclage du Pu dans les EPR, ...) entraînent des besoins de recherche très significatifs sur l'adaptation au combustible MOX actuel des réacteurs existants et sur la conception des combustibles issus du multi-recyclage pour des réacteurs EPR2 à construire. De plus, les évolutions consécutives de l'inventaire des matières, du besoin en entreposage, et enfin de la nature et de l'inventaire des déchets radioactifs, restent à évaluer précisément.

La Commission souligne que les programmes qui lui ont été présentés en sont au stade d'ébauches. Cela est particulièrement vrai pour ce qui concerne les calendriers, interdépendants, des différentes actions prévues par les acteurs de la Loi. Elle demande que des éléments plus tangibles lui soient présentés lors des auditions de l'exercice 2020-2021.

CHAPITRE II : ASSAINISSEMENT – DEMANTELEMENT ET DECHETS

TFA

La Commission suit régulièrement l'évolution des études et recherches sur l'assainissement et le démantèlement (A&D) des installations nucléaires. Elle organise annuellement des auditions sur ce sujet important et évalue, dans ses rapports annuels successifs, les travaux qui lui sont présentés. Une attention particulière a porté cette année sur les travaux du CEA, présentés lors d'une audition en octobre 2019 et lors d'une visite sur le site de Marcoule.

2.1 DES TECHNIQUES MAITRISEES MAIS DES MOYENS LIMITES

Le processus d'assainissement et de démantèlement des installations nucléaires est une activité intégrée dans la réglementation depuis plusieurs décennies, les opérateurs ayant la responsabilité de le réaliser en application du principe pollueur-payeur. Ainsi, un savoir-faire considérable a été accumulé par l'ensemble des opérateurs de la filière, grâce au retour d'expérience du démantèlement déjà réalisé pour nombre de leurs installations. Cependant, les moyens financiers consacrés à ces activités, au CEA notamment, apparaissent limités alors que le nombre d'installations à traiter est croissant.

2.1.1 Une réelle maîtrise technique

Le CEA est à la fois pionnier et expert de premier rang dans des opérations spécifiques de démantèlement, compte tenu de la multiplicité et de la diversité des installations qu'il a d'ores et déjà traitées, ou qu'il doit encore démanteler. L'expérience accumulée par le CEA dans la préparation et la mise en œuvre des chantiers d'A&D constitue un réservoir de savoir-faire valorisable et utilisable par les autres opérateurs.

EDF, lui aussi, a acquis une expérience considérable en engageant la déconstruction de ses 9 réacteurs définitivement à l'arrêt. De plus, une expertise spécifique a été développée par le CEA et EDF dans les opérations d'A&D concernant la filière RNR (Rapsodie, Superphénix, Phénix).

Enfin, Orano est engagé dans l'arrêt définitif (en 2009) et le démantèlement (en 2013) de ses anciennes usines UP2-400 de La Hague. L'objectif est l'assainissement poussé permettant la réutilisation des bâtiments pour des activités industrielles. Le démantèlement de son usine d'enrichissement d'uranium Eurodif (GB1) a été autorisé par l'ASN début 2020, l'achèvement devant intervenir fin 2051.

La Commission encourage les opérateurs à mettre en place une coopération renforcée sur les opérations d'assainissement et démantèlement. Une organisation commune devrait permettre de réduire les coûts et de constituer un pôle d'excellence français capable de répondre à une demande internationale. Les opérateurs doivent également veiller à internaliser la connaissance dans leurs propres structures.

2.1.2 Des moyens limités

Le CEA a indiqué à la Commission que les programmes d'A&D tel qu'identifiés en 2018 étaient estimés à environ 25 G€. Leur financement est apporté par une subvention annuelle constante de 740 M€. Cette subvention couvre le coût des opérations d'A&D proprement dites mais également celui de la surveillance des installations à l'arrêt en attente de démantèlement, qui est en augmentation constante du fait de l'allongement des opérations d'A&D.

Le CEA est ainsi contraint d'effectuer une priorisation des chantiers de démantèlement et il en a exposé les principes à la Commission. L'objectif principal poursuivi est la réduction du risque radiologique, c'est à dire la réduction du terme source mobilisable, aux dépens des opérations d'assainissement complet et de la déconstruction des bâtiments.

Les travaux de démantèlement mobilisent d'importants moyens humains et logistiques ; la continuité de leur plan de charge et de leur financement est essentielle si l'on veut atteindre et maintenir un niveau d'efficacité suffisant. On peut craindre que le report de nombreuses opérations de démantèlement soit de nature à affaiblir la compétence technique et industrielle disponible, tout en augmentant les coûts de surveillance et de maintien en sûreté des installations à démanteler.

La Commission considère que la priorité mise sur la réduction du risque radiologique est manifestement pertinente du point de vue de la sûreté.

La Commission exprime sa préoccupation devant le report ou l'allongement continu des opérations complètes de démantèlement.

2.2 LE TRAITEMENT DES DECHETS ISSUS DES OPERATIONS D'ASSAINISSEMENT ET DEMANTELEMENT

Un point détaillé des travaux sur la gestion des déchets TFA figurait dans le précédent rapport (n°13) de la Commission. Conformément à la demande de cette dernière, un état d'avancement des études lui a été présenté cette année.

2.2.1 Des estimations de volumes de déchets à parfaire

Les déchets radioactifs correspondant à l'ensemble des installations nucléaires en arrêt ou en service, comprendraient en volume 94 % de déchets TFA et FMA-VC, 4,2 % de déchets FA-VL, le reste étant composé de MA-VL à hauteur de 1,6 % et de déchets HA pour moins de 1 % (scénario SR1, Inventaire national des matières et des déchets radioactifs, Andra 2018). Les déchets de démantèlement constituent une partie importante de cet ensemble, ils sont composés à plus de 99 % de déchets TFA ou FMA-VC. S'agissant de l'ensemble des déchets à gérer, les prévisions de production de déchets de l'Inventaire national de l'Andra ont été multipliées par 2 depuis 2003.

Le cas particulier des déchets TFA est important car, en l'absence de procédés de recyclage qui restent à mettre au point et à encadrer au plan réglementaire, ils nécessiteraient des installations d'entreposage de taille importante. Le volume de TFA, à l'arrêt du parc actuel, est, selon l'inventaire national de 2018, estimé entre 2 100 000 et 2 300 000 m³ quel que soit le scénario d'évolution du parc envisagé.

La loi du 8 novembre 2019 relative à l'énergie et au climat reporte à 2035 la réduction à 50 % de la part du nucléaire dans la production d'électricité, au lieu de 2025 comme prévu dans la loi TECV promulguée en 2015. Ce report ne supprime en rien la nécessité de mettre au point sans délai les modalités de préparation, de mise en œuvre et du financement du démantèlement des quatorze réacteurs à eau pressurisée de 900 MWe d'EDF, tel que prévu dans la PPE.

La Commission recommande que la chronique prévisionnelle de production des déchets TFA soit mise à jour pour prendre en compte le calendrier d'arrêt de réacteurs REP prévu par la PPE.

2.2.2 La réduction des volumes de déchets nucléaires issus des opérations d'assainissement démantèlement

C'est la future destination du foncier des installations démantelées qui détermine l'état radiologique final attendu de l'emprise des installations actuelles. La définition de cette destination future est primordiale car elle conditionne le volume des déchets et le coût des opérations.

Une très bonne connaissance de l'état des installations, de leur historique d'exploitation et d'arrêt, confortée par des investigations approfondies, permettrait d'affiner le zonage de déchets et de classer des volumes considérables en déchets conventionnels. Plusieurs expériences ont déjà été réalisées par le CEA et EDF pour optimiser le zonage de leurs installations et faciliter le déclassement des zones de production de déchets nucléaires lors du démantèlement. Dans certains cas, une décontamination surfacique des structures (en place ou après démontage) pourrait conduire à une réduction significative du volume de déchets radioactifs produits et donc des coûts associés. Rappelons qu'il est important, dans ce cadre, de disposer d'instruments de mesure adaptés et de procédures dûment validées.

Les opérations d'assainissement démantèlement produisent, à côté de la part largement majoritaire en volume des déchets TFA, une quantité significative de déchets FAVL. Cela renforce encore la nécessité de définir des solutions de stockage pour les déchets de cette catégorie. La question du devenir des déchets FAVL est abordée au chapitre suivant.

2.2.3 L'augmentation des capacités de stockage des déchets TFA

La capacité du Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (CIRES) à Morvilliers-La Chaise dans l'Aube, est actuellement de 650 000 m³ et faute d'une extension, le site pourrait être saturé vers 2028. Des études ont conclu à la possibilité de porter la capacité à 900 000 m³ (voire 950 000 m³) grâce à l'amélioration de la conception des alvéoles. Cette évolution devrait permettre de couvrir les besoins jusque'en 2038.

Les études de l'Andra montrent par ailleurs qu'un deuxième site pourrait être créé dans la communauté de Soulaines-Dhuys. Le volume des déchets TFA stockable pourrait alors augmenter d'environ 1 000 000 m³. Pour une large part, les besoins de stockage des déchets de démantèlement de l'ensemble du parc actuel pourraient ainsi être couverts.

La Commission encourage vivement l'Andra à poursuivre les travaux concernant les procédés visant à réduire le volume des déchets TFA, ainsi que l'extension des capacités d'entreposage de ces déchets.

2.2.4 Les études relatives au recyclage des déchets TFA métalliques

La voie la plus prometteuse pour le recyclage éventuel des déchets TFA concerne les déchets métalliques. Ces derniers représentent un gisement de plusieurs centaines de milliers de tonnes. Le démantèlement d'Eurodif produira plus de 100 000 tonnes d'acier et les générateurs de vapeur des réacteurs électronucléaires représentent environ 90 000 tonnes d'acier. La décontamination et le recyclage de ces déchets permettrait de les valoriser tout en réduisant les besoins en stockage.

Orano a présenté à la Commission à l'automne 2019 l'avancement de ses travaux sur une installation de fusion-décontamination. La fusion des métaux concernés permet d'homogénéiser le matériau et donc de contrôler de manière fiable son niveau de radioactivité après fusion. La faisabilité technique est démontrée. Cependant, la mise en œuvre d'un tel procédé nécessiterait une évolution de la réglementation.

28

Début 2020, une décision commune de la ministre de la transition écologique et solidaire et du président de l'Autorité de sûreté nucléaire, consécutive au débat public sur le PNGMDR, a indiqué que « Le Gouvernement fera évoluer le cadre réglementaire applicable à la gestion des déchets de très faible activité, afin d'introduire une nouvelle possibilité de dérogations ciblées permettant, après fusion et décontamination, une valorisation au cas par cas des déchets radioactifs métalliques de très faible activité. »

Selon Orano, une telle activité de recyclage des déchets TFA métalliques ne pourra être lancée que si les conditions, notamment réglementaires, qui seront fixées pour cette activité conduisent à des coûts inférieurs ou égaux aux coûts de stockage direct des déchets.

La Commission considère que la réduction du volume de déchets TFA à stocker est un enjeu très important. À ce titre, les travaux sur la décontamination des déchets métalliques, ainsi que leurs conditions de recyclage, pourraient permettre de diminuer utilement les volumes à gérer. La Commission recommande en conséquence une concertation des acteurs de la filière pour proposer un projet fondé sur la technologie acquise et sur l'évolution réglementaire associée.

2.3 CONCLUSION

Compte tenu du nombre d'installations en phase d'A&D actuellement et du nombre de réacteurs REP dont l'arrêt est prévu par la PPE, la Commission souligne l'importance d'une politique de démantèlement adaptée à la destination spécifique ultérieure des emprises de chaque installation et la nécessité d'établir un calendrier des opérations optimisé et, par ailleurs de disposer de sites de stockage appropriés, tout en favorisant la réduction des volumes à stocker et leur recyclage, quand cela est possible.

CHAPITRE III : LA GESTION DES DECHETS FAVL

La Commission considère depuis plusieurs années que la gestion des déchets de faible activité à vie longue (FAVL) est un problème important. Elle en a évoqué les différents aspects dans ses précédents rapports. Elle constate aujourd'hui que les avancées sur ce dossier sont maigres et que pour l'instant le dossier est remis à plat. Avant d'analyser les acquis de l'Andra, la Commission rappelle le contexte réglementaire et les fondements scientifiques sur lesquels repose la gestion des FAVL.

3.1 LES DECHETS CONCERNES

Les déchets FAVL français sont très variés. Ils comprennent notamment des déchets radifères, des déchets uranifères et thorifères, des déchets graphite, des déchets bitumés, ou des sources scellées utilisées dans l'industrie. Une partie de ces déchets provient de l'héritage d'activités industrielles passées dont les sites sont à assainir. Leur activité massique est relativement faible : environ 400 Bq/g en radionucléides émetteurs alpha et plusieurs dizaines de kBq/g pour les émetteurs bêta à vie longue (radium 226 : 1600 ans et ses descendants dont le radon, carbone 14 : 5 630 ans, chlore 36 : 300 000 ans). Ils ne dégagent pas de chaleur.

Leur volume total est important. Une estimation retenue par l'ASN en 2016 était proche de 90 000 m³. Cette estimation est sujette à évolution notamment en raison du déclassement de certains déchets MAVL en FAVL et pourrait atteindre 250 000 m³. Ce sont à la fois leur faible degré de dangerosité et leur grand volume qui justifient l'existence de cette catégorie de déchets et la recherche d'un exutoire adapté.

Selon les recommandations de l'AIEA, les déchets FAVL requièrent un degré d'isolement et de confinement supérieur à celui garanti par un stockage en surface en raison de leur contenu en radionucléides à vie longue. Leur radioactivité n'atteindra des niveaux acceptables pour banalisation que bien au-delà de la période de temps de 300 ans retenue pour un stockage de surface de déchets à vie courte.

Le concept de stockage à faible profondeur (typiquement plus de 30 mètres) offre une capacité de confinement supérieure à celle d'un stockage en surface car l'épaisseur de la couverture géologique existante, ou celle de la couverture remaniée mise en place, augmente la capacité de rétention du stockage et retarde la migration des radionucléides. En outre, la profondeur diminue le risque d'intrusion humaine par rapport à une installation implantée en surface. Dans l'état actuel des connaissances, un stockage souterrain à faible profondeur permettrait l'isolement et le confinement de déchets FAVL. En l'absence de solution spécifique, ces derniers devraient rejoindre un stockage profond.

La diversité de ces déchets conduit les producteurs à les classer en familles susceptibles de bénéficier de stockages adaptés à leurs caractéristiques.

La Commission note qu'en raison de la diversité des déchets FAVL, il n'est plus envisagé de les accueillir tous dans un même site. Chaque famille de déchets bénéficierait ainsi de modalités de stockage spécifiques tenant compte de leurs compositions chimiques, radiologiques et des risques associés. Elle recommande d'établir au plus vite les volumes prévisionnels des différentes familles.

3.2 CONTEXTE REGLEMENTAIRE ACTUEL

Les textes traitant du stockage à faible profondeur sont d'un niveau très général et se limitent aux grands principes. La commission internationale de protection radiologique (CIPR) traite du sujet dans sa publication 81 (1998) ; elle recommande de garantir l'équité intergénérationnelle en offrant aux générations futures le même degré de protection qu'aux générations actuelles. Dans la mesure où un stockage à faible profondeur est situé dans un contexte environnemental où la biosphère est facilement accessible, la protection fournie par ce stockage doit être garantie pour des durées en relation avec celle des déchets à vie longue qui y sont déposés.

L'ASN a publié en 2008 un document donnant « les orientations générales de sûreté en vue d'une recherche de site pour le stockage des déchets de faible activité massive à vie longue ». Ce document a pour objet de « définir les orientations générales qui doivent être retenues pour les phases de recherche d'un site et de conception d'une installation de stockage de déchets FAVL afin d'en assurer la sûreté après sa fermeture ». Il y est clairement stipulé « qu'après fermeture, la protection de la santé des personnes et de l'environnement ne doit pas dépendre d'une surveillance et d'un contrôle institutionnel qui ne peuvent être maintenus de façon certaine au-delà d'une période limitée ». Après fermeture, la sûreté est donc assurée de façon passive. Le document précise aussi « qu'il sera nécessaire de limiter l'activité à vie longue pouvant être reçue dans l'installation ».

L'ASN a engagé fin 2018 une révision de la note d'orientation générale de sûreté de 2008 avec comme objectif de la faire évoluer et de la transformer en guide de sûreté de l'ASN. Un groupe de travail a pour cela été mis en place dans le cadre des orientations stratégiques définies par le PNGMDR 2016-2018.

32

La majeure partie des déchets FAVL est déjà produite. Un inventaire complet et leur caractérisation fine sont des préalables incontournables à la définition d'une politique de gestion. En effet, c'est sur cette base qu'ils peuvent être triés et répartis par famille en tenant compte des volumes à gérer et des limites d'exploitation autorisées pour les différents stockages disponibles.

3.3 L'APPROCHE GENERALE DE SURETE

La démarche de sûreté prescrite par l'ASN doit, bien entendu, être respectée. Elle se base essentiellement sur une démonstration déterministe de la sûreté, complétée par des exigences de conception comme la robustesse et la défense en profondeur. Ce type de démarche débouche sur la fixation d'un terme source autorisé qui permet de déterminer la quantité de déchets stockés selon leur activité radiologique. Ainsi, ce paramètre ne permet pas d'exploiter complètement le volume d'une installation de stockage et peut le limiter fortement, voire le réduire à un niveau remettant en question l'utilité même de la construction du stockage. Pour mieux en apprécier la portée, il faudrait connaître la probabilité d'occurrence des scénarios à partir desquels le terme source autorisé est calculé et leurs conséquences.

Compte tenu du faible niveau d'activité des déchets FAVL et d'un retour possible de radionucléides à la biosphère, la Commission considère qu'une démonstration de sûreté attachée à un stockage de tels déchets s'enrichirait à s'appuyer sur une analyse des risques encourus.

Compte tenu du fait que les stockages sont des ressources rares, la Commission considère qu'il serait également judicieux d'optimiser l'utilisation de la capacité des stockages en activité et en volume.

3.4 LES ETUDES PREALABLES AU STOCKAGE

Le développement d'un stockage à faible profondeur peut s'appuyer sur l'expérience acquise au cours de l'étude et de la réalisation des projets de stockage en surface ou en profondeur. Il présente cependant des aspects spécifiques nécessitant une démarche de R&D dédiée.

La Commission recommande que la gestion des déchets FAVL soit conduite selon les méthodes de la recherche opérationnelle telles que classiquement appliquées pour la résolution des problèmes complexes. La recherche d'un optimum global de gestion associé à l'utilisation des capacités de stockage des sites disponibles ou envisagés et des coûts associés devrait faire partie intégrante de la démarche.

La caractérisation fine des déchets est, comme dit ci-dessus, un élément clé de leur gestion. Des efforts importants ont déjà été réalisés pour la caractérisation des déchets graphites par EDF (contenu en chlore 36) et sont en cours pour la caractérisation des déchets bitumes MAVL par le CEA (possibilité de reclassement d'une partie en FAVL). Il s'agit d'actions ciblées nécessitant des efforts de recherche. Ces efforts correspondent à des enjeux économiques évidents car un manque de caractérisation conduit inévitablement à la sous- ou sur-utilisation de capacités de stockage, soit en profondeur, soit en surface.

33

La Commission recommande que l'effort de caractérisation déjà entrepris soit élargi à tous les déchets susceptibles d'être stockés à faible profondeur, afin d'évaluer le niveau de protection requis pour leur stockage.

La capacité de confinement des déchets repose en général sur trois barrières, le colis de déchets si les déchets sont conditionnés, la couverture du stockage qui constitue la barrière ouvragée et la barrière géologique. Le premier apport d'une installation en profondeur, par rapport à un stockage en surface, est lié au niveau de confinement supplémentaire offert par cette dernière.

La Commission souligne que le renforcement de la capacité à retarder le relâchement et la migration des radionucléides mérite un effort de recherche systématique, notamment au niveau du choix de la roche hôte, des matériaux de conditionnement et de couverture. En cas de couverture remaniée, la Commission recommande d'étudier la possibilité d'utiliser des éléments augmentant la capacité de rétention du matériel de couverture.

La mise en profondeur des déchets accroît la capacité de leur isolement et diminue la probabilité d'intrusion.

La Commission recommande que la diminution attendue de la probabilité d'intrusion pour la profondeur choisie soit étayée par des études appropriées.

3.5 CONCLUSION SUR LES ACQUIS DE L'ANDRA

En application de la loi de programme du 28 juin 2006, l'Andra a lancé en 2008 une recherche de sites potentiellement favorables pour y implanter un stockage des déchets graphites et radifères. Cette démarche n'a pas abouti. Suite à cet échec, le HCTISN a décidé en 2009 la constitution d'un groupe de travail pour étudier les causes de l'échec, en tirer les leçons et formuler des recommandations qui ont été publiées dans un rapport en 2011. Ces recommandations portent notamment sur la sélection de site, le calendrier et les responsabilités, en particulier celles de l'Etat.

Sur la base de ces recommandations, l'Andra a réorienté ses travaux et a produit différents rapports d'étape en 2012, 2015 et 2018. La Commission les a évalués dans ses précédents rapports. Le sujet a également été traité dans le cadre du PNGMDR. Actuellement, l'Andra examine la possibilité de créer un stockage à faible profondeur dans la communauté de communes de Vendeuve-Soulaines, à proximité des sites qu'elle exploite déjà (CSA et Cires). La Commission a été informée des dernières réflexions de l'Andra lors de l'audition du 12 mars 2020. Ces réflexions vont dans le sens de la définition d'une « stratégie des filières de gestion de déchets » déclinée selon trois axes : la cohérence globale en matière de sûreté et de bonnes pratiques environnementales, l'exhaustivité au regard de l'inventaire des déchets à gérer, et enfin la proportionnalité des efforts consentis à la dangerosité des différents types de déchets.

34

Cette année l'Andra n'a pas informé la Commission de l'actualisation des connaissances acquises sur le terrain.

La Commission encourage l'Andra à poursuivre sa stratégie et à entreprendre les études et développements nécessaires à sa mise en œuvre. Elle recommande également aux acteurs institutionnels concernés de mettre en place la concertation indispensable pour faire face de façon cohérente aux multiples enjeux du stockage des déchets FAVL, parfois contradictoires.

La Commission souligne l'urgence de l'identification d'un ou plusieurs sites dédiés aux FAVL et elle demande que lui soit présenté l'an prochain un état détaillé des progrès obtenus depuis le rapport d'étape 2018.

CHAPITRE IV : CIGÉO

Le stockage en couche géologique profonde est aujourd'hui considéré sur le plan international comme la solution de référence pour gérer les déchets radioactifs de haute activité et à vie longue (HAVL) et de moyenne activité et à vie longue (MAVL). Cette solution s'appuie sur des bases scientifiques éprouvées. Elle est la seule aujourd'hui réalisable et capable de répondre aux enjeux de sûreté à long terme tout en prenant en compte les contraintes de réversibilité. Un élément fondamental en est la « barrière géologique ». Sa fonction est de retarder la migration des radionucléides contenus dans les déchets sur une échelle de temps compatible avec leurs périodes de décroissance radioactive afin que leur éventuel retour à la biosphère soit sans conséquence. L'objectif est de maintenir les déchets, sans nécessité d'intervention humaine, à l'abri des risques d'instabilité de nos sociétés.

La PPE prend comme solution de référence en France le stockage en couche géologique profonde comme décidé par la Loi n°2006-739, transcrite dans le code de l'environnement. Le projet Cigéo est une réponse à cette loi. Il a pour objectif la conception et la construction d'un stockage géologique réversible des déchets radioactifs HAVL et MAVL inscrits au Programme industriel de gestion des déchets (PIGD). Le stockage est conçu pour être réalisé à 500 mètres de profondeur dans la couche d'argilite du Callovo-oxfordien (Cox) du Bassin parisien, épaisse d'environ 130 mètres dans les départements de la Meuse et de la Haute-Marne. Le projet Cigéo a vu le jour après des études et recherches menées durant plus d'une vingtaine d'années, notamment dans le laboratoire souterrain de Bure, qui ont démontré l'excellente aptitude du Cox à accueillir les installations de stockage, à isoler les déchets, puis à confiner les radionucléides.

La Commission rappelle qu'elle considère que l'Andra a établi le socle de connaissances nécessaire pour conduire le projet Cigéo, que la démonstration de la qualité du site a été faite, et que les options technologiques de stockage ont été consolidées. La maturité scientifique du projet Cigéo permet à présent d'envisager sur des bases solidement étayées son développement technologique en vue de l'autorisation de création.

35

La Loi n°2016-2015 précise les modalités de création de Cigéo. Elle prévoit une phase industrielle pilote et introduit le principe de réversibilité qui doit être garantie durant la phase d'exploitation. La construction et l'exploitation de Cigéo devraient durer environ 150 ans, période pendant laquelle de nombreuses évolutions techniques, environnementales et politiques auront lieu. Ces dernières pourront amener les générations futures à modifier le projet Cigéo conformément au principe de réversibilité et, par exemple, à faire évoluer son calendrier, l'inventaire des déchets stockés ou sa conception.

La Commission attire l'attention sur la nécessité pour l'ANDRA de spécifier, dès la conception, une configuration de référence, fondée sur les connaissances scientifiques et les capacités technologiques du moment, en cohérence avec l'inventaire de référence des déchets.

La Commission souligne l'urgence de définir un cadre opérationnel pour la maîtrise des évolutions de Cigéo, dès maintenant et pour la phase d'exploitation qui s'étalera sur 150 ans. Elle recommande que l'Andra se dote d'une procédure formalisée de gestion de configuration de Cigéo au cours du temps, appuyée sur la définition exhaustive et détaillée de l'installation dans une maquette numérique, afin d'éviter qu'une évolution puisse, en particulier, affecter la sûreté du stockage.

Le présent chapitre rend compte des avancées scientifiques et techniques de l'Andra dans le cadre de la procédure de certification du projet Cigéo.

4.1 LES GRANDS JALONS DU PROJET EN 2020

Une partie significative des auditions de l'Andra par la Commission a été consacrée cette année à la progression des deux principales procédures administratives dont l'aboutissement est nécessaire au démarrage effectif du projet Cigéo : la déclaration d'utilité publique (DUP) et la demande d'autorisation de création (DAC). Ces deux procédures sont très encadrées par la loi ; elles nécessitent l'élaboration d'un dossier très volumineux ainsi que l'obtention d'un grand nombre d'avis. En complément de la DUP et de la DAC, l'Andra prévoit une centaine de procédures administratives à mener à bien pendant la durée totale du projet, avec une durée d'instruction moyenne de l'ordre d'une année.

4.1.1 La déclaration d'utilité publique

La déclaration d'utilité publique vise quatre objectifs principaux :

- affirmer à un haut niveau (décret signé par le Premier ministre) le soutien politique de l'État au projet ;
- permettre l'expropriation, si nécessaire, des terrains indispensables au projet pour obtenir la maîtrise foncière ;
- permettre la réalisation d'aménagements préalables avant la DAC ;
- permettre la mise en conformité des documents d'urbanisme applicables sur la zone de Cigéo.

Le dossier établi par l'Andra est d'environ deux mille pages. Conformément à la réglementation, il porte sur les opérations relevant de la maîtrise d'ouvrage Andra (réalisation des installations du stockage en surface et en profondeur ainsi que des liaisons : liaisons intersites de surface, liaisons surface-fond et installation terminale ferroviaire embranchée). D'autres parties du projet Cigéo, réalisées sous la maîtrise d'ouvrage d'autres opérateurs (alimentation électrique, adduction d'eau, mise à niveau de la ligne ferroviaire 02 7000, déviation de la route départementale 60/960...) feront chacune l'objet d'une procédure de déclaration d'utilité publique spécifique.

L'étude d'impact du projet Cigéo, pièce maîtresse de tous ces dossiers, est commune à toutes les procédures et couvre l'ensemble du projet Cigéo. Elle sera jointe à tous les dossiers d'autorisation successifs élaborés par l'Andra et par les maîtres d'ouvrage associés. L'Andra prévoit de l'actualiser chaque année.

La méthode suivie consiste à identifier les impacts potentiels (environnementaux, économiques, sociaux) de Cigéo sur son environnement. L'étude d'impact doit ensuite détailler la mise en œuvre de la démarche « éviter, réduire, compenser ». Il s'agit, en priorité, d'éviter la plus grande partie des impacts identifiés grâce à des modifications du projet, de prendre ensuite des mesures pour réduire les impacts n'ayant pu être totalement évités et enfin d'instruire des mesures de compensation pour les impacts restants.

Le calendrier annoncé par l'Andra pour le dossier de DUP, avant la crise sanitaire générée par la propagation du SARS-CoV-2, était le suivant :

- remise du dossier à l'autorité compétente (le préfet coordinateur de la Meuse) au printemps 2020, après une phase de pré-instruction du projet par les administrations concernées ;
- enquête publique prévue au deuxième semestre 2020 ;
- décret du Premier ministre, après avis du Conseil d'Etat, espéré mi-2021.

La Commission constate que l'Andra a consenti de grands efforts pour produire un dossier répondant au mieux aux attentes des autorités et des acteurs locaux. Elle a en particulier produit l'étude d'impact grâce à de nombreuses concertations menées avec l'ensemble des parties prenantes.

4.1.2 La demande d'autorisation de création

Le dossier de demande d'autorisation de création (DAC) est en cours de finalisation par l'Andra. Les différents éléments qui le composent seront examinés par l'Autorité de sûreté. La durée d'instruction de la demande varie de trois à cinq ans, tel qu'il ressort des présentations faites à la Commission.

Sur le plan industriel et technique, le dossier est fondé sur l'avant-projet définitif (APD) de Cigéo qui a été achevé en 2019 sous la maîtrise d'ouvrage de l'Andra avec l'appui des maîtres d'œuvre industriels. Des études techniques se poursuivent toutefois, par exemple concernant des variantes de construction d'alvéoles MAVL susceptibles de recevoir des déchets bitumés.

37

A la date de rédaction de ce rapport, le calendrier général du projet prévoit un dépôt du dossier de DAC fin 2020, une enquête publique courant 2023, un Décret d'autorisation de création (le DAC) en 2025, puis enfin la descente du premier colis actif entre 2035 et 2040.

La Commission constate que ce nouveau calendrier est assorti d'avancées indéniables dans la maturité du dossier, en particulier dans la manière dont les sujets scientifiques et techniques seront documentés. La Commission estime cependant qu'un travail significatif reste à accomplir pour répondre à toutes les demandes émises par l'Autorité de sûreté, par son appui technique l'IRSN, et par la Commission elle-même.

Il est du reste prévu qu'une partie du travail ne soit achevée que pendant la période d'instruction, ce qui n'est pas gênant dans la mesure où le Décret d'Autorisation de Création pourra en tenir compte.

Depuis plusieurs années, la date de dépôt du dossier de DAC est régulièrement repoussée. La Commission s'interroge sur la maîtrise du calendrier conduisant au dépôt de la DAC, notamment depuis la fin de l'APD.

De nombreux aléas, notamment de procédure, sont susceptibles d'affecter le déroulement du projet et la Commission considère très souhaitable qu'un calendrier directeur unique (inévitavelmente évolutif) soit établi, communiqué et géré avec le plus de rigueur possible par l'Andra. C'est un des objectifs du plan directeur d'exploitation (PDE), proposé en 2016 en amont de la DAC. Ce document est utile et détaillé, mais la fréquence quinquennale de sa mise à jour est insuffisante pour en faire un outil de pilotage opérationnel du projet.

Dans son rapport de 2019, la Commission avait attiré l'attention sur l'extrême complexité de la procédure administrative préalable à la construction et à la mise en exploitation de Cigéo. Elle avait émis la crainte que l'empilement des autorisations requises et des procédures associées conduise à des délais importants dans la réalisation du stockage, voire à la perte progressive de compétences. La Commission ne peut cette année que renouveler cette observation et recommander que les réflexions en cours sur la gouvernance du projet soient conduites avec le souci de ne pas alourdir davantage les processus de prises des décisions.

4.2 GOUVERNANCE

38

Le projet Cigéo a été un des principaux sujets de controverse au cours du débat public qui a été organisé par la Commission nationale du débat public (CNDP), pendant l'année 2019 sur le Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR). La décision publiée conjointement par la ministre de la transition écologique et solidaire et le président de l'Autorité de sûreté nucléaire à l'issue de ce débat public en prend acte. Elle place explicitement les leviers majeurs de la gouvernance de Cigéo sous la tutelle de l'instance de gouvernance du PNGMDR : le groupe de travail (GT) du PNGMDR. Ces leviers concernent essentiellement les conditions de la mise en œuvre de la réversibilité, l'élaboration de la gouvernance et la définition des objectifs et des critères de réussite de la phase industrielle pilote.

Le GT PNGMDR, co-présidé par le sous-directeur de l'industrie nucléaire à la DGEC et le président de l'Autorité de sûreté nucléaire, rassemble aujourd'hui essentiellement les représentants des exploitants et des associations de défense de l'environnement. Un élargissement du GT est prévu aux élus de la nation, à la société civile, et aux représentants des collectivités territoriales.

La Commission prend acte de la décision qui confie à une instance de concertation le pilotage de la gouvernance du projet Cigéo. Elle recommande cependant que cette instance assure pleinement son rôle mais avec le souci de ne pas amoindrir ou diluer l'autorité et la responsabilité de l'Andra, en tant que maître d'ouvrage du projet, vis-à-vis du gouvernement.

Par ailleurs, la première édition du plan directeur d'exploitation (PDE) de Cigéo date d'avril 2016 et sa première mise à jour doit être produite dans le dossier de la DAC fin 2020 (ce qui est cohérent avec le rythme de mise à jour prévu par la loi).

L'ampleur du PDE et sa procédure de validation complexe sont appropriées pour traiter des enjeux stratégiques, mais peu adaptées au pilotage opérationnel du projet.

La Commission recommande qu'un niveau de gouvernance autonome et adapté au pilotage opérationnel du projet soit mis en place sous l'autorité de l'Andra, maître d'ouvrage. Elle préconise une organisation donnant la responsabilité d'une action à l'entité compétente la plus à même de la réaliser afin que les décisions courantes nécessaires à la conduite du projet puissent être instruites et prises sans retard, charge à l'Andra d'en rendre compte au niveau approprié.

Le principe de réversibilité implique également l'analyse et l'évaluation des nouvelles solutions techniques qui pourront être proposées durant la phase d'exploitation pour faire évoluer le projet Cigéo.

La Commission rappelle qu'elle doit être consultée sur tout point relevant de la réversibilité comme le prévoit la loi de 2016. Plus généralement, la Commission pourra évaluer les études et recherches qui seraient consacrées à des solutions alternatives au stockage géologique des déchets HAVL et MAVL.

4.3 ASPECTS SOCIO-ECONOMIQUES

39

4.3.1 Coûts et étude socio-économique

Le chiffrage du coût de Cigéo ne comporte pas d'élément nouveau par rapport à ceux qui avaient été présentés dès 2016 et déjà analysés dans les rapports précédents de la Commission. Sa mise à jour est en cours, en cohérence avec l'élaboration du dossier de la DAC, pour une publication en 2021. L'ordre de grandeur du coût des ouvrages nécessaires pour la mise en service de Cigéo serait de 5 milliards d'euros (installations de surface, liaisons surface-fond, premiers alvéoles) tandis que celui de la construction des tranches ultérieures serait de 6 milliards d'euros. Ces coûts ne comprennent pas ceux liés à l'exploitation (opérations, maintenance, personnel) de Cigéo, ni les taxes. Les études d'adaptabilité sont conduites sur la base de trois scénarios d'évolution du parc nucléaire français. Deux d'entre eux substituent des combustibles usés aux déchets HAVL prévus aujourd'hui dans l'inventaire de référence. Différents groupes de travail ont été mis en place et les réflexions sont en cours. Un séminaire sur les prix unitaires est également prévu avant consolidation des résultats dans un groupe de travail « chiffrage ». L'estimation des coûts de fonctionnement s'appuiera notamment sur les travaux d'un groupe de travail « effectifs ».

Au travail réalisé par ces groupes s'ajoute l'évaluation socio-économique, actuellement en cours et prévue par le décret 2013-1211, qui vise à estimer les coûts et les bénéfices économiques, sociaux et environnementaux du projet Cigéo par rapport aux solutions alternatives. La méthodologie suivie pour cette évaluation consiste à chiffrer les avantages associés au stockage en couche géologique profonde, pour comprendre si ces avantages sont à la hauteur du coût objectif de Cigéo, fixé à 25 milliards d'euros en 2016. Ainsi, l'objectif de l'évaluation socio-économique est de déterminer si la solution de stockage Cigéo est optimale pour la société, en remplissant sa fonction de protection de l'homme et de l'environnement au regard de la dangerosité des déchets radioactifs. Dans ce cadre, l'option où l'on réalise le projet Cigéo est

comparée à trois options alternatives dont une décrivant la situation qui prévaudrait si Cigéo n'était pas réalisé :

- Option 1 : réalisation du projet Cigéo tel que prévu par l'Andra en réponse à la loi ;
- Option 2 : réalisation de Cigéo avec en parallèle un effort de recherche sur des solutions alternatives pour les seuls déchets HAVL ;
- Option 3 : réalisation de Cigéo avec en parallèle un effort de recherche sur des solutions alternatives pour les déchets HAVL et les déchets MAVL ;
- Option 4 : efforts de recherche sur les solutions alternatives pour les déchets HAVL et MAVL sans investissement sur le projet Cigéo. Cette dernière option correspond en réalité à un entreposage indéfiniment renouvelé.

Les coûts et bénéfices sont évalués pour chaque option dans un cadre probabiliste de long terme. La sensibilité des coûts est analysée en fonction de différents paramètres, notamment les coûts unitaires, le Produit intérieur brut, l'incertitude sociétale ou encore le temps. Les résultats de cette évaluation seront rendus publics au dernier trimestre de 2020.

La Commission considère que ce cadre méthodologique répond de façon complète à la question de la prise en compte de l'incertitude dans le cadre de l'étude des alternatives à Cigéo. Elle demande que les résultats de l'évaluation socio-économique lui soient présentés dès que possible.

4.3.2 Organisation industrielle

40

L'organisation industrielle active pour le projet Cigéo pendant la phase d'avant-projet détaillé APD a terminé l'essentiel de sa mission en 2019. Les prochains travaux réellement significatifs sur le projet seront lancés par le décret d'autorisation de création qui ne sera probablement pas pris avant 2025. D'ici là, l'activité industrielle va être réduite à l'accompagnement de l'instruction de la DAC et à la conduite de travaux d'aménagement préalables, dont seule une partie relève de la maîtrise d'ouvrage de l'Andra.

Dans ces conditions, les industriels impliqués, même s'ils maintiennent une équipe réduite, vont très probablement redéployer une grande partie des personnels ayant contribué au projet. On peut donc redouter une certaine évaporation des compétences acquises dans les phases précédentes, au moins pour les aspects spécifiques au projet Cigéo. Par ailleurs, il est important que l'Andra se réserve la propriété intellectuelle de l'ensemble des connaissances scientifiques et techniques de toute nature qui ont été acquises par les sous-traitants.

L'Andra a indiqué à la Commission qu'elle ne rappellera les maîtres d'œuvre sur le projet que lorsque l'instruction technique de la DAC lui permettra d'établir avec une précision raisonnable son calendrier d'aboutissement.

La Commission recommande à l'Andra d'établir un retour d'expérience sur l'organisation de la maîtrise d'œuvre (nombre de maîtres d'œuvre en particulier) en phase APD en vue de définir l'organisation qui sera retenue pour la phase de réalisation.

La Commission préconise notamment pour cette phase que l'organisation de la maîtrise d'œuvre soit telle que le nombre et le niveau des décisions qui remonteront à la maîtrise d'ouvrage soient cohérents avec ce qu'elle saura traiter efficacement.

Un manque de fluidité dans les décisions quotidiennes du chantier peut menacer gravement le calendrier du projet en permettant aux industriels de se dégager de leurs responsabilités.

4.3.3 Impact sur l'environnement et surveillance

La création de Cigéo et sa mise en fonctionnement auront des impacts environnementaux, négatifs comme la circulation de camions. Les impacts seront aussi positifs comme l'établissement d'un espace préservé, au niveau de la zone d'emprise, pour le développement de la biosphère. En conséquence, un plan de surveillance devra être mis en œuvre pour identifier les évolutions éventuelles et discriminer leurs origines. Dans ce domaine, l'Andra est forte de son expérience s'agissant des sites d'entreposage de déchets nucléaires. Pour le CSA ou le CSM, elle se soumet déjà à une réglementation et à un contrôle, stricts. Elle transmet chaque mois, à l'ASN et l'IRSN, un ensemble de mesures de suivi radiologique pour l'air et l'eau.

Selon l'étude d'impact préparée pour la DUP, une centaine de communes au total sont concernées, de près ou de loin, en raison de la longueur de la ligne électrique qui va être modifiée (130 km). Le projet prévoit de limiter la consommation d'eau de l'installation en utilisant le plus possible les eaux pluviales. Le besoin est de l'ordre de 500 m³ par jour en construction et 200 m³ en exploitation. La voie ferrée qui sera utilisée est aujourd'hui fermée. Sa réhabilitation permettra le trafic pour Cigéo, estimé à 4 allers-retours par jour, et, éventuellement l'accueil de quelques autres usagers. L'Andra souligne le coût élevé de ce poste (150 M€ sans les passages à niveau). La route à dévier est classée « à grande circulation ». Trois tracés sont aujourd'hui envisagés.

La démarche de surveillance que l'Andra entend déployer sur Cigéo montre sa volonté de transparence. La création de l'Observatoire pérenne de l'environnement (OPE) en témoigne. L'analyse des données collectées devra prendre en compte 1) la faible densité de la population qui pénalise la représentativité des résultats obtenus dans le cadre d'une analyse statistique ; 2) l'apparition tardive des effets induits lors de l'éventuelle exposition à une source radioactive ; 3) la superposition de plusieurs effets non aisément discriminables ; 4) les changements de mode de vie au cours du temps qui rendront plus difficile l'identification de l'origine d'un impact donné ; 5) l'évolution de la biodiversité principalement liée au changement du climat ; et 6) l'échelle de temps. Les études de surveillance sur le long terme sont complexes et le retour d'expérience sur des échelles de temps aussi importantes est réduit. Les méthodologies d'acquisition, de traitement et d'analyse des données gagneront à être explicitées en termes simples.

La Commission demande que l'Andra réalise des études approfondies sur l'impact socio-environnemental à moyen-long terme de Cigéo et explicite les résultats obtenus avec pédagogie.

4.4 INVENTAIRES ET REVERSIBILITE

La définition des inventaires guide la conception du stockage Cigéo qui doit être capable de recevoir tous les déchets HAVL et MAVL identifiés dans l'inventaire de référence. Pour autant, cet inventaire est susceptible d'évoluer pour accueillir des déchets inscrits à l'inventaire de réserve. L'inventaire autorisé de Cigéo au moment de la mise en service sera fixé par le Décret d'autorisation de création.

La définition des inventaires s'appuie à l'origine sur les principes suivants :

- la durée de fonctionnement des installations nucléaires existantes est de l'ordre de 50 ans ;
- le combustible usé des réacteurs électronucléaires en fonctionnement, ou futurs mais déjà autorisés, doit être intégralement retraité ;
- les déchets produits par un parc futur ne faisant pas l'objet dès maintenant d'une autorisation sont en dehors du périmètre de Cigéo.

Ces principes sont susceptibles d'être adaptés avec l'évolution de la stratégie industrielle et des politiques énergétiques de notre pays. Contrairement à d'autres, la France a fait le choix du retraitement du combustible usé et du recyclage, voire du multi-recyclage, des matières issues de ce retraitement. Cette stratégie conduit à la production d'une grande variété de déchets ultimes devant être stockés, notamment de type MAVL, ce qui rend plus complexe la conception de Cigéo, d'autant qu'elle est soumise au principe de réversibilité.

4.4.1 Réversibilité

Le code de l'environnement décline la réversibilité suivant quatre concepts : progressivité, flexibilité, adaptabilité et récupérabilité. La progressivité implique de pouvoir bénéficier des améliorations technologiques qui émergeront dans le futur ou encore de décaler dans le temps des tranches de construction de Cigéo ; la flexibilité garantit la capacité de tenir compte des incertitudes relatives aux colis de l'inventaire de référence et de revenir sur des options de conception pour renforcer la sûreté ; l'adaptabilité suppose d'être capable de stocker dans Cigéo, non seulement l'inventaire de référence, mais également des déchets de l'inventaire de réserve si cela s'avérait nécessaire ; la récupérabilité relève de la possibilité de retirer des colis de déchets déjà stockés jusque la fin de la phase d'exploitation. Ces différents éléments seront décrits dans la DAC et le PDE.

La Commission considère, comme elle l'a déjà fait dans ses rapports précédents, que les exigences de progressivité, flexibilité, adaptabilité et récupérabilité sont favorables pour faire évoluer, si cela s'avère pertinent, la conception de référence définie pour Cigéo.

4.4.2 Inventaire de référence et de réserve

L'inventaire de référence comprend environ 10 000 m³ de déchets HAVL et 73 000 m³ de déchets MAVL qui seront issus du fonctionnement et du démantèlement des installations nucléaires existantes, ou en cours de construction, y compris celles dédiées à la recherche.

L'inventaire de réserve complète cet inventaire de référence. Il comprend des déchets qui pourraient être également stockés dans Cigéo si nécessaire du fait de nouveaux choix de stratégie énergétique ou d'incertitudes liées au déploiement de nouvelles filières de gestion des déchets.

La Commission recommande que le rapport préliminaire de sûreté inclus dans la DAC de Cigéo soit établi avec l'inventaire de référence, et qu'il soit complété par une étude des impacts en matière de sûreté pour l'inventaire de réserve, ce afin de démontrer la robustesse de la conception de Cigéo aux évolutions futures de l'inventaire des déchets.

En particulier, il est aujourd'hui prévu de traiter et recycler tous les assemblages de combustible usé de sorte que ce sont les colis de verres issus de ce traitement-recyclage qui devront être stockés dans Cigéo. Si cette option venait à être revisitée, il faudrait s'assurer de la possibilité de stocker les combustibles usés et non traités dans Cigéo et compléter les études déjà entreprises sur ce sujet.

La Commission recommande, comme elle l'a déjà fait dans ses rapports précédents, de s'assurer que la R&D sur le comportement à long terme des assemblages de combustible usé permette de rassembler la connaissance nécessaire pour mener à bien l'analyse de sûreté de leur stockage dans Cigéo.

4.5 ENROBES BITUMES

Les déchets radioactifs bitumés sont des mélanges de bitumes avec des boues contenant des radionucléides issus de diverses catégories d'effluents et des quantités importantes de sels solubles ou non (nitrates de sodium et de magnésium, précipités préformés de ferrocyanure de nickel, hydroxydes de fer, de manganèse, de cuivre et d'aluminium, carbonates, sulfates, phosphates...). Le bitume est utilisé pour ses propriétés de confinement qui permettent d'incorporer une proportion plus grande de boues que dans une matrice cimentaire par exemple. Environ 75 000 fûts de 220 litres de déchets bitumés ont été produits depuis les années 1960 ; la production se poursuit actuellement, à une cadence très faible, avec l'accord des autorités de sûreté. Sur ce stock, 42 000 fûts, dont 13 000 entreposés à La Hague et 29 000 à Marcoule, sont aujourd'hui classés MAVL et font partie de l'inventaire de référence de Cigéo, dont ils représentent environ 18 % en nombre de colis.

A l'occasion de l'instruction du dossier d'options de sûreté (DOS) de Cigéo, l'ASN relayant l'IRSN, dans un avis de janvier 2018, a émis des réserves relatives à la maîtrise du risque d'incendie dans un alvéole MAVL contenant des colis de déchets bitumés. Cet avis recommande de privilégier la neutralisation préalable de la réactivité chimique des déchets bitumés, tout en poursuivant l'étude des modifications à apporter à Cigéo pour permettre le stockage en l'état de ces colis.

Dès 1997, la Commission avait soulevé la question des bitumes, qu'elle a rappelée en 2012. Dans son rapport 2018, elle a recommandé la création d'une commission internationale pour examiner plus précisément la problématique des bitumes. Cette recommandation a été suivie d'effet puisqu'un groupe de revue internationale a été mis en place dès l'été 2018 sur mandat conjoint du MTES et de l'ASN. Ce groupe a rendu ses conclusions en juin 2019.

Son rapport, publié sur le site de l'ASN, prend en compte l'état de l'art sur le plan international, les études conduites par le CEA, EDF, Orano et l'Andra, ainsi que les avis de l'IRSN. Le rapport identifie les études complémentaires à conduire pour déterminer la part des colis de déchets bitumés qui pourra être stockée en toute sécurité dans Cigéo, sur la base de connaissances plus précises que celles d'aujourd'hui.

Cela nécessite :

- que le CEA complète les études de réactivité des différentes catégories de déchets bitumés en réponse à des sollicitations thermiques, en effectuant quelques essais supplémentaires, des analyses plus fines des résultats et une validation approfondie de la modélisation des phénomènes ;
- que l'Andra achève l'adaptation de la conception des alvéoles MAVL pour permettre le stockage des déchets bitumés qui seront destinés à Cigéo dans les meilleures conditions de sûreté. Cela paraît faisable avec les techniques d'ingénierie disponibles actuellement.

Par ailleurs, le rapport recommande de poursuivre l'étude des procédés de neutralisation de la réactivité chimique des colis de déchets bitumés car on ne peut exclure que certains colis, mal connus, ne puissent satisfaire aux critères d'acceptation qui seront définis par l'Andra. En particulier, le rapport suggère d'examiner l'intérêt d'un procédé fondé sur la dissolution chimique des bitumes, dont le principe a été exploré par le SCK•CEN belge.

Par lettre du 11 Mai 2018, l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques avait demandé à la Commission de suivre les travaux de la revue internationale et d'informer le Parlement sur ses conclusions. Un membre de la Commission a donc suivi en tant qu'auditeur les réunions du groupe de revue. La Commission a ensuite examiné le rapport de la revue, sur lequel elle a émis un avis remis au Parlement en octobre 2019 (cf. Annexe VIII). Il souligne la pertinence des avis émis par le groupe de revue et préconise de mettre en œuvre sans tarder ses recommandations.

La Commission a entendu le CEA sur les actions qu'il envisage de mettre en œuvre. Le CEA a rappelé qu'il doit non seulement répondre aux recommandations issues de la revue, mais aussi à celles formulées dans la lettre de suite ASN/ASND de mai 2019, et celles exprimées par l'ASND seule, sur la base de l'expertise qu'elle avait commandée de son côté à l'organisme IFP Energies Nouvelles et au laboratoire SIMAP (Science et Ingénierie des MATériaux et Procédés) de l'université Grenoble Alpes.

L'élaboration d'un nouveau programme quadripartite avec les producteurs de déchets et l'ANDRA est en cours de discussion. Les grandes lignes de ce programme seront les suivantes :

- en ce qui concerne la maîtrise de la réactivité des bitumes, il s'agit de conforter la démonstration de l'absence d'impact sur la sûreté des réactions observées à des températures basses lors des essais de microcalorimétrie, d'établir des courbes enveloppes de réactivité, d'approfondir la validation des simulations numériques, de prendre en compte certains produits chimiques présents dans quelques cohortes de fûts et d'affiner la connaissance des effets de la radiolyse et des bulles d'hydrogène qu'elle produit ;
- en ce qui concerne les procédés de neutralisation de la réactivité chimique des bitumes, une étude de pré faisabilité sur un procédé de dissolution chimique sera entreprise. Le CEA estime en effet qu'un tel procédé ne serait pas pertinent pour la neutralisation de la totalité de l'inventaire, mais pourrait présenter des avantages si un nombre limité de fûts devait être traité.

Les travaux de ce deuxième programme quadripartite devraient débuter pendant l'été 2020 et durer 3 à 5 ans.

Par ailleurs, des travaux spécifiques sont à conduire avec Orano pour intégrer complètement les fûts d'enrobés bitumineux de La Hague au programme d'analyse proposé par le CEA (par exemple, examen de l'influence du sulfure de cobalt présent dans ces fûts).

Au-delà de la question du risque incendie, qui concerne la phase d'exploitation de Cigéo, les déchets bitumés posent également un problème spécifique de sûreté à long terme. En effet, après une centaine de milliers d'années environ, les alvéoles qui les contiennent seront saturés par l'eau provenant de l'argilite du Callovo-oxfordien. Or, les bitumes, particulièrement quand ils contiennent des sels, solubles ou non, sont sujets à un phénomène de reprise d'eau qui conduit à

un gonflement, lequel, après comblement de tout l'espace disponible, serait susceptible de produire une pression sur les parois de l'alvéole (plus de 40 MPa selon certaines études théoriques).

Le CEA considère que la simulation couplée et détaillée de tous les phénomènes accompagnant le gonflement n'est pas réalisable. Cependant, des simulations simplifiées montrent un endommagement du Cox sous l'effet du gonflement des bitumes, d'une ampleur limitée au regard de l'épaisseur totale de la couche. De plus, certains phénomènes importants sont négligés (comme le fluage du Cox) qui conduisent à considérer les calculs simplifiés comme pénalisants. Des travaux de simulation complémentaires sont prévus pour le confirmer.

Le CEA conduit également sur ce sujet des travaux expérimentaux en collaboration avec le SCK•CEN. Les expériences déjà réalisées en laboratoire, à volume contraint imposé, ont mis en évidence une pression atteinte de l'ordre de 20 MPa. Les résultats sont utilisés pour la validation d'un modèle de simulation en cours de développement par EDF.

La Commission a par ailleurs entendu l'Andra sur les évolutions de conception de Cigéo et la construction de la démonstration de sûreté. Les évolutions proposées comprennent le placement des fûts dans des conteneurs en ciment d'épaisseur 20 cm (au lieu de 12 cm) pour contenir l'échauffement et un agencement des colis en alvéole suivant 2 niveaux au lieu de 3, pour garder au-dessus un espace permettant d'intervenir si nécessaire pour récupérer des colis ou lutter contre la propagation d'un incendie. Un ensemble de simulations est en cours de réalisation par l'Andra sur deux scénarios d'incendie. L'un correspond à un feu d'équipement dans l'alvéole, et l'autre, au scénario hypothétique d'un emballement de réactions exothermiques à l'intérieur d'un fût pour une cause inconnue. Bien que ce second scénario soit considéré comme extrêmement improbable, l'ASN considère qu'il doit être étudié au titre de la défense en profondeur.

De plus, un dispositif de surveillance en cours d'étude s'appuie sur la mise en place de fibres optiques en voûte d'alvéole, dont il conviendra de démontrer l'efficacité et la pertinence au regard de la durée d'exploitation. Des dispositifs complémentaires d'intervention, en cas d'incendie, sont également à l'étude, dont l'intérêt devra également être confirmé.

Par ailleurs, le CEA a présenté à la Commission les résultats des essais réalisés sur des enrobés réels à l'occasion des opérations de reprises des fûts anciens. Si on considère des critères d'acceptation du type de ceux qui sont appliqués au Centre de stockage de l'Aube, ces essais conduisent à classer plus des deux tiers des fûts testés dans la catégorie FAVL.

La Commission considère que le programme qui lui a été présenté est pertinent et répond bien aux recommandations de la revue internationale. Si ces résultats sont concluants, la Commission estime que le stockage des bitumes devrait être possible dans Cigéo.

La Commission insiste pour que les expériences complémentaires soient lancées sans tarder de telle sorte que les résultats des travaux préconisés soient disponibles pendant l'instruction de la DAC de Cigéo. En effet, même si le dépôt de colis de déchets bitumés n'est pas inclus dans la phase industrielle pilote, il est indispensable que la DAC démontre la faisabilité de leur stockage dans Cigéo, moyennant si nécessaire une évolution de la définition des alvéoles.

4.6 LES AVANCEES TECHNIQUES EN VUE DU DEPOT DE LA DAC

Les récentes avancées dans la configuration de Cigéo ont été réalisées afin de répondre aux avis exprimés lors de l'instruction du dossier d'options de sûreté (DOS).

4.6.1 Structuration et capitalisation des connaissances

Les connaissances acquises par l'Andra sont capitalisées au sein d'un socle de connaissances scientifiques et techniques qui formera l'une des pièces justificatives du dossier de la DAC. Ce socle de connaissances est structuré suivant deux ensembles de documents : des connaissances brutes et des connaissances intégrées.

Le premier ensemble, correspondant aux données brutes, comprend des référentiels de connaissances scientifiques et technologiques ainsi que des bases de données. Il capitalise, au meilleur de l'état de l'art, les données nécessaires à la conception de Cigéo, composant par composant.

Le deuxième ensemble propose une vision globale des connaissances intégrant l'ensemble des composants du stockage. Il s'agit d'une part, d'analyses phénoménologiques et de notes conceptuelles détaillées, et d'autre part, de synthèses résumant la position de l'Andra sur différents sujets portant sur la sûreté et la conception.

L'Andra s'est attachée dernièrement à faciliter la compréhension des liens entre les différents documents et sujets inclus dans ce socle de connaissances. Ce souci de structuration contribue à l'amélioration de la lisibilité de l'ensemble.

46

La Commission reconnaît l'effort très conséquent de l'Andra pour synthétiser, intégrer et consolider un socle de connaissances sur tous les aspects scientifiques liés à Cigéo. Cet ensemble de données devrait sécuriser les bases du dimensionnement de Cigéo et donner aux autorités les éléments pour initier des calculs de vérification.

4.6.2 Avancées scientifiques et techniques

Tout en reconnaissant la robustesse du socle de connaissances de l'Andra, la Commission a fait à l'Andra des recommandations à propos des propositions de conception ou des options technologiques. Pour y répondre, l'Andra a mis en place dès 2016 un programme pour consolider les acquis scientifiques et techniques et pour mieux justifier les choix de conception et de dimensionnement de Cigéo.

Il a été mis à jour en 2018. Les thématiques examinées plus spécifiquement cette année concernent :

- le comportement thermo-hydro-mécanique (THM) du Callovo-oxfordien ;
- les alvéoles HA ;
- les alvéoles MAVL et les galeries.

La conception et le comportement des ouvrages de fermeture n'ont pas été abordés au cours des auditions de l'année.

a) Comportement THM du Callovo-oxfordien

Les déchets HA sont exothermiques. Une augmentation transitoire de la température du Callovo-oxfordien est donc attendue au droit des alvéoles HA. Elle induira une augmentation de la pression de l'eau interstitielle et pourrait générer des phénomènes de fracturation de la roche si elle n'était pas contrôlée. Ces phénomènes sont pris en compte dans les calculs de dimensionnement et de prévision de l'évolution de Cigéo.

Une nouvelle expérience *in situ*, au laboratoire souterrain, a démarré en 2017 pour reproduire le chemin de contrainte effective et de pression généré par le chargement thermique à l'entraxe entre deux alvéoles HA : Cette expérience a été conçue à une échelle permettant d'obtenir des observations utilisables pendant la période d'instruction de la DAC. Un premier cycle de chauffage a été effectué durant l'été 2019 suivant un mode permettant d'éviter toute fracturation. Un second cycle sera effectué en 2020 pour aller cette fois jusqu'à la fracturation, au-delà des limites de fonctionnement retenues pour Cigéo. Il s'agit de mieux comprendre et quantifier l'ensemble des conditions menant à la fracturation et donc de vérifier que les modèles de dimensionnement garantissent les marges de sécurité requises.

Des travaux de modélisation viendront compléter cette étude. Ils seront réalisés dans le cadre d'une nouvelle phase (2020-2023) du projet international DECOVALEX. Ce projet, qui a vu le jour en 1992, rassemble 14 organismes internationaux. Il vise à améliorer la compréhension et la modélisation des processus couplés thermo-hydro-mécaniques-chimiques dans les formations géologiques souterraines.

La Commission souligne tout l'intérêt d'expériences in situ qui explorent le comportement des composants de Cigéo au-delà des limites du dimensionnement. Elles complètent utilement l'analyse de sûreté en quantifiant les marges entre le comportement normal et le comportement dégradé.

47

b) Alvéoles HA

Le programme de R&D, mis en œuvre par l'Andra pour répondre aux engagements pris auprès de l'ASN à propos de la constructibilité des alvéoles HA, se poursuit et doit permettre d'ici la fin de l'instruction du dossier de la DAC de démontrer la faisabilité technique de construction d'un alvéole, de préciser le fonctionnement des alvéoles en phase d'exploitation et de confirmer les domaines d'évolution phénoménologique attendus.

Les colis de stockage HA contiennent des colis primaires (CSD-V) renfermant les déchets conditionnés dans une matrice de verre. Dans son rapport n°11 (page 46), la Commission a souligné que "le CEA a franchi une nouvelle étape dans la compréhension du comportement du verre nucléaire. Il a caractérisé les propriétés structurales du verre fortement irradié tel qu'il sera à long terme et les couches d'altération du verre par l'eau du Cox. Ces structures contrôlent les différents régimes de lixiviation du verre à l'origine de la libération progressive des radionucléides." Les conclusions de ces études sont toujours pertinentes pour le projet Cigéo et ne sont pas remises en cause par un récent article scientifique qui fait état d'une corrosion accélérée des verres dans des conditions uniquement représentatives du site américain de Yucca Mountain (Cf. Annexe IX).

Depuis fin 2018, un premier alvéole HA de démonstration de longueur 80 m, comme prévu pour le quartier HA0, a été réalisé en laboratoire souterrain. Il a été équipé de différents capteurs permettant d'en surveiller le comportement. Le taux de fonctionnement de ces derniers est proche de 100% un an après l'installation. Par ailleurs, des réflexions sont en cours sur l'optimisation de la conception de l'alvéole HA. Le schéma de conception proposé en 2018 par l'Andra, basé sur un balayage à l'azote pour assurer l'inertage de l'atmosphère de l'alvéole, était complexe. Dans son rapport annuel n°13, la CNE avait attiré l'attention sur ce point et

recommandé de concentrer l'effort sur des dispositifs passifs et sur la démonstration de leur efficacité. L'Andra poursuit ses investigations en ce sens. EDF a proposé son appui pour instruire ces pistes alternatives.

La Commission maintient sa recommandation de concevoir des alvéoles au fonctionnement passif, en limitant les connexions entre intérieur et extérieur des alvéoles. Elle note que les réflexions sur la définition d'un système de surveillance simple et passif progressent et demande que les résultats lui soient présentés.

La Commission demande par ailleurs que les derniers travaux techniques concernant la maîtrise de l'hydrogène lui soient exposés, cette question n'ayant pas été traitée durant l'année 2019-2020.

La construction d'un prototype d'alvéole de 150 m de longueur est annoncée pour 2023-2024.

La Commission rappelle que ce test est un élément essentiel de démonstration de faisabilité auquel il ne faudrait pas surseoir au-delà de la période d'instruction de la DAC.

c) Alvéoles MAVL et galeries

48

L'Andra s'est engagée pour le dossier de la DAC à consolider la robustesse de la conception et du dimensionnement des galeries et des alvéoles MAVL.

Deux méthodes de creusement ont été testées au laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne : une méthode traditionnelle au moyen d'une machine à attaque ponctuelle avec pose d'un soutènement provisoire et un creusement mécanisé au tunnelier avec pose de voussoirs à l'avancement. Le choix d'une méthode par rapport à l'autre dépend du linéaire de la galerie à creuser. Lorsque le linéaire est important, la méthode favorisée par l'Andra est celle du tunnelier car elle permet de tenir une bonne cadence de creusement.

La méthode de creusement influe sur la cinétique de chargement du revêtement définitif de l'ouvrage, et donc sur sa conception. L'effort appliqué par le massif sur le revêtement est d'autant plus important qu'il est placé tôt et s'oppose ainsi à la convergence du massif rocheux qui tend à refermer l'excavation. Pour la méthode à attaque ponctuelle, le revêtement final est coulé en place de manière différée. Avec un tunnelier, le revêtement final est installé en même temps que le creusement. Pour ce dernier cas, l'Andra a démontré que l'utilisation de voussoirs compressibles permet de limiter les efforts liés à la convergence initiale du massif rocheux. Un programme de qualification a débuté en 2016 afin de s'assurer que ces voussoirs répondent au comportement mécanique attendu tout au long de la phase d'exploitation de Cigéo. Par ailleurs, des essais complémentaires sont en cours à l'institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR). L'introduction d'un matériau compressible entre le revêtement final et la roche a montré une diminution du chargement mécanique des soutènements/revêtements pour les deux méthodes de creusement. Les travaux en cours permettront d'asseoir les choix de dimensionnement avec matériau compressible.

Dans le cadre de ses études d'optimisation technico-économique, l'Andra teste, en laboratoire souterrain, la réalisation des galeries de grands diamètres. Des essais sur des ouvrages de tailles intermédiaires, 8 à 9 m, ont été effectués. L'intersection entre un ouvrage de 6 m de diamètre et un autre de 9 m de diamètre a été récemment construite et instrumentée. Un programme de travaux a été engagé début 2019 et sera poursuivi pour 6 ans dans le laboratoire souterrain. L'Andra s'appuie également sur l'analyse du retour d'expérience de travaux souterrains de génie

civil de diamètres supérieurs à 12 m. Le test des galeries d'un tel diamètre ne peut être réalisé dans le laboratoire souterrain et sera effectué dans Cigéo pendant la phase industrielle pilote.

Toujours dans un souci de flexibilité, trois modes de stockage ont été présentés pour les alvéoles MAVL : stockage du colis primaire dans un conteneur de référence, stockage du colis primaire dans un conteneur renforcé ou stockage direct du colis primaire dans l'alvéole. Le choix d'un mode de stockage repose en premier lieu sur la possibilité de garantir les meilleures conditions de sûreté. Il a également des implications en termes d'emprise et de coût.

Depuis 2017, des études de conception réalisées par l'Andra intègrent la possibilité d'un stockage direct pour certains types de colis. Par rapport à un stockage en conteneur, le nombre d'alvéoles s'en trouve diminué. Ces études confirment la faisabilité technique du stockage direct notamment au regard de la maîtrise des risques. Cette maîtrise est d'ailleurs renforcée par la possibilité, laissée ouverte, de revenir à un stockage en conteneur si cette option s'avérait nécessaire pour des raisons de sûreté : une réserve d'emprise est préservée dans Cigéo pour l'éventuelle construction d'alvéoles supplémentaires.

La mise en œuvre du stockage de colis primaires doit s'appuyer sur des interactions nombreuses entre l'Andra et les producteurs pour définir la liste des colis directement stockables ou encore les spécifications d'acceptation de ces colis dans Cigéo. Des études relatives à l'impact de la densification du stockage dans un alvéole sur la puissance thermique restent à mener.

La Commission considère que l'Andra a atteint un niveau de maturité scientifique et technique suffisant pour lui permettre d'effectuer les calculs nécessaires à la définition et à la démonstration de sûreté d'une solution de conception de référence du projet Cigéo. Cet avancement doit encourager l'Andra à déposer rapidement une DAC.

49

La Commission suivra avec vigilance l'avancement des travaux visant à finaliser, avant la fin de l'instruction de la DAC, la démonstration de la faisabilité du creusement de galeries de grand diamètre (12 m), des alvéoles HAVL étendus à 150 m de long, du stockage des bitumes, ou encore de la réalisation des scellements surface-fond.

4.7 CONCLUSION

La Commission considère que le projet de stockage géologique Cigéo est suffisamment mature pour qu'une demande d'autorisation de création soit déposée dans un avenir proche.

À ce stade, la Commission a pu se prononcer sur certains composants du stockage, mais la solution de conception de référence d'ensemble ne lui a pas encore été présentée. L'Andra propose régulièrement des évolutions de conception, soit en réponse à des questions posées par ses évaluateurs, soit pour tester des opportunités d'optimisation. Chacune de ces évolutions nécessite des démonstrations parfois significatives.

La Commission s'inquiète de l'impact des évolutions proposées du concept Cigéo sur la conduite du projet. Elle demande qu'une configuration de référence, stabilisée, lui soit rapidement présentée. Cette configuration de référence doit être techniquement réalisable, elle doit remplir les objectifs d'accueil de l'inventaire de référence et la démonstration de sûreté devra être faite sur cette configuration.

L'Andra devrait fournir l'ensemble de ces éléments de démonstration sur la configuration de référence au moment du dépôt de la demande d'autorisation de création. Si certaines démonstrations, étayées par des hypothèses réalistes, nécessitent des compléments qui ne sont pas disponibles à ce moment-là, ces éléments devront être apportés, en tout état de cause, avant le décret d'autorisation de création. Il convient ainsi d'être extrêmement vigilant sur le calendrier d'acquisition des éléments indispensables à la démonstration.

Des options techniques dont la démonstration n'est pas certaine dans le calendrier prévu, devraient être considérées comme des évolutions futures de la configuration de référence. Ces évolutions du projet sont prévues par l'adaptabilité de Cigéo, rappelée par la Loi n°2016-2015 : elles peuvent être proposées pendant toute la vie du projet, notamment pendant l'instruction du dossier de DAC, pendant la phase industrielle pilote et pendant la phase d'exploitation.

La Commission recommande que l'Andra se dote d'une procédure formalisée et robuste de gestion de configuration, appuyée sur une définition exhaustive et détaillée de la configuration de référence dans une maquette numérique. Cette procédure de gestion doit imposer d'évaluer systématiquement l'impact de toute évolution ou optimisation afin de vérifier sa faisabilité et sa non-régression par rapport à la configuration de référence, notamment sur le plan de la sûreté. De plus, l'adoption de toute modification par rapport à la configuration de référence doit être complètement documentée et faire l'objet d'une décision formalisée.

CHAPITRE V : PANORAMA INTERNATIONAL CONCERNANT LES OPTIONS D'ENTREPOSAGE ET DE STOCKAGE FAVL

Dans son rapport n°13 (juin 2019), la Commission a présenté dans le chapitre consacré aux aspects internationaux les derniers développements concernant le stockage des déchets radioactifs, et notamment les aspects liés aux prises de décision dans les différents pays. Cette année, la Commission consacre son panorama international aux questions soulevées par l'entreposage de longue durée (de l'ordre du siècle) des combustibles usés et déchets radioactifs à vie longue, ainsi qu'au stockage des déchets FAVL.

Le cas de l'entreposage des matières radioactives séparées du combustible usé ou de l'uranium naturel (considérés dans les deux cas comme matières à caractère stratégique) n'est pas abordé ici.

5.1 L'ENTREPOSAGE ET SA DUREE D'EXPLOITATION

Une installation d'entreposage se distingue d'une installation de stockage par le fait que, dans la première, les matières ou déchets y sont entreposés avec l'intention de les récupérer, tandis que dans la seconde, à l'opposé, il n'y a aucune intention de les récupérer : le stockage est définitif.

Cela est clairement établi par les textes internationaux notamment la « Convention commune sur la sûreté de la gestion de combustible usé et sur la sûreté de la gestion des déchets radioactifs ». La Directive 2011/70/EURATOM précise aussi que « l'entreposage de déchets radioactifs, y compris à long terme, n'est qu'une solution provisoire qui ne saurait se substituer au stockage ».

Au cours des différentes étapes de leur gestion, les déchets radioactifs subissent des phases d'entreposage. Ces phases permettent d'organiser et de réguler les flux. La plupart des installations d'entreposage étaient prévues, lors de leur construction, pour des périodes allant de 20 à 50 ans en cohérence avec les délais envisagés, par exemple, pour procéder au retraitement du combustible usé ou pour mettre les déchets en stockage définitif. L'évolution de cette pratique, notamment sur la dernière décennie, montre que les périodes d'entreposage des déchets ont tendance à s'allonger au-delà d'un siècle, voire plus, pour différentes raisons (il en est de même pour les matières nucléaires). Dans la grande majorité des cas, l'allongement des périodes d'entreposage est dû à la non-disponibilité des installations de stockage. Les Pays-Bas ont envisagé dès le départ de mettre les déchets en stockage à une échéance de plus d'un siècle.

L'allongement des périodes d'entreposage impose de réexaminer la sûreté des installations existantes, de mieux évaluer la tenue dans le temps des infrastructures et des matières ou déchets entreposés, et de s'assurer de la faisabilité et de la sûreté des transports en sortie d'entreposage. En plus de ces considérations techniques, la garantie du financement et le maintien de l'acceptation sociétale des installations d'entreposage, sur un siècle au moins, sont des conditions nécessaires à la poursuite de ce mode de gestion.

5.2 LES DIFFERENTES APPROCHES INTERNATIONALES

5.2.1 Les besoins et leur évolution prévisible

Depuis le début de l'électronucléaire et jusqu'à fin 2013, 370 000 tonnes de métal lourd (tML) ont été déchargées des réacteurs dans le monde, Inde et Pakistan exclus (IAEA-status and trend-2018). Pour plus de la moitié des assemblages de combustible déchargés, la stratégie envisagée est le stockage direct. Les deux tiers de ces assemblages sont entreposés sur les sites des réacteurs ou dans des sites centralisés, soit en attente de stockage direct car considérés comme déchets, soit en attente de retraitement pour en séparer les matières réutilisables.

Environ un tiers du combustible usé a été retraité, correspondant à 120 000 tML. En 2013, la capacité mondiale de retraitement disponible était de 4 400 tML/an (France, Royaume-Uni, Russie) et la capacité en développement de 860 tML/an (Japon, Russie). Cette capacité a été utilisée par les pays qui la possédaient ou a été mise à disposition de pays tiers dans le cadre de contrats commerciaux. Toutefois, le Royaume-Uni a mis fin à ses activités de retraitement, ce qui aujourd'hui réduit à environ 2 000 tML/an la capacité de retraitement disponible, sous réserve de mise en service de nouvelles installations (Japon) alors que les prévisions de déchargement de combustible usé, à l'échelle de l'OCDE, sont de l'ordre de 5 500 tML/an.

Les besoins en capacités d'entreposage de combustibles usés dans le monde, que ce soit en attente de stockage direct ou de retraitement, croîtront donc inexorablement.

5.2.2 Les pays ayant une stratégie de gestion de l'aval du cycle déjà mise en œuvre

Les pays qui ont défini une stratégie de gestion du combustible usé, et procèdent effectivement à sa mise en œuvre, sont la Finlande, la France et La Suède.

La Finlande a choisi comme stratégie le stockage direct des assemblages de combustible usé. Le gouvernement finlandais a délivré l'autorisation de construire le stockage de Olkiluoto en novembre 2015. Les travaux de construction sont en cours. Etant donné la disponibilité prochaine du stockage, la Finlande n'est pas confrontée à la nécessité de prolonger les entreposages des assemblages (sous eau sur les sites des centrales) au-delà de 50 ans. De plus, la construction de toute nouvelle centrale nucléaire est soumise à la condition suspensive de disposer préalablement des capacités de stockage nécessaires.

Comme la Finlande, la Suède a choisi la stratégie du stockage direct du combustible usé. La Suède a opté pour l'entreposage centralisé des assemblages sous eau dans une installation souterraine (Clab). Le transport des combustibles vers cette installation se fait par bateau. La procédure d'autorisation du stockage suédois est en phase finale ; il n'y a donc pas aujourd'hui de nécessité d'envisager un entreposage prolongé du combustible usé. Rappelons qu'en Suède, l'entreposage prolongé ne peut être envisagé comme solution acceptable car la loi impose une solution ultime de gestion à sûreté passive pour les combustibles usés, c'est à dire sans contrôle de la société.

La France a choisi la stratégie du retraitement du combustible UOX usé avec mise en stockage subséquente des déchets HAVL et MAVL. Ces déchets sont destinés à un stockage géologique.

Les colis de déchets HAVL et MAVL issus du retraitement sont actuellement entreposés en casemates ou en silos. Avant retraitement, le combustible UOX usé séjourne en piscine en moyenne pendant 7 ans et il n'y a pas de nécessité d'entreposage prolongé pour ces combustibles tant que les besoins en MOX nécessitent son retraitement en flux quasi tendu. En effet le combustible MOX usé est considéré comme une ressource potentielle dans la perspective de son retraitement et de l'utilisation du plutonium dans des RNR ou dans le cadre d'un multi-recyclage en REP. En conséquence, les assemblages de combustible MOX usé sont donc mis en entreposage. Une conséquence de la PPE, qui repousse le déploiement des RNR au prochain siècle, est donc l'allongement de leur durée d'entreposage à une centaine d'années et nécessite la construction d'un nouvel entreposage centralisé sous eau de grande capacité (Cf. chapitre 1).

5.2.3 Les pays ayant une stratégie de gestion de l'aval du cycle différée

Certains pays tels le Canada, la Suisse et les Pays-Bas, ont élaboré une stratégie de gestion de l'aval du cycle en vue du stockage direct des combustibles et/ou des déchets HAVL et MAVL. Ces stratégies, qui sont mises en œuvre au travers de procédures de consultations complexes et longues, devraient déboucher sur la mise en exploitation de stockages au-delà de 2050 pour le Canada et la Suisse, au siècle prochain pour les Pays-Bas.

Dans ces pays, la durée de l'entreposage s'étendra au-delà des 50 ans, durée pour laquelle la faisabilité industrielle est largement démontrée et qui est généralement prise comme base de conception. Les permis d'exploitation sont accordés pour des durées limitées et sont en principe renouvelables. Le vieillissement des installations, des colis et des emballages, fait l'objet d'un suivi périodique. Cela permet d'étendre les durées d'exploitation de façon contrôlée ; la nécessité de construire de nouveaux entreposages ne peut cependant pas être exclue.

Remarquons que les Pays-Bas ont conçu et construit l'entreposage de leurs déchets et combustible usé pour un siècle ; ils pratiquent une politique d'attente de stockage. Le temps écoulé entre la sortie du réacteur et la mise en stockage avoisinera les 150 ans dans ce cas.

5.2.4 Les pays n'ayant pas encore adopté une stratégie de gestion de l'aval du cycle

Le stockage en couches géologiques profondes fait l'objet d'un large consensus dans la communauté scientifique au niveau international comme un moyen sûr de gestion à long terme des assemblages de combustible usé et des déchets HAVL et MAVL. Ce consensus scientifique ne suffit toutefois pas à faire reconnaître la nécessité du stockage par la société en général, et par les décideurs en particulier. Beaucoup de pays ne parviennent donc pas à définir une stratégie (par exemple la Belgique, l'Italie, le Royaume-Uni), ou à la mettre en œuvre (par exemple l'Espagne, le Japon). D'autres pays ont bien une stratégie mais doivent la redéfinir (Allemagne, Etats-Unis).

L'absence de perspectives impose *de facto* la prolongation des entreposages pour des durées difficiles à fixer à l'avance, et à terme, leur renouvellement. La plupart des pays ont transféré les assemblages de combustible usé dans des entreposages dédiés à sec sur le site des centrales ou sur sites centralisés. Ceci ouvre les questions de la viabilité de l'entreposage de longue durée et de la possibilité de transporter les assemblages de combustibles et les déchets en sortie d'entreposage sans connaître leur éventuel état de dégradation.

5.3 LES ENJEUX LIES A L'ENTREPOSAGE DE LONGUE DUREE

Les pays qui ont (ou avaient) fait le choix du retraitement pour tout ou partie du combustible usé (France, Japon, Russie, Royaume-Uni) entreposent les assemblages de combustibles sous eau dans les piscines des réacteurs et ensuite sur les sites des usines de retraitement. Il s'agissait au départ d'entrepôts tampons en attente de retraitement. C'est une pratique industrielle maîtrisée pour laquelle une expérience de plusieurs décennies existe.

A l'exception notoire de la Suède, les pays qui ont fait le choix du stockage direct (Allemagne, Canada, Etats-Unis) placent les assemblages en conteneurs dédiés pour un entreposage à sec dès que ceux-ci ont suffisamment refroidi ; en effet, le refroidissement par air est moins efficace que le refroidissement par eau de sorte que l'entreposage à sec ne peut s'envisager qu'après quelques années pour le combustible UOX, et après quelques décennies pour le combustible MOX. Les conteneurs sont entreposés sur site ou dans des installations centralisées. Le retour d'expérience industrielle de l'entreposage à sec est également de plusieurs décennies.

Une différence essentielle est, qu'en cas d'entreposage sous eau, le combustible reste intègre et accessible pour inspection et traitement ultérieur, tandis qu'en cas d'entreposage à sec, le combustible est difficilement ou non accessible et son comportement à long terme doit s'appréhender principalement par la modélisation. Dans les deux cas, l'état général des connaissances relatives au vieillissement du combustible et à l'éventuelle dégradation des assemblages est limité. Ces connaissances peuvent difficilement être extrapolées au-delà du demi-siècle.

5.3.1 Les enjeux réglementaires

La réglementation applicable à la conception et à l'exploitation des installations d'entreposage et des conteneurs pour entreposage à sec des assemblages est, dans tous les pays, celle qui s'applique aux installations du cycle du combustible. L'intégrité des assemblages, ou des conteneurs eux-mêmes, peut être affectée après des périodes prolongées d'entreposage. La problématique de leur vieillissement a, jusqu'à présent, été prise en compte essentiellement en limitant la durée de l'exploitation (20 à 50 ans), en mettant en place des programmes de surveillance et en procédant à des évaluations périodiques de sûreté. Le Canada (en 2014) et les Etats-Unis (en 2016) ont cependant développé des réglementations spécifiques pour suivre les effets du vieillissement des entreposages à sec.

Par ailleurs, les conteneurs ont pu être conçus pour satisfaire à la fois aux conditions d'entreposage et de transport. Plusieurs pays ont fait ce choix pour leur entreposage à sec (Allemagne, Espagne, Etats-Unis, Suisse). La réglementation liée au transport est complètement développée en tant que telle aux niveaux international (AIEA) et national. Si le transport vers les entreposages est une pratique réglementée et bien maîtrisée, le transport en sortie d'entreposage est quant à lui potentiellement plus délicat car les conteneurs pourraient, si les normes en vigueur venaient à évoluer, devenir non conformes au moment de leur évacuation.

5.3.2 Les enjeux techniques de l'entreposage à sec

Pour des durées d'entreposage dépassant plusieurs décennies (plus de 50 ans en pratique), il est préférable de recourir à des systèmes d'exploitation passifs (ventilation par convection naturelle). Si ce n'est pas possible, il est nécessaire de concevoir des systèmes actifs pour lesquels la maintenance est limitée et, en cas de défaillance, de prévoir des délais d'intervention suffisamment longs compatibles avec la disponibilité des équipements et des personnels.

La mise en place d'une succession de barrières physiques robustes est l'élément essentiel d'une sûreté passive. Typiquement, ces barrières de sûreté comprennent la gaine du combustible, les conteneurs et éventuellement les structures des bâtiments. L'intégrité de ces différents éléments doit être assurée et surveillée.

Les mécanismes de dégradation des assemblages sont identifiés et font l'objet de nombreuses études au niveau international. Des expériences de démonstration ont été effectuées dans le passé à l'échelle du laboratoire pour déterminer le comportement à long terme des combustibles entreposés à sec et en déduire des modèles de calcul. Des essais de démonstrations ont également été effectués en vraie grandeur mais ils ne sont pas toujours représentatifs des caractéristiques réelles des combustibles et ne couvrent donc pas nécessairement l'ensemble des besoins. L'AIEA en a publié une première synthèse en 2016. Des expériences en conditions réelles ont été lancées récemment aux Etats-Unis (2012-2014) et au Japon (2016). Pour définir les campagnes d'essai, les Etats-Unis ont procédé à l'identification des données manquantes relatives aux différents aspects pouvant affecter l'entreposage à sec à long terme. Il faut souligner que les essais effectués sont spécifiques des combustibles étudiés et ne sont donc généralement pas directement transposables à d'autres combustibles.

L'intégrité des assemblages, en particulier leur résistance mécanique, est également nécessaire pour leur manipulation et leur transport après entreposage, que ce soit en conditions normales ou accidentelles. Les données disponibles à l'heure actuelle sont rares et spécifiques des combustibles étudiés. Le Canada a procédé à des essais de chute et de vibration pour tester la durabilité de la résistance des combustibles CANDU aux conditions de transport.

Les conteneurs et les structures des bâtiments répondent à des standards de fabrication et de construction largement reconnus ; toutefois, l'extension de la période d'exploitation au-delà de 50 ans, voire pour des durées de l'ordre du siècle, incite à la prudence car le recul industriel manque. A noter qu'aux Etats-Unis, l'Autorité de sûreté a pris en considération des périodes allant jusqu'à 300 ans pour l'évaluation du vieillissement d'entreposages à sec.

5.3.3 Les enjeux techniques de l'entreposage sous eau

L'entreposage sous eau est une technique industriellement éprouvée, utilisée depuis maintenant une cinquantaine d'années. Des méthodes ont notamment été mises au point pour effectuer les réparations des gaines de combustibles qui pourraient fuir, ou pour renforcer l'étanchéité des revêtements de piscines.

Au vu de l'expérience internationale disponible, il ne semble pas exister actuellement d'obstacle rédhibitoire concernant le prolongement des durées d'entreposage sous eau. Ceci n'enlève rien à la nécessité de maintenir ou de mettre en place les programmes d'inspection des combustibles et de suivi de leur vieillissement, de procéder systématiquement à l'analyse des résultats et, si cela s'avère nécessaire, d'engager des programmes de recherche.

Par rapport à l'entreposage à sec, il faut souligner que l'entreposage sous-eau fait appel à des systèmes actifs (refroidissement, contrôle de la qualité de l'eau, ...). Le risque le plus sévère pris en compte dans les études de sûreté d'un entreposage sous eau en exploitation est le dénoyage du combustible, avec pour conséquence la dégradation des gaines par suite de l'augmentation de température et, en cas de rupture, relâchement de produits radioactifs. L'effet de la variation brutale de température sur les gaines du combustible, lors de la reprise des assemblages, a aussi été étudiée car il peut conduire à leur fragilisation.

5.3.4 Les enjeux organisationnels

Il est reconnu qu'un système d'archivage robuste doit être mis en place et maintenu pour garantir l'enregistrement et la préservation des données d'exploitation pendant toute la durée de l'entreposage ; son bon fonctionnement et son accessibilité doivent être vérifiés périodiquement. En cas de changement d'exploitant, la continuité de l'archivage doit aussi être assurée. Cet aspect est couvert par de nombreux programmes de recherches qui font l'objet de coopérations internationales.

Enfin, disposer du personnel compétent pour l'exploitation peut s'avérer difficile dans le cadre de programmes nucléaires qui se réduisent ou s'arrêtent.

5.3.5 Les enjeux financiers

56

Le principe pollueur-payeur est appliqué par la grande majorité des pays.

Les financements nécessaires à la construction des entreposages sont toujours provisionnés, au moins à titre estimatif. Toutefois, si les besoins et la durée d'entreposage venaient à augmenter, les coûts devraient être réévalués. Rappelons que le manque de financement peut se répercuter sur l'exploitation, la maintenance et la surveillance des entreposages. Le maintien de l'archivage des données peut également en souffrir.

Aussi longtemps que l'entreposage se fait sur des sites de centrales en exploitation, les coûts peuvent être repris dans les coûts d'exploitation ; ce n'est plus le cas lorsque l'exploitation a cessé ou lorsque l'entreposage est centralisé. Des mécanismes doivent être mis en place pour que les fonds nécessaires soient disponibles sur toute la durée de l'entreposage. A terme, des difficultés de financement peuvent surgir. Dans de nombreux pays qui connaissent cette situation (Allemagne, Espagne, Etats-Unis, Italie, Royaume-Uni), l'Etat doit alors intervenir dans le financement des installations, ce qui est en contradiction avec le principe pollueur-payeur ; c'est souvent le cas lors de changements de politique énergétique.

5.3.6 Les enjeux de société

La plupart des pays ont mis en place, ou disposent, des moyens structurels pour organiser le dialogue sociétal indispensable à l'élaboration d'un consensus autour de la question de la gestion à long terme des combustibles usés et des déchets HAVL et MAVL (Cf. rapport n°13). D'un point de vue sociétal, l'argument majeur en faveur du stockage géologique est le respect de l'équité entre générations : c'est à la génération d'aujourd'hui de gérer les déchets qu'elle a générés par

l'utilisation des technologies dont elle a tiré profit, et notamment d'en prendre la pleine responsabilité financière. Le recours à l'entreposage de longue durée est souvent une décision qui est la conséquence du manque de soutien de l'opinion publique pour le stockage géologique. L'entreposage de longue durée fait, lui aussi, de plus en plus l'objet d'une opposition identique, qu'il soit sur site de production (Belgique) ou centralisé (Espagne, Etats-Unis) ; dans ce dernier cas, l'entreposage est souvent vu comme précurseur du lieu du stockage.

L'allongement des délais d'entreposage est parfois vu comme une opportunité de donner du temps pour le dialogue (Pays-Bas) ; encore faut-il que ce dialogue soit effectivement engagé et constructif sinon l'entreposage de longue durée s'apparente à une simple politique d'attentisme. Il est clair que le recours à l'entreposage de longue durée, sans réelle volonté politique de développer le stockage, consiste en un transfert de responsabilité aux générations suivantes.

5.4 LES ENSEIGNEMENTS POUR L'ENTREPOSAGE EN FRANCE

Dans la plupart des pays, l'allongement des délais pour mettre en place le stockage du combustible usé et des déchets de haute et moyenne activité à vie longue entraîne l'allongement des durées d'entreposage au-delà des quelques dizaines d'années initialement prévues, parfois bien au-delà du siècle. La situation dans les différents pays dépend grandement de l'historique de développement de l'énergie nucléaire, du mode de dialogue sociétal mis en place pour définir une solution viable de gestion des combustibles usés et des déchets, mais aussi de l'implication au plus tôt de représentants de la société civile dans le processus décisionnel.

L'entreposage de longue durée soulève de nombreux enjeux notamment du point de vue du vieillissement des installations. Dans certain cas, le retour d'expérience opérationnelle et la maturité technologique manquent pour véritablement maîtriser ces enjeux. C'est une condition nécessaire au développement d'une réglementation couvrant l'ensemble des aspects. L'extension de l'exploitation d'un entreposage à des durées de plusieurs siècles implique la mise en place par les Etats d'une surveillance institutionnelle et réglementaire continue.

57

Le maintien d'un personnel d'exploitation compétent et expérimenté, tout comme l'organisation du transfert de connaissances associées aux installations, sont des éléments clés pour assurer une exploitation sûre de ces installations d'entreposage à long terme. Enfin, l'extension dans la durée de l'exploitation d'un entreposage exige des financements additionnels qui n'ont généralement pas été prévus.

La Commission rappelle que l'entreposage de longue durée tient de l'attentisme et qu'une politique volontariste de développement d'une solution pérenne de stockage doit être développée en parallèle. Dans ce cas, il peut permettre d'atténuer les tensions résultant de calendriers qui laisseraient peu de place à des aléas éventuels.

En France, la PPE va conduire à allonger la durée de l'entreposage du combustible usé MOX en retardant sa perspective de valorisation. Pour ce type de combustible, l'entreposage sous eau se justifie aisément pendant les premières décennies. Toutefois, de nouvelles évolutions de la politique énergétique ne peuvent être exclues. A cet égard, la Commission note que le combustible usé MOX figure dans l'inventaire de réserve de Cigeo.

La Commission constate, notamment au vu du contexte international, que le niveau des connaissances applicables au contexte français concernant le comportement des entreposages séculaires et des matières ou déchets entreposés reste faible, peu consolidé.

En conséquence, la Commission recommande que les exploitants et les acteurs institutionnels français procèdent à un inventaire consolidé des connaissances existantes pour les différents types d'entreposage et identifient les domaines où la connaissance est lacunaire, voire absente.

Sur cette base, de nouveaux programmes de recherche permettraient d'acquérir le niveau de connaissance nécessaire à des prises de décisions mieux éclairées. La Commission demandera qu'ils lui soient présentés et elle les évaluera dans ses prochains rapports.

5.5 QUELQUES EXEMPLES DE GESTION DES FAVL DANS LE MONDE

5.5.1 Suède

58

La Société suédoise de Gestion des Combustibles et Déchets Nucléaires, SKB, travaille actuellement à un projet de stockage des déchets FAVL dans le granite dénommé SFL.

Le concept de stockage, appelé SFL, comprend deux parties, une caverne pour les déchets métalliques tels que les parties internes des réacteurs nucléaires, et une autre pour les déchets résultant du développement de l'énergie nucléaire en Suède, c'est-à-dire les déchets historiques.

SKB a évalué la sûreté du concept SFL préalablement à son développement ; cette évaluation concerne à la fois le processus de sélection de sites, les barrières ouvragées et tient également compte des critères auxquels les déchets devront satisfaire pour être acceptés dans ce concept de stockage. L'évaluation de la sûreté est importante pour identifier les domaines où la connaissance doit être améliorée afin de servir de base aux futures analyses approfondies de la sûreté après fermeture.

Selon SKB, le stockage SFL sera situé à une profondeur suffisante dans la formation géologique pour éviter les conséquences négatives sur les barrières ouvragées de la formation attendue de pergélisols dans le futur.

Les données provenant des nombreuses campagnes de forages, effectuées avant la sélection du site pour le stockage des combustibles nucléaires usés, ont été utilisées dans ces évaluations.

SKB a, dans son dernier programme de RD&D (Recherche, développement et démonstration) 2019, identifié les sujets sur lesquels des études doivent être effectuées afin de compléter le niveau de connaissance :

- approfondir la connaissance de l'inventaire des déchets tant en ce qui concerne les radionucléides présents que les volumes de déchets attendus ;
- approfondir la connaissance des processus de génération de gaz dans les déchets historiques et la façon dont cette production de gaz pourrait affecter le bon fonctionnement des barrières ouvragées ;
- étudier plus avant comment l'eau souterraine interagit avec les barrières en béton ;
- étudier l'évolution de la bentonite après sa mise en place, notamment ses propriétés pendant et après saturation par l'eau.

Concernant les outils de l'évaluation de sûreté, les points suivants doivent faire l'objet d'études :

- la gestion des incertitudes dans l'évaluation de sûreté ;
- les outils pour simuler la circulation de l'eau souterraine et le transport des radionucléides en fonction de l'évolution de la barrière en bentonite ;
- l'évaluation de la résistance aux séismes des barrières ;

L'Autorité de sûreté Suédoise, SSM, dans sa décision relative au programme de RD&D mentionné plus haut, a annoncé en avril 2020 qu'elle attendait de SKB qu'elle fasse le bilan de toutes les études à effectuer dans le rapport que SKB doit soumettre au gouvernement en 2022.

Le site qui sera choisi pour le stockage SFL pourrait être recherché aussi bien à proximité des sites des deux stockages déjà choisis (celui pour les déchets de faible et moyenne activité à vie courte ou celui pour les combustibles nucléaires usés, tous deux dans la municipalité de Östhammar) qu'en un lieu complètement différent.

SKB devra également faire un rapport sur les futures consultations prévues avec les autorités, les municipalités candidates et les autres parties prenantes. Les consultations sur la sélection de site couvriront quatre domaines :

- la sûreté après fermeture du stockage ;
- les technologies qui seront utilisées et leur mise en œuvre ;
- le santé et l'environnement ;
- les aspects sociétaux.

Le stockage SFL devrait être mis en exploitation en 2045 selon les prévisions actuelles.

5.5.2 Allemagne

Les déchets FAVL seront stockés en formation géologique profonde. La réutilisation de mines est économiquement attractive de sorte que, en raison de sa géologie favorable, la mine de Konrad a été étudiée pour le stockage de déchets radioactifs.

Konrad est une mine de fer abandonnée dont les étages se situent entre 800 et 1300 mètres de profondeur. Elle est située en Basse-Saxe, en Allemagne du Nord. La situation hydrogéologique est caractérisée par une structure bien connue. Près de la surface, l'eau souterraine se trouve le plus souvent dans des dépôts quaternaires en connexion avec la surface. À plus grande profondeur, l'eau souterraine constitue des aquifères isolés, séparés par des argiles de faible perméabilité. Il en résulte que la mine de Konrad est exceptionnellement sèche.

Les études effectuées à la demande du gouvernement fédéral de 1976 à 1982 ont confirmé le potentiel supposé de la mine. L'autorisation de création du stockage a été obtenue en 2007. Depuis 2013 les travaux de reconstruction des puits, de préparation des équipements de transport et de manutention en souterrain et de creusement des emplacements destinés aux déchets sont en cours. L'intention est de mettre le stockage en service en 2022.

5.5.3 Finlande

L'intention est aujourd'hui de placer les déchets FAVL dans le même stockage que les autres déchets de faible et moyenne activité. Toutefois, il n'est pas possible d'écarter la probabilité que les études de sûreté ne permettent pas d'autoriser d'y placer les pièces internes des réacteurs. La géologie et les autres aspects sont similaires à ceux de la Suède à l'exception du fait que la Finlande n'a pas de déchets historiques. De nombreuses études doivent encore être effectuées concernant la gestion des déchets FAVL en Finlande.

5.6 CONCLUSIONS SUR LA GESTION DES FAVL

Les programmes de gestion des FAVL dans le monde sont encore embryonnaires.

Le stockage en profondeur est privilégié car il procure un plus haut degré de confinement et d'isolement que les stockages en surface. En conséquence, de telles installations peuvent être à même d'accepter des concentrations plus élevées de radionucléides de longue durée de vie. Un avantage supplémentaire du stockage profond est que la nécessité d'un contrôle institutionnel est fortement diminuée après fermeture de l'ouvrage.

La Commission suivra avec attention l'évolution des programmes de recherche internationaux consacrés à la gestion des FAVL.

ANNEXE I : COMPOSITION DE LA COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION

Gilles PIJAUDIER-CABOT – Président de la Commission nationale d'évaluation – professeur de génie civil, directeur exécutif E2S, Université de Pau et des Pays de l'Adour – membre sénior de l'Institut universitaire de France.

Jean-Claude DUPLESSY – Président de la Commission nationale d'évaluation jusqu'au 21 janvier 2020 – expert invité de la Commission nationale d'évaluation – membre de l'Académie des sciences – directeur de recherche émérite au CNRS.

Anna CRETI – Professeur des universités, université Paris Dauphine, Senior Research Fellow, département d'économie, école Polytechnique External Affiliate, University of California Environnement, Energy and Economics, Berkeley and Santa Barbara.

Christophe FOURNIER – Ingénieur général hors classe de l'armement (2S).

Phillippe GAILLOCHET – Directeur de service – Assemblée nationale (1977 – 2015).

Olivier GALLAND – Sociologue – directeur honoraire du GEMASS – Sorbonne université.

Robert GUILLAUMONT – Expert invité de la Commission nationale d'évaluation – membre de l'Académie des sciences – membre de l'Académie des technologies – professeur honoraire Université Paris Sud Orsay.

Saida LAÂROUCHI ENGSTRÖM – Ingénieur – conseillère en charge des affaires publiques – Vatenfall – Suède.

Vincent LAGNEAU – Professeur d'hydrogéologie et géochimie de l'Institut Mines Télécom – directeur du Centre de géosciences à MINES ParisTech.

Emmanuel LEDOUX – Expert invité de la Commission nationale d'évaluation – directeur de recherche honoraire à l'École des mines de Paris.

Mickaële LE RAVALEC – Vice-présidente de la Commission nationale d'évaluation – Chef du département géoressources, direction Géosciences, à l'IFPEN.

Maurice LEROY – Vice-président de la Commission nationale d'évaluation – membre associé de l'Académie nationale de pharmacie – professeur honoraire - École européenne de chimie, polymères et matériaux de Strasbourg.

Virginie MARRY – Professeur, chimie des milieux poreux, Sorbonne université.

José Luis MARTINEZ – Directeur de recherche au CSIC (institut de science de matériaux, Madrid, Espagne), représentant officiel de l'Espagne au sein du Forum européen sur les infrastructures de recherche (ESFRI, Commission Européenne), responsable du groupe stratégique en physique et ingénierie.

Jean-Paul MINON – Directeur général de l'ONDRAF de 2006 à 2017 – Belgique.

ANNEXE II : ACTIVITÉ DE LA COMMISSION

Depuis la publication de son précédent rapport en juin 2019, la Commission a présenté son rapport n°13 à l'OPECST et aux départements ministériels concernés. Une délégation de la Commission s'est rendue à Bure le 6 février 2020 pour y présenter son rapport aux membres du Clis du laboratoire de Bure (Cf. Annexe III).

La Commission a également analysé, à la demande de l'OPECST, le rapport de la revue internationale portant sur la gestion des déchets bitumés. Ce travail a fait l'objet d'une note (Cf. Annexe VIII) qui a été présentée lors d'une audition organisée par l'OPECST le 21 novembre 2019.

La Commission a suivi la même méthode de travail que les années précédentes. Elle a procédé à 11 auditions d'un jour (Cf. Annexe IV), et 4 auditions restreintes d'une demi-journée, chacune à Paris, ainsi qu'à un certain nombre de réunions complémentaires avec les acteurs de la loi. Les membres de la Commission, tous bénévoles, ont entendu 96 personnes représentant les différents opérateurs de la filière nucléaire, qu'il s'agisse de l'Andra, du CEA, mais également des institutions universitaires et organismes industriels, français et étrangers (Cf. Annexe V). Ces auditions rassemblaient en moyenne une soixantaine de personnes, notamment des représentants de l'Autorité de sûreté nucléaire, d'Orano, d'EDF, de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire et de l'administration centrale.

La Commission a consacré deux journées à des visites techniques, l'une dédiée au thème de l'assainissement et du démantèlement ainsi qu'à la R&D sur le cycle du combustible sur le site du CEA de Marcoule (le 17 février 2020), l'autre (le 18 février 2020) focalisée sur l'installation Melox d'Orano (Cf. Annexe III).

La liste des documents qu'elle a reçus des organismes auditionnés (arrêtée au 15 mars 2020) est donnée en Annexe VI.

ANNEXE III : PRÉSENTATIONS ET VISITES DE LA COMMISSION

Auditions de la Commission

- 27 juin 2019 : Présentation du rapport n°13 à l'OPECST.
6 février 2020 : Présentation du rapport n°13 au Clis de Bure.

Visites de la Commission

- 17 février 2020 : CEA de Marcoule. Visite sur le thème de l'assainissement-démantèlement et de la R&D consacrée au cycle du combustible.
18 février 2020 : Orano – Visite de l'usine Melox de fabrication du combustible MOX.

ANNEXE IV : AUDITIONS REALISÉES PAR LA COMMISSION

AUDITIONS PLÉNIÈRES

| | |
|--------------------|--|
| 09 octobre 2019 : | Andra – Les sujets scientifiques et techniques à consolider pour la configuration du projet Cigéo portée au dossier de DAC |
| 10 octobre 2019 : | CEA – Filière de gestion des déchets historiques et stratégie de priorisation des chantiers A et D |
| 13 novembre 2019 : | CEA – La gestion des matières : Enjeux des entreposages |
| 14 novembre 2019 : | Andra – Les inventaires de Cigéo et les études de flexibilité et d'adaptabilité pour le dossier de DAC |
| 04 décembre 2019 : | Andra – Les sujets environnementaux des centres de surface et du projet Cigéo |
| 22 janvier 2020 : | CEA – La place du nucléaire dans le futur mix énergétique : Evolution de la recherche au CEA |
| 23 janvier 2020 : | Andra – Les grands dossiers de Cigéo (DUP, DAC et PDT) |
| 12 février 2020 : | CEA – Gestion des matières (U et Pu) et études de scénarios |
| 13 février 2020 : | Andra – Les coûts des stockages en général (centre de surface, Cigéo...) |
| 11 mars 2020 : | CEA – Bitumes |
| 12 mars 2020 : | Andra – Les suites du Débat Public sur le PNGMDR |

AUDITIONS RESTREINTES

| | |
|----------------------------------|---------------------------------------|
| 18 septembre 2019 – matin : | Haut-Commissaire à l'énergie atomique |
| 18 septembre 2019 – matin : | EDF |
| 18 septembre 2019 – après-midi : | Andra |
| 19 septembre 2019 – matin : | Orano |

ANNEXE V : LISTE DES PERSONNES AUDITIONNÉES PAR LA COMMISSION

ANDRA

ABADIE Pierre-Marie
ARMAND Gilles
BELIN Morgane
BOSGIRAUD Jean-Michel
BUMBIELER Frédéric
BUTTY Estelle
CHOTARD Sandrine
CLAUDEL David
CONIL Nathalie
CRUSSET Didier
DEYDIER Valérie
DOUHARD Séverine
DIAS Nathalie
DURET Franck
ELLUARD Marie-Paule
GALY Catherine
GUYOMARCH Elise
LAPLANCHE Mathieu
LASSABATÈRE Thierry
LAVILLE Arnaud
LAUNEAU Frédéric
LEGEE Frédéric
LEVERD Pascal
LIEBARD Florence
MARCHAL Frédéric
MAZOYER David
MENENTEAU Jean-Michel
PASTEAU Antoine
PLAS Frédéric
PLUA Carlos
POIROT Nicolas
QUENTEL Julie
RABARDY Myriam
ROUX-NEDELEC Pascale
SCHUMACHER Stephan
SOULET Stéphane
STANCU Délia
THABET Soraya
TORRES Patrice
VOINIS Sylvie
WASSELIN Virginie
ZGHONDI Jad

CEA

ABONNEAU Eric
ADVOCAT Thierry
BATIFOL Gaël
BOURG Stéphane
BRIEULLE Pascale
CANAS Daniel
CARRE Frank
CHABERT Christine
CHAMPENOIS Jean-Baptiste
DANNOUX-PAPIN Adeline
DEFFAIN Jean-Paul
DUQUESNOY Thierry
EVENAT-ROBIC Nadine
GORGUES Vincent
JACQ François
GARNIER Jean-Claude
JOURDA Paul
LAVARENNE Sylvain
LE NET Elisabeth
MICHEL Bruno
PUSSIEUX Thierry
RICHET Cécile
RUGGIERI Jean-Michel
SABATHIER Catherine
SALUDEN-MAGNIN Magali
SALVATORES Andrea
SARRADE Stéphane
STOHR Philippe
TOURON Emmanuel
TRIBOUT-MAURIZI Anne

DGEC

DEPROIT Laurent
LALAUT Suzelle
LEGENDRE Patrice

EDF

AUGE Laurent
BOCQUIER Clément
BUTTIN Jérémy
GIRAUD Olivier
LARRAURI Didier
LAUGIER Frédéric
VAN DER WERF Jérôme
VERDIEL François

FRAMATOME

LOUF Pierre-Henri

HC

LANDAIS Patrick

IRSN

LE BARS Igor

*OBSERVATION PERENNE
ENVIRONNEMENT*

LAGADEC Yvan

ORANO

ALAMEDA ANGULO Célia
DELAROCHE Philippe
EVANS Cécile
FORBES Pierre
ROMARY Jean-Michel
SENENTZ Gérald
VIDEAU Gérard
ZILBER Marine

PREFECTURE DE LA MEUSE

LERAITRE Philippe – Sous-Préfet

ANNEXE VI : LISTE DES DOCUMENTS TRANSMIS À LA COMMISSION EN 2019-2020

Andra

- Rapport d'activité 2018
- Inventaire national des matières et déchets radioactifs : les essentiels 2020, février 2020

CEA

- Clefs CEA N° 65, « la transition énergétique », janvier 2018
- Les défis du CEA N°239, « la fermeture du cycle du carbone – le défi du siècle », avril 2019
- Monographie sur le thème « l'assainissement – démantèlement des installations nucléaires » parue en 2017
- Monographie sur le thème « l'instrumentation et la mesure en milieu nucléaire » parue en 2018
- La lettre de l'I-tésé – printemps 2019

ASN & DGEC

- Dossier du maître d'ouvrage du débat public sur le PNGMDR (5^{ème} édition du PNGMDR)
- Décision consécutive au débat public dans le cadre de la préparation de la cinquième édition du plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs, février 2020

CPDP

- Clarification des controverses techniques – note de synthèse, mars 2019
- Bilan de la Présidente de la CNDP, septembre 2019
- Compte rendu du débat public sur le PNGMDR (5^{ème} édition du PNGMDR), novembre 2019

IRSN

- Panorama international des recherches sur les alternatives au stockage géologique des déchets de haute et moyenne activité à vie longue, mai 2019
- Analyse des possibilités d'entreposage à sec de combustibles nucléaires usés de type MOX ou URE, mai 2019

ANNEXE VII : PPE ET ORIENTATION DE LA R&D DANS LE NUCLÉAIRE

INTRODUCTION

La Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) planifie la mise en œuvre de la loi de transition écologique pour une croissance verte (LTECV de 2015) dans le domaine de l'énergie. Elle s'inscrit dans la stratégie nationale bas carbone (SNBC). La SNBC vise la neutralité carbone en 2050.

Pour ce qui concerne l'énergie nucléaire elle vise deux objectifs :

- ramener à 50 % la part de cette énergie dans le Mix énergétique de 2035 tout en maintenant le mono-recyclage du Pu jusqu'en 2040-2050 ;
- atteindre le cycle fermé du combustible nucléaire avec des RNR au siècle prochain en préparant cette ultime étape par le multi-recyclage du Pu dans des EPR2, à construire vers 2035.

Le premier objectif implique la fermeture de 14 réacteurs de 900 MWe, dont ceux de Fessenheim et le moxage de plusieurs réacteurs de 1300 MWe ainsi que le recyclage de l'URT dans deux réacteurs 900 MWe puis dans des réacteurs de 1300 MWe. L'utilisation de ces combustibles implique des adaptations techniques. Le deuxième objectif devrait être confirmé, probablement au-delà de 2035, il concerne notamment la réalisation d'un démonstrateur de RNR. Il implique de profonds changements dans la gestion du combustible nucléaire.

Les deux objectifs apparemment séparés dans le temps ne sont pas indépendants. En effet tout retard dans le moxage des réacteurs 1300 MWe conduit à des accumulations de combustibles usés qu'il faut entreposer sur de longues durées.

Les acteurs du nucléaire, le CEA, EDF, Framatome et Orano s'apprêtent à poursuivre ces deux objectifs simultanément. Les actions doivent être coordonnées. Cette coordination est contrainte par la vitesse des développements technologiques et la nécessité d'assurer, dans la continuité, l'indépendance énergétique du pays, qui dépend, entre autres, d'événements géopolitiques.

Cette annexe rappelle les actions en cours et les programmes envisagés et qui ont été présentés à la Commission avec les deux objectifs cités ci-dessus. Elle ne porte pas sur d'autres orientations de la PPE touchant au nucléaire comme l'étude de nouveaux réacteurs. Tous les acteurs sont impliqués, séparément ou ensemble, le CEA restant au centre de la R&D.

LES TRAVAUX D'EDF, FRAMATOME ET ORANO SUR LE MOXAGE DES REACTEURS DE 1300 MWE ET L'UTILISATION DE L'URT

Ces industriels sont engagés dans les actions qu'appelle le premier objectif : la gestion d'un parc électronucléaire en diminution de puissance et mono-recyclant le plutonium et l'uranium. La R&D portera sur le moxage des 1300 MWe et l'utilisation de l'URT. Ils participent à la R&D que conduit le CEA sur les aspects de multi-recyclage du Pu en EPR et en RNR.

Le moxage des réacteurs de 1300 MWe

EDF envisage de moxer des réacteurs 1300 MWe dès 2028. L'introduction progressive de MOX se ferait dans 6 réacteurs après leur quatrième visite décennale. La modification de la géométrie des assemblages (passage de 9 à 14 pieds) et ainsi que celle de leurs emballages de transport (ACU MOX 14 pieds) sera nécessaire. EDF prépare la DAC.

La reprise de l'utilisation de l'URE en réacteurs

Le stock de combustible URT est de 20 000 tonnes sous forme de U_3O_8 entreposé à Bessines et à Tricastin. 1200 assemblages (environ 600 tonnes) de URE (URT ré-enrichi à 4,6 % en ^{235}U) ont été utilisés dans les 4 réacteurs de Cruas entre 1994 et 2013. Cette valorisation a été arrêtée en 2013 pour des raisons économiques (baisse du cours de l'uranium) et environnementales: La gestion des effluents en Russie (suite à l'enrichissement de l'URT séparé à la Hague) n'était pas conforme aux critères environnementaux d'EDF. Dès 2023, considérant les risques de saturation à court terme des capacités d'entreposage de l'URT, EDF envisage une reprise progressive du chargement en URE des réacteurs de Cruas, après les VD4, dans l'ordre Cruas 3, 1,4 et 2. L'enrichissement en ^{235}U de l'URT sera porté à 5 % par Tenex (voire Urenco) et les assemblages URE seront fabriqués par Framatome. Le début de fabrication est prévu pour 2022 (d'abord en utilisant un URE à 15 ppb en ^{232}U puis à 30 ppb). Plus tard en 2027 et progressivement l'URE sera utilisé dans 7 réacteurs 1300 MWe (après leur VD4). En 2030, 8 réacteurs devraient ainsi consommer 1150 tonnes/an de combustible URE. Dans ces conditions le stock de URT atteindrait 5 000 tonnes vers 2050. Rappelons que les assemblages d'URE usé ne sont pas retraités.

LES TRAVAUX CONDUITS PAR LE CEA

La réorganisation du CEA

En accord avec les perspectives ouvertes par la SNBC et la PPE le CEA s'est restructuré pour conduire des recherches visant une approche intégrée du système énergétique. Cela implique une R&D ambitieuse multi-systèmes couvrant les domaines des énergies renouvelables, de l'énergie nucléaire, du stockage de l'énergie et des différents vecteurs de l'énergie (électricité, chaleur, hydrogène). La fermeture du cycle du carbone par la synthèse de produits combustibles à partir d'hydrogène sera étudiée.

Concernant le nucléaire du futur, la R&D portera essentiellement sur le multi-recyclage du Pu dans les EPR 2 (à construire par EDF) et la fermeture du cycle avec des RNR-Na. Le CEA assurera par ailleurs une veille technologique active sur les SMR (court terme plutôt porté par EDF), les MSR (long terme) et d'une façon générale sur les filières Gen IV. Tant en matière de R&D que de veille le CEA souhaite en couvrir tous les aspects : techniques (matières nucléaires, matériaux, composants, systèmes) et économiques.

Ce large déploiement de la R&D autour de l'enjeu central d'intégration des énergies nécessite une cohérence des actions. Le CEA procède à une réorganisation qui vise à remplacer la DEN par une Direction des énergies (DE) afin d'être en mesure de jouer le rôle de concepteur de solutions pour la mise en œuvre de la transition énergétique souhaitée par le gouvernement. Le pilotage de la R&D se fera grâce à une Direction des programmes « énergies » (DPE) et une Direction scientifique « énergies » (DES) couvrant la recherche et l'innovation portées par trois centres : Cadarache, Marcoule et Saclay.

Les centres sont eux-mêmes réorganisés avec une Direction rattachée directement à la Direction générale du CEA (portant l'ensemble des activités régaliennes ou de support) et la création d'instituts thématiques fédérant les activités de recherche : l'Institut de recherche sur les systèmes nucléaires pour la production d'énergie bas carbone (IRESNE) à Cadarache, l'Institut des sciences et technologies pour une économie circulaire bas carbone à Marcoule (ISEC) et l'Institut des sciences appliquées et de la simulation pour les énergies bas carbone à Saclay (ISAS). L'itélé couvrant le domaine de la technico-économie des systèmes énergétiques est désormais intégré à la DES et rebaptisé Institut TECH-ECHO. Cette réorganisation se fonde sur une redistribution des compétences actuelles au sein du CEA. Elle marque une rupture puisque les activités nucléaires n'apparaissent plus comme un domaine de compétence à part entière.

Le programme de recherche amont traditionnellement consacré à la filière nucléaire, déjà revu à la baisse depuis plusieurs années, est rebaptisé « programme de recherche transverse amont ». De nouveaux programmes émergent, consacrés : aux « Procédés de fabrication et recyclage, et aux analyses de cycle de vie », à la « Production solaire », au « Stockage et solutions de flexibilité » et à « l'efficacité énergétique de systèmes complexes et aux réseaux ».

Les autres domaines ne relevant pas de la R&D, qu'ils soient fonctionnels ou opérationnels, font l'objet de Directions spécifiques de la DES : Direction des projets de démantèlement, de service nucléaire et de la gestion des déchets (DDSD), Direction de l'ingénierie et de la maîtrise d'œuvre des projets (DIMP) dont celui consacré à la réalisation du réacteur RJH, Direction des ressources humaines (DRH), Direction de la gestion, de la conformité et de la performance (DGCP). Enfin de nouveaux partenaires institutionnels, tel que l'ADEME, apparaissent dans l'organigramme.

La R&D sur les RNR et le cycle associé

a) L'achèvement du programme Astrid

Le programme Astrid, qui appartient désormais au passé, a intégré le Rex du CEA sur les RNR-Na. Il a permis au CEA et à ses partenaires de rester leader de la R&D pour les RNR-Gen IV durant 10 ans (aucun RNR Gen IV n'existe encore). La Commission en a évalué régulièrement les résultats. Tout l'acquis du programme Astrid sur ces 10 années est contenu dans le Dossier de fin de convention (DFC) regroupant 2500 documents (dossiers d'ingénierie et innovations techniques, installations expérimentales, organisation et exécution du projet, capitalisation des connaissances). Le DFC est adossé à une base numérique consultable grâce à un outil de type PLM (Product Lifecycle Management) permettant la gestion des configurations du projet et des interfaces métiers. Les derniers développements du programme Astrid durant l'année 2019 ont porté sur l'esquisse d'un RNR-Na de 150 MWe (New Astrid) plus compact que le RNR de 600 MWe (2017). New Astrid est le résultat de l'optimisation technico-économique de toutes les contraintes technologiques d'un RNR-Na pour satisfaire aux exigences d'une sûreté de type Gen IV.

Mis à part les boucles technologiques en sodium de la plateforme Papyrus, la plupart des installations expérimentales dédiées à la filière RNR (ou à vocation multi-filières), existantes (Masurca par exemple) ou en projet (Kheops, ATC, AFC, Zephyr, Mosaic, Plinus 2), ont été arrêtées.

L'essentiel du budget de la DES consacré à la filière nucléaire est absorbé par le projet RJH et par les chantiers d'assainissement-démantèlement des INB du CEA arrivées en fin de vie ou arrêtées prématurément.

Même si le prix de l'uranium n'incite pas à un recours aux RNR à moyen terme il faut préserver les connaissances sur les réacteurs et le cycle du combustible RNR. C'est l'objectif annoncé du programme post 2019 du CEA « Réacteurs de 4^{ème} génération ». Il est réorienté, jusqu'en 2030, sur une veille technologique et une R&D exploratoire avec des jalons indicatifs.

b) Les travaux sur les réacteurs

Il s'agit d'approfondir et de valoriser les acquis d'Astrid dans les domaines :

- de la physique des réacteurs RNR-Na (neutronique, thermo-hydraulique, accidents graves) et des matériaux (combustible et gaine). Pour la physique il s'agit de maintenir et développer des OCS reposant sur le calcul et la simulation et de les qualifier par « Benchmark » et si possible par des expériences ciblées au sein de collaborations internationales. Pour les matériaux, il s'agit d'exploiter le trésor Phénix, de qualifier l'acier des gaines au-delà de 90 déplacements par atome (dpa) et d'améliorer les connaissances concernant le comportement du MOX sous irradiation (modélisation et expériences) ;
- de la visualisation et des mesures sous sodium à l'aide de robots et de capteurs ;
- des études d'esquisses de RNR-Na plus sûrs et plus performants (simplifications) et de RNR-sels fondus (études de faisabilité, identification des verrous technologiques, approche de sûreté d'un réacteur à combustible liquide).

76

c) Les travaux sur le cycle

L'ambition d'Astrid était de développer des ateliers de fabrication et de retraitement de MOX-RNR avec les procédés associés et plus généralement de démontrer la fermeture du cycle RNR pour Pu et U puis pour les actinides mineurs. Seules quelques esquisses d'ateliers ont été réalisées. En revanche la R&D sur les procédés a permis des avancées comme la démonstration de la capacité de transmutation des RNR grâce à des CCAM (couvertures chargées en actinides mineurs) dont le CEA souhaite poursuivre l'étude.

Les acquis de l'utilisation du MOX-REP doivent permettre de préfigurer les conditions d'utilisation de MOX-RNR en bénéficiant des études et de la mise en œuvre industrielle du multi-recyclage du Pu (MOX- EPR) dans des EPR de deuxième génération.

Un premier axe de R&D concerne la fabrication du MOX en utilisant la métallurgie des poudres. Ceci implique la connaissance de propriétés de PuO₂, de UO₂ (U appauvri) et de leurs mélanges telles que broyage, coulabilité, pressage, frittage. La coulabilité des poudres est importante pour éviter la formation d'hétérogénéités dans le combustible. Un cryobroyage des poudres dans l'azote liquide donne une meilleure granulométrie que le broyeur à boulets utilisé jusqu'ici. La modélisation des microstructures et des étapes mécaniques et thermiques permettra d'améliorer la compréhension des phénomènes. Grâce à l'identification des paramètres gouvernant la qualité du MOX les rebuts de l'usine Melox pourraient être sensiblement réduits. Les expériences seront conduites à Atalante où les fonctionnalités du LEFCA ont été transférées. S'agissant des composants de l'assemblage MOX le CEA ne poursuivra les études que sur le tube hexagonal (qualité de l'acier).

Un deuxième axe est dédié au retraitement du MOX-REP pour lequel Orano, dans le cadre du projet TCP souhaite démontrer la fermeture du cycle sur Pu. La dissolution du MOX-REP dans

l'acide nitrique, sans perte de Pu, est la première étape déterminante du procédé. Actuellement le traitement passe par une dissolution globale du combustible et de sa gaine. La R&D est orientée vers une séparation préalable de la gaine et du combustible pour réduire le temps de dissolution (qui est approximativement doublé pour le MOX par rapport à l'UOX).

Le CEA étudie la découpe par laser ou par jets d'eau qui fournissent des coupes franches. L'oxydation de UO_2 en U_3O_8 par l'oxygène (voloxydation) de même que la dissolution en continu dans un dissolvant à effet vortex améliorent la cinétique de dissolution de l'oxyde mixte Pu/U par rapport à la mise en œuvre actuelle en batch. L' UO_2 compact est transformé en U_3O_8 pulvérulent facilement séparable de la gaine. Les travaux de modélisation de la microstructure du MOX usé (amas de Pu, isotopie, PF) sont au premier plan de la R&D. Des essais de récupération quantitative du Pu (99,99 %) par le procédé Purex, à partir de MOX-REP (Pu de première et deuxième génération) sont envisagés dans Atalante dans les 10 ans qui viennent. Le multirecyclage MOX-REP utilise trois fois plus de Pu que le cycle industriel actuel, les manipulations exigent des mesures de radioprotection accrues en raison de la présence d'isotopes irradiants du plutonium. Dans le cycle MOX-RNR la quantité de Pu engagée est 10 fois celle du cycle actuel avec des contraintes de radioprotection plus sévères que celles du cycle MOX-REP.

Au-delà de 2030, le CEA devra disposer de connaissances complémentaires à celles acquises dans le cadre du programme Astrid :

- pour fermer un cycle RNR avec de nouveaux procédés ;
- pour la fabrication du MOX-RNR ;
- pour le retraitement du MOX-RNR usé.

De même, le procédé Purex doit être remplacé par un procédé en une seule étape sans phase redox. Le CEA a déjà sélectionné des mono-amides candidats pour un tel procédé et des essais sur MOX-REP réel sont en cours dans Atalante.

Le programme de R&D du CEA porte à la fois sur le MOX-REP et le MOX-RNR ; il reste à définir tout comme les moyens à engager et les installations à mettre en œuvre.

Même s'ils ont des points communs ces combustibles sont de natures très différentes et les moyens expérimentaux à mettre en œuvre pour les fabriquer et les recycler sont spécifiques. La solubilité des différents MOX en milieu nitrique car elle est liée à la géométrie des pastilles, à la teneur en Pu, à la stœchiométrie, à la microstructure des oxydes mixtes et à la répartition des PF dans l'oxyde irradié.

d) Les collaborations internationales sur les RNR et le cycle

Le CEA poursuivra ses collaborations, pour la plupart déjà engagées pour développer Astrid, avec les pays qui étudient les RNR Gen IV (Japon, Russie, USA-DOE, Inde et Chine) de façon plus ou moins active. Ces collaborations portent surtout sur l'échange de connaissances au niveau de la modélisation-simulation (sur des expériences déjà réalisées si possible) et des OCS.

S'agissant des programmes faisant suite au projet Astrid, les moyens attribués sont en net retrait. Les seuls programmes couplés avec de nouvelles expériences sont prévues avec le Japon-JAEA et MHI (boucle technologique Athena, études des accidents graves), la Russie-Rosatom (accès à la maquette critique BFS de l'IPPE, accès à BOR60 voire BOR600 pour des irradiations par neutrons rapides) et l'Inde-IGCAR (feu de sodium). Par ailleurs, le CEA poursuit certains programmes dédiés à la transmutation au travers des programmes européens permettant de financer l'examen post-irradiation d'échantillons d'oxydes mixtes (U, Pu, Am). Le programme GENIORS, certes d'ampleur limitée et faisant suite au programme européen SACSESS lancé dans le cadre du 7^{ème} PCRD, vise à explorer les différentes stratégies possibles de recyclage dans des réacteurs de 4^{ème} génération avec les procédés du cycle associés. Le CEA poursuit ses

études avec ses installations sodium, et, s'agissant du combustible de transmutation une collaboration avec Myrrha est envisagée.

Le multi-recyclage du Pu et U en REP

Le déploiement du multi-recyclage du Pu (et U) devrait débuter entre 2040 et 2050 dans les EPR2. Il faut disposer des résultats de la R&D dès maintenant pour développer les procédés industriels de fabrication et de retraitement du combustible MOX, pour avoir le temps d'aménager les installations de mise en œuvre de ces procédés et pour qualifier les moyens de transport des assemblages. Un assemblage test MOX-REP devrait être mis en réacteur REP dès 2025 (date jalon).

a) Le programme

EDF, Framatome, Orano et le CEA ont établi un programme de R&D pour maîtriser ces contraintes, programme qui sera conduit en mode projet par des équipes multi-entités. Le CEA pilote les simulations des flux et des inventaires des cycles, alors que EDF, Framatome et Orano gèrent la faisabilité industrielle de fabrication du combustible et le pilotage des réacteurs et usines du cycle. Orano et le CEA sont responsables de la définition et de la préparation d'un assemblage test.

78

Le CEA travaille sur les procédés avancés du cycle visant les RNR (CEA) mais pouvant s'appliquer au retraitement du MOX-REP au cours du multi-recyclage du Pu. 6 M€ par an sont dédiés à ces travaux pour les premières années.

Le multi-recyclage du Pu implique par définition de réutiliser le Pu plusieurs fois. A chaque passage en réacteur REP la qualité fissile du Pu diminue puisque le ^{239}Pu est consommé (comme les autres isotopes impairs). Le Pu couramment utilisé aujourd'hui dans le MOX et provenant de l'UOX est du Pu de première génération. Le MOX-REP usé que l'on entrepose en piscine contient du Pu de deuxième génération. Dans le multi-recyclage en REP la dégradation isotopique du Pu est compensée par de l'uranium enrichi en ^{235}U , très fissile comme le ^{239}Pu , avec des neutrons lents. La quantité et le niveau d'enrichissement de l'UO₂ ajouté seront donc ajustés pour maintenir constante la performance du combustible.

b) Les concepts de combustibles

Deux concepts sont étudiés : Corail (version de référence dite Corail A et version exploratoire Corail 2000) et MIX. Dans le concept Corail les assemblages sont hétérogènes et constitués de crayons de MOX-REP classiques (PuO₂ et UO₂, U appauvri) et de crayons UOX classiques (UO₂, U enrichi en ^{235}U), leurs teneurs en Pu et ^{235}U étant variables. Les différences entre Corail A et Corail 2000 résident dans le nombre respectif de crayons MOX et UOX et dans leur arrangement au sein de l'assemblage. Dans le concept MIX les assemblages sont homogènes et constitués de crayons identiques d'un nouveau MOX (PuO₂ et UO₂, U enrichi en ^{235}U), les proportions de Pu et ^{235}U étant également variables (Pu < 12 %, ^{235}U < 5). La variabilité des compositions en Pu et ^{235}U dépend de l'isotopie du Pu, qui varie selon qu'il s'agit de Pu de première, deuxième, ... génération et de contraintes de sûreté dans la conduite du réacteur. Les deux concepts sont évolutifs. L'U enrichi proviendra, comme aujourd'hui, d'uranium naturel, le Pu pourra provenir des

combustibles usés UOX, URE, MOX-REP. L'URT peut être utilisé dans les combustibles MIX ou Corail.

Le concept Corail 2000 est faiblement consommateur de Pu, comparé au Corail A et au MIX. Globalement, le combustible Corail utilise deux fois moins de Pu que le combustible MIX. Les deux concepts produisent plus d'actinides mineurs que le mono-recyclage actuel. Le meilleur consommateur de Pu serait le concept MIX à 9,54 % en Pu dans un EPR2 moxé à 100 % : Il consommerait 43 kg/TWhe mais il produirait 10,2 kg/TWhe d'actinides mineurs.

L'ajustement et l'optimisation des paramètres des concepts Corail ou MIX dépendent beaucoup des objectifs visés dans le multi-recyclage. Les scénarios d'évaluation des flux de matières et de déchets lors du renouvellement du parc actuel de REP (en accord avec les autres dispositions de la PPE) permettent une première approche.

c) Les scénarios de faisabilité

Le CEA a conduit cet exercice dans différentes hypothèses de puissance du parc (maintien à 60 GWe avec 18 EPR, 30 GWe en 2050 avec 18 EPR, 10 GWe en 2060 avec 6 EPR) avec un moxage des EPR en 2050 (les 6 premiers EPR 2 ayant été construits) et un renouvellement des usines du cycle en 2048. Les autres hypothèses sont : un retraitement du MOX usé (MOX actuellement en entreposage, MOX-Corail ou MOX-MIX usés à venir en dilution avec UOX actuellement en entreposage), un inter cycle retraitement-fabrication du combustible de 5 ans, la poursuite de la construction d'EPR au-delà des 6 prévus pour arriver à 18 EPR vers 2060 et des ERP fonctionnant avec UOX ou URE.

Le CEA a calculé la consommation en U naturel, les stocks de combustibles usés et les inventaires en Pu et actinides mineurs jusqu'en 2090 en fonction du concept Corail et MIX avec plusieurs teneurs en Pu et ²³⁵U et un pourcentage de moxage des EPR variable. Comme pour tous les scénarios multi-paramétriques, on ne peut en tirer que des tendances. Pour la trajectoire médiane à 30 GWe en 2090, la consommation d'uranium naturel est réduite à 2 à 3 kt/an, les encours et besoins en Corail ou MIX sont variables mais plus ou moins constants pour chaque concept, tout le Pu est engagé dans le cycle (le MOX-REP aujourd'hui en entreposage a été retraité) et la quantité totale est stabilisée à 600 t (depuis 2070). Les quantités d'actinides mineurs sont stabilisées (de l'ordre de 250 t) avec un accroissement de 3 t/an. Un autre enseignement est que pour une trajectoire à 10 GWe avec 6 EPR on ne peut pas stabiliser le stock de Pu.

Il reste à établir la faisabilité de toutes les hypothèses pour évaluer les gains réels du multi-recyclage par rapport au mono-recyclage, qui, s'il est poursuivi jusqu'en 2090 dans un parc à 18 EPR 2 ne conduirait pas à la stabilisation du Pu mais à l'accumulation de MOX-REP usé hors cycle. En tout état de cause la production des actinides mineurs sera plus importante et il faudra gérer le flux de Pu. Un MIX à 9,54 % en Pu multiplie par trois le flux de plutonium par rapport au monorecyclage (300 t/a au lieu de 100) et la composition isotopique du Pu est fortement dégradée.

d) La R&D immédiate

Dans l'immédiat, d'ici 2025, il reste à EDF et Framatome à étudier la compatibilité des assemblages Corail et MIX avec la conduite d'un EPR 2 en exploitation, et à fabriquer dans La Chaîne Test (LCT) de Melox, un assemblage test Corail (Pu 9,54, 9,08 et 8 %, ²³⁵U 2 %) et un crayon MIX (Pu 12 % et ²³⁵U 4,95 %) à partir du Pu de MOX-REP usé séparé à la Hague (ou éventuellement dans Atalante) et de U enrichi en ²³⁵U. Dans le cas de Corail, on envisage un assemblage entier, pour MIX la construction plus compliquée conduit au choix d'un crayon.

Dans cette perspective de court terme le CEA a récemment dissous dans Atalante un crayon de MOX-REP préparé par métallurgie des poudres (procédé Mimas) et irradié en REP.

L'irradiation de l'assemblage test en REP ouvrira à des expériences post-irradiations de caractérisation et de traitement chimique entre 2025 et 2035. Des irradiations de crayons REMIX (PuO₂ 1 % et UO₂ 4 % en ²³⁵U) sont en cours d'irradiation en Russie (MIR au RIAR et VVER de Balakovo). C'est un travail important et le calendrier (2020-2030) est serré. Pour l'instant il ne tient pas compte de la décision de construction des EPR 2. Les concepts Corail ou MIX pourraient ainsi être définis vers 2030.

La R&D du CEA comporte aussi des expériences sur la fabrication du MOX et sur le retraitement dans un cadre commun aux REP et aux RNR.

e) Les aspects industriels

Au plan industriel les besoins pour un multi-recyclage sont conséquents.

Seule l'utilisation du MOX de type CORAIL semble accessible à court-terme en utilisant les installations existantes du cycle (La Hague et Melox). L'utilisation du MOX de type MIX nécessitera des investissements lourds car elle exige de nouvelles installations du cycle.

D'ici à 2090 les usines de retraitement devront traiter en concomitance UOX, MOX-REP et MOX-Corail ou MIX usés ; la fabrication du combustible neuf devra être assurée. La faisabilité de ces opérations dans les usines actuelles est examinée. Elles pourraient assurer le démarrage mais un fonctionnement industriel nominal ne pourra être obtenu que dans des usines renouvelées. A cet égard les difficultés rencontrées aujourd'hui à MELOX pour produire le MOX pour le mono-recyclage devront être surmontées, 10 t/an de MOX sont mises au rebut en raison de la qualité de l'UOX actuellement utilisé. Aujourd'hui la fabrication du MIX (sauf à faire des échantillons dans La Chaîne Test) n'est pas possible avec de l'uranium à plus de 1% de ²³⁵U. D'autres contraintes réglementaires sont également liées à la thermique des crayons (P crayon ≤ 5W) et des assemblages (P assemblage ≤ 1100 W).

Il convient de vérifier que le déploiement industriel du multi-recyclage en EPR vers 2050-2060 ne risque pas d'entrer en conflit avec le lancement d'un programme RNR vers la fin du siècle quant à la qualité du Pu issu de son multi-recyclage en EPR.

f) La compatibilité avec la gestion du parc

Le multi-recyclage du Pu a pour but selon la PPE de stabiliser l'inventaire en Pu et en nombre d'assemblages de CU ainsi que de préparer le cycle RNR.

Les réacteurs EPR 2 peuvent être moxés à 100 % mais au début EDF n'envisage un moxage qu'à 30 %. Pour l'instant EDF examine si un tel multi-recyclage respecte les critères associés :

- à une compatibilité d'exploitation dans les EPR2 avec le reste du parc ;
- à une réelle diminution des inventaires déchets/matière par rapport au mono-recyclage ;
- à la préparation du cycle RNR ;
- à la faisabilité de fabrication et retraitement des assemblages de combustible dans les usines du cycle (Melox ou Melox 2, UP3 prolongée ou UP4 ?) ;
- aux transports des matières radioactives et à la logistique d'exploitation d'un parc mixte ;
- à un coût compétitif ou acceptable ;
- aux scénarios de gestion pour un parc nucléaire en diminution.

ANNEXE VIII : NOTE D'INFORMATION AU PARLEMENT SUR LE RAPPORT FINAL DE LA REVUE EXTERNE SUR LA GESTION DES DÉCHETS BITUMÉS (NOVEMBRE 2019)

1. RÉSUMÉ ET CONCLUSION

CONTEXTE

Par lettre du 11 Mai 2018, l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques a demandé à la Commission de suivre les travaux de la revue externe sur la gestion des déchets bitumés et d'informer le Parlement sur ses conclusions. Un membre de la Commission a donc suivi en tant qu'auditeur les réunions du groupe de revue. La Commission tient à souligner la haute qualité scientifique des travaux réalisés dans ce cadre et la prise en compte au meilleur niveau des recherches internationales et des avis d'experts internationaux dans le domaine de la caractérisation et du traitement des déchets nucléaires ou de la maîtrise du risque d'incendie dans les ouvrages souterrains.

PRINCIPALES RECOMMANDATIONS DE LA REVUE EXTERNE

Le rapport établi par le groupe de revue prend en compte l'état de l'art au plan international, les études du CEA, celles conduites par EDF, Orano et l'Andra, ainsi que les avis de l'IRSN. Le groupe a aussi bénéficié de l'expertise de plusieurs personnalités internationales. Le rapport identifie les études complémentaires à mener pour déterminer la part des colis de déchets bitumés qui pourra être stockée en toute sécurité dans Cigéo sur la base de connaissances plus précises que celles d'aujourd'hui. Ces nouvelles études impliquent de :

- Compléter les études de réactivité des différentes catégories de déchets bitumés en réponse à des sollicitations thermiques variées, en effectuant de nouvelles mesures, des analyses complémentaires et une validation de la modélisation des phénomènes. Ces travaux sont notamment destinés à mieux préciser les incertitudes affectant la caractérisation des réactions exothermiques.
- Consolider les études conduites par l'Andra en utilisant les techniques d'ingénierie disponibles actuellement pour adapter les options de conception afin de permettre le stockage des déchets bitumés qui seront destinés à Cigéo dans les meilleures conditions de sûreté.

Par ailleurs, le rapport recommande des études comparatives approfondies des différents procédés de neutralisation de la réactivité chimique des colis de déchets bitumés car on ne peut exclure que des colis, mal connus, ne puissent satisfaire aux critères d'acceptation définis par l'Andra.

Le groupe de revue estime que les travaux complémentaires qu'il propose en vue de la caractérisation des phénomènes exothermiques pourraient être réalisés en quelques mois.

AVIS DE LA COMMISSION

La Commission souligne la pertinence des avis émis par le groupe de revue.

Elle considère que les compléments d'étude proposés pourraient permettre d'acquérir de premiers résultats significatifs avant même le dépôt de la DAC et des conclusions complètes avant la fin de sa période d'instruction si les moyens adéquats sont mobilisés.

Elle recommande en toute première priorité que le CEA établisse au plus vite un programme d'action vigoureux, afin de mener les études et recherches nécessaires pour achever de caractériser au mieux les déchets bitumés. Ce programme devra viser à déterminer les températures minimales de déclenchement des réactions exothermiques, leurs caractéristiques, et à quantifier rigoureusement leurs incertitudes, afin de définir sur des bases solides les marges de sécurité à prendre.

Elle recommande de poursuivre l'analyse comparative des procédés de neutralisation de la réactivité des enrobés bitumés en tenant compte du nombre de colis à traiter, de la maturité technologique des procédés, de leur coût, de leur performance et de leur impact sanitaire et environnemental. Des travaux conséquents seront nécessaires pour aboutir à un processus industriel dont l'impact sur l'environnement serait maîtrisé. La Commission note que le procédé par dissolution présente à ce stade de l'analyse quelques atouts incontestables qu'il conviendrait de mieux explorer.

Elle considère enfin que les évolutions de conception de Cigéo lancées par l'ANDRA devraient permettre de répondre aux exigences réglementaires concernant la prévention des risques d'incendie et leur mitigation. L'augmentation de la capacité d'isolement des colis de stockage et l'accroissement du diamètre des alvéoles permettraient notamment la localisation et l'extraction de colis suspects.

2. ANALYSE DÉTAILLÉE DU RAPPORT DU GROUPE DE REVUE

CARACTÉRISATION DES ENROBÉS BITUMÉS

Analyse de la revue

Les enrobés bitumés des boues de co-précipitation des effluents radioactifs sont des systèmes physico-chimiques complexes. Des études de microcalorimétrie montrent que des réactions exothermiques peuvent se déclencher au sein des enrobés. Ces enrobés sont inertes à température ambiante mais ils peuvent être auto-réactifs s'ils sont soumis à une élévation de température dans des conditions qui restent à définir. Il est donc capital de savoir à quelles températures des réactions exothermiques peuvent avoir lieu dans un fût bitumé soumis à des sollicitations thermiques diverses. Le groupe de revue a évalué les connaissances scientifiques disponibles pour éclairer le comportement des fûts bitumés et tout particulièrement ceux de Marcoule.

La connaissance des compositions des fûts repose sur les historiques de fabrication dont certains sont mal documentés ; elle est confortée par des mesures directes sur quelques fûts lors de leur reconditionnement. Les documents sur la réactivité des enrobés bitumés soumis à une élévation

de température sont rares et essentiellement issus de rapports internes du CEA, de SCK (Belgique) et du JAEA (Japon).

Le groupe de revue a examiné les données brutes obtenues par le CEA au moyen d'expériences de microcalorimétrie différentielle réalisées à l'échelle du gramme ainsi que les résultats de modélisation de la propagation de la chaleur dans des lots à l'échelle du kilogramme. C'est sur ces bases qu'il a fait des constats et des propositions de nouvelles expériences pour consolider les estimations du CEA sur les paramètres de réactivité ou pour confirmer les préconisations de l'IRSN. Par exemple, le CEA estime que la température à retenir pour le déclenchement de réactions exothermiques est de 150 °C tandis que l'IRSN préconise de retenir, pour la conception de Cigéo, une température de 100°C.

Les constats du groupe de revue sont rigoureux et sévères.

Le groupe de revue souligne :

- la variabilité importante de composition de fût à fût pour une période de fabrication donnée et une incertitude sur l'homogénéité de distribution des sels réactifs dans un fût, compliquant une estimation globale des risques ;
- la variabilité importante des données de microcalorimétrie. Le groupe de revue considère que les études ne permettent pas de caractériser avec certitude les relations quantitatives entre compositions des enrobés et exothermicité. A cet égard il note la complexité de la méthodologie adoptée par le CEA pour caractériser la réactivité des enrobés ;
- le manque de réalisme de la validation expérimentale des modélisations de l'évolution de la température au sein de blocs chauffés d'enrobés à l'échelle du kilogramme ;
- le manque de données concernant des enrobés bitumés soumis à une radiolyse significative tenant compte de l'âge que les fûts auront en fin d'exploitation de Cigéo ;
- le manque de données concernant des enrobés bitumés à teneur élevée en nitrates qui sont apparus comme les sels les plus réactifs.

85

Le groupe de revue recommande :

- de réaliser des expériences complémentaires et répétitives de microcalorimétrie pour lever le doute sur la réalité des points aberrants constatés lors des premières expériences et réduire les marges d'incertitude liées à la méthode expérimentale (réalisation de l'échantillonnage, appareillage et interprétation des thermogrammes) ;
- de réaliser de nouvelles expériences de microcalorimétrie avec des compositions enveloppes en composants majeurs identifiés comme réactifs (couples redox à base de nitrate et de fer divalent) et/ou comme catalyseurs (hydroxyde de fer trivalent). Grâce à ces expérimentations complémentaires, un thermogramme enveloppe par lots de fûts pourrait être obtenu permettant une détermination robuste de la température minimale de déclenchement de réactions exothermiques ;
- de valider expérimentalement le code de modélisation de l'échauffement d'un enrobé frais et artificiellement vieilli à une échelle représentative d'un fût.

Le groupe de revue insiste de surcroît sur la nécessité d'être extrêmement rigoureux dans la conduite des expériences et dans l'interprétation des données calorimétriques à toutes les échelles.

Avis de la Commission

- La caractérisation de la réactivité des enrobés bitumés est le point de départ de toutes les études de modélisation d'une éventuelle initialisation et propagation d'un feu dans Cigéo en période d'exploitation.
- La Commission considère que le rapport du groupe de revue prend en compte toutes les données scientifiques disponibles sur la réactivité des enrobés bitumés et que leur analyse confirme les préoccupations de l'IRSN et de la CNE.
- La Commission note que le groupe de revue estime que les nouvelles expériences préconisées pourraient être conduites dans des temps compatibles avec la date de dépôt de la DAC et avec celle de son instruction. La Commission souligne que seuls de premiers résultats significatifs pourront être obtenus avant le dépôt de la DAC compte tenu de la complexité scientifique du sujet. Elle considère que, pour tenir les délais, le CEA et les opérateurs concernés doivent se mobiliser dès maintenant. Les expériences complémentaires demandées, bien que dans la lignée des précédentes études du CEA, demandent une nouvelle approche méthodologique rigoureuse en microcalorimétrie et un changement d'échelle (kg à fût) en validation de modélisation. Un programme doit être établi sans tarder.
- La Commission considère que l'obtention de quelques thermogrammes sur des enrobés bitumés réels lèverait tout doute sur la représentativité des résultats des expériences conduites jusqu'à aujourd'hui sur des enrobés simulés.

DIFFÉRENTES VOIES DE NEUTRALISATION DES DÉCHETS BITUMINEUX.

86

Analyse de la revue

Plusieurs voies ont été considérées :

- Incinération des colis d'enrobés bitumés à l'aide d'une torche à plasma :

Le retour d'expérience des installations existantes dans le monde, dédiées aux déchets non nucléaires, ne concerne pas les bitumes. Des installations nouvelles et spécifiques devraient être créées afin d'être nucléarisées. L'adaptation du procédé PIVIC, en cours de développement par Orano pour le traitement de déchets alpha contenant des métaux et des composés organiques contenant du plutonium, permettrait le traitement d'un fût d'enrobés bitumés dans une installation unique mais avec une cadence de traitement limitée. Le déchet ultime serait constitué d'un colis diphasique rassemblant une phase métallique et une phase vitrifiée. De nombreux aspects techniques restent à développer et à qualifier, comme la découpe des fûts par un jet d'azote liquide, la radioprotection ou encore l'adaptation du creuset aux contraintes des bitumes. La maintenance d'une telle installation ainsi que sa sûreté doivent faire l'objet d'études complémentaires. Enfin s'agissant de l'impact environnemental du procédé, le rejet possible d'éléments volatils tels que le césium et l'émission de particules radioactives de taille très fine à la sortie des dispositifs de filtration doivent être maîtrisés.

- Incinération des colis d'enrobés bitumés dans un four à haute température :

Cette approche développée par les sociétés Socodei/EDF et Séché s'appuie sur l'expérience de Centraco à Marcoule et sur celle de Séché en matière de traitement de déchets conventionnels. Les fûts entiers d'enrobés bitumés sont cryo-broyés pour permettre l'introduction du déchet dans un four tournant, les mâchefers obtenus constitueraient les déchets ultimes dont la gestion devrait être élaborée en concertation avec l'Andra. La nature et la gestion des effluents gazeux restent à préciser car la

combustion du bitume produira des suies importantes et, comme pour l'incinération par plasma, il faut tenir compte de la présence possible d'éléments radioactifs volatils et de particules très fines en sortie des dispositifs de filtration. La sûreté d'une telle installation devra être étudiée.

- Vaporéformage (gazéification par l'eau) des enrobés bitumés :

Cette approche, étudiée par Socodei/EDF prévoit un prétraitement pour séparer les enrobés bitumés du fût métallique et de pulvériser le bitume en fines gouttelettes dans un lit fluidisé. L'opération paraît difficile avec un composé tel que le bitume dans des conditions nucléarisées. Là encore, la gestion des effluents gazeux et liquides, tout comme la démonstration de sûreté, doivent faire l'objet d'études plus approfondies.

- Dissolution des enrobés bitumés dans un solvant organique :

Ce processus, étudié en Belgique, pourrait constituer une approche intéressante car il s'appuie sur des techniques de séparation très bien maîtrisées dans l'industrie nucléaire et la pétrochimie, industries qui utilisent largement la dissolution des bitumes par solvant. L'enrobé bitumé est dissous dans un solvant aromatique et l'ajout d'un solvant aliphatique permet de précipiter les asphaltènes et les sels, qui sont ensuite traités par ultrasons dans l'eau afin de solubiliser la majorité des nitrates. Le solide final ainsi obtenu, potentiellement stockable dans Cigéo, serait exempt de maltènes inflammables et de nitrates dont le conditionnement et le stockage devraient être étudiés par ailleurs. Un traitement du solvant contenant les hydrocarbures saturés, aromatiques et les résines devra être mis au point pour permettre le recyclage du solvant de dissolution. Le devenir des solutions aqueuses nitratées devra être étudié.

Le groupe de revue conclut que l'étude des processus de neutralisation des déchets bitumés doit être poursuivie et la Commission soutient cette recommandation. L'approche par dissolution au moyen d'un solvant présente des avantages certains car elle fait appel à une technologie maîtrisée et elle n'implique pas de production d'effluents gazeux ou de particules fines. Ce procédé trouverait un intérêt particulier au cas où seul un nombre limité de fûts, de composition mal connue devrait être traité car le volume de solvant nécessaire serait alors acceptable.

Avis de la Commission

La Commission recommande :

- une analyse comparée des procédés de neutralisation des déchets bituminés en tenant compte du nombre de fûts à traiter, de la maturité technologique du procédé ainsi que d'autres paramètres clés tels que leur niveau de performance, leur coût, les déchets secondaires produits, et leur impact environnemental. Cette analyse devrait permettre de prioriser les programmes de R&D à lancer ;
- une réflexion sur les modalités d'identification des fûts qui ne satisferaient pas aux critères d'acceptation des colis dans Cigéo et devraient faire l'objet d'un traitement.

ÉVOLUTIONS DE LA CONCEPTION DE CIGÉO POUR EXCLURE LE RISQUE D'EMBALLERMENT DES RÉACTIONS EXOTHERMIQUES

Analyse de la revue

La conception de Cigéo prévoit que les déchets MAVL – dont les colis d'enrobés bitumés – seront placés dans des alvéoles. Chaque alvéole est un tunnel ventilé d'environ 500 m de longueur utile

et équipé d'un pont stockeur. Les travaux du groupe de revue se sont concentrés sur les dispositions prévues par l'Andra pour s'assurer que, en cas de feu durant la phase d'exploitation dans un tel alvéole contenant des déchets bitumés :

- l'incendie ne provoque pas de réaction significative dans les colis de déchets ;
- la propagation reste limitée à un seul colis si l'origine du feu provient de l'emballage d'une réaction interne à ce colis ;
- les rejets sont maîtrisés et les conséquences radiologiques restent acceptables ;
- le retrait de colis suspects est possible ;
- la reprise d'exploitation est possible dans des conditions restant à préciser.

Selon le groupe de revue, le DOS ne permettait pas d'avoir une appréciation complète des dispositions prévues par l'Andra. En particulier, seul le scénario d'un incendie entraîné par un feu du pont stockeur était considéré, laissant ouverte la question de l'emballage éventuel des réactions exothermiques au sein d'un fût. Les analyses entreprises par l'IRSN sur un scénario d'emballage lors de l'examen du DOS étaient fondées sur une modélisation très simplifiée destinée uniquement à poser le problème de manière incitative et permettre d'encourager la poursuite des études.

Le groupe de revue souligne l'importance du travail accompli par l'Andra depuis le DOS et durant le déroulement de la revue. Deux scénarios sont aujourd'hui considérés : le scénario de feu d'équipement et le scénario d'emballage. Concernant le scénario de feu d'équipement, le groupe de revue note une nette réduction du risque suite aux travaux de l'Andra. Les niveaux de sollicitation thermique sont à présent d'un ordre de grandeur plus faible que lors des essais réalisés par le passé sous feu conventionnel, au terme desquels les colis avaient bien résisté. Concernant le scénario d'emballage, le groupe de revue insiste sur la nécessité de réaliser des essais à l'échelle 1, afin de renforcer la pertinence des diverses modélisations entreprises et d'éviter, en mettant en œuvre des modèles trop simplifiés, de devoir prendre des marges de sécurité trop importantes.

88

Le groupe de revue note l'importance du rôle du colis en béton accueillant les fûts d'enrobés en situation de stockage. Celui-ci aura le statut d'Équipement Important pour la Protection (EIP). L'Andra en a renforcé la caractérisation en cas de sollicitation thermique et de surpression interne (pour contenir une éventuelle déflagration). Elle s'est aussi assurée de la possibilité de manipuler un colis après incendie.

Des mesures supplémentaires ont enfin été proposées par l'Andra afin de renforcer les dispositifs de détection et de lutte contre un incendie. L'augmentation de la section des alvéoles (résultant d'un choix de technologie de creusement) permet de mettre en place des dispositifs capables de retirer plus facilement les colis en cas d'indisponibilité du pont stockeur.

Avis de la Commission

Le groupe de revue considère que les dispositions techniques permettant le stockage des déchets bitumés dans Cigéo dans des conditions de sûreté acceptables peuvent être définies sur la base des moyens actuels de l'ingénierie. Il a la conviction que l'Andra devrait atteindre cet objectif à court terme. La Commission partage, au vu des éléments du rapport qui lui a été transmis, cette conviction et suivra avec attention les travaux à venir de l'Andra.

La Commission constate que les travaux de conception de Cigéo en vue du stockage des déchets bitumés ont avancé à un rythme soutenu. La définition des deux scénarios d'incendie envisagés précise les conditions proposées pour établir la démonstration de sûreté. Toutes les études ne sont pas terminées et la Commission veillera à ce que les programmes expérimentaux à l'échelle 1 à réaliser par l'Andra, auxquels le groupe de revue est très attaché, lui soient présentés. Enfin, et comme le mentionne le groupe de revue, la Commission rappelle qu'il convient toujours de privilégier des moyens passifs de réduction des risques d'incendie et de sa propagation. En outre, le strict respect des conditions d'acceptation des colis de déchets bitumés sera indispensable au maintien du niveau de sûreté de Cigéo.

ANNEXE IX : CORROSION ACCÉLÉRÉE DES VERRES DANS CERTAINES SITUATIONS

Un article scientifique (Guo *et al.*, 2020) dans la revue *Nature Materials* fait état d'une corrosion accélérée des verres au niveau de certaines interfaces, dans des conditions représentatives d'un stockage de déchets sur le site de Yucca Mountain (États-Unis). Les auteurs soulignent que ces phénomènes ne sont pas pris en compte dans les modèles actuels d'évaluation de sûreté. Cette information a été reprise assez largement par la presse française, souvent sans le recul nécessaire à l'analyse d'une publication scientifique.

C'est pourquoi la Commission a jugé nécessaire d'évaluer dans quelles mesures les conclusions de ces travaux sont pertinentes dans le cas du projet Cigéo.

Les travaux menés ces vingt dernières années par la communauté internationale ont permis de comprendre les mécanismes de dégradation du verre dans des conditions de stockage. En présence d'une surface de verre fraîche, la dissolution à vitesse initiale libère des éléments dont le dépôt modifie les propriétés de cette surface. La passivation de la surface amène à un nouveau régime de dissolution, à vitesse résiduelle bien plus lente que la vitesse initiale.

L'étude mentionnée porte sur l'analyse de la dissolution des verres au contact d'acier inoxydable dans le contexte de Yucca Mountain, un concept de stockage à flanc de montagne, dans une région désertique, dans lequel la roche est non-saturée (la porosité est surtout remplie d'air et d'un peu d'eau très salée) et le milieu chimiquement oxydant. Dans ces conditions, les auteurs montrent que l'oxygène de l'air provoque l'oxydation des aciers inox par piqûre et permet la formation de certains minéraux (silicates de fer). Ces précipités consomment de la silice, empêchent la création de la couche passivante, et entretiennent une dissolution rapide du verre.

Au-delà de l'intérêt scientifique de l'étude sur la compréhension de nouveaux mécanismes, il convient de bien cerner les limites de son application dans le contexte de Cigéo : l'analyse de sûreté doit se faire évidemment avec les conditions du site considéré. Les argilites du Callovo-Oxfordien, à 500 m de profondeur, sont un milieu à très faible porosité et totalement saturé en eau. L'oxygène apporté dans le voisinage des galeries pendant la phase d'exploitation est très rapidement consommé dès la fermeture par des réactions avec les minéraux réducteurs contenus dans les argilites : le milieu retrouve très vite des conditions réductrices, et ne permet pas l'amorçage des réactions décrites par les auteurs de l'article.

Par ailleurs, la sûreté à long terme dans Cigéo repose d'abord sur les propriétés de confinement du Callovo-Oxfordien. La matrice en verre n'a pas un rôle majeur dans le confinement : sa fonction première est de faciliter la manutention des colis pendant la phase d'exploitation. Sa dissolution, y compris en interaction avec différents éléments du stockage, est prise en compte pour le dimensionnement et l'analyse de sûreté du stockage. Les calculs, effectués avec différents modèles de dissolution intégrant pour certains des vitesses importantes, ont confirmé le rôle prépondérant de la barrière géologique loin devant le rôle du verre.

COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION

Membres de la Commission Nationale d'Évaluation :

Gilles PIJAUDIER-CABOT

Anna CRETI

Jean-Claude DUPLESSY*

Christophe FOURNIER

Philippe GAILLOCHET

Olivier GALLAND

Robert GUILLAUMONT*

Saïda LAAROUCHI ENGSTRÖM

Vincent LAGNEAU

Emmanuel LEDOUX*

Mickaële LE RAVALEC

Maurice LEROY

Virginie MARRY

José-Luis MARTINEZ

Jean-Paul MINON

Secrétaire général & Conseiller scientifique :

François STORRER

Président honoraire :

Bernard TISSOT

Secrétariat administratif :

Véronique ADA-FAUCHEUX

Florence LEDOUX

COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION

Président : **Gilles PIJAUDIER-CABOT**

Vice-Présidente & Vice-Président : **Mickaële LE RAVALEC & Maurice LEROY**

Secrétaire général & Conseiller scientifique : **François STORRER**

Secrétariat administratif : **Véronique ADA-FAUCHEUX & Florence LEDOUX**

www.cne2.fr

244 boulevard Saint-Germain • 75007 Paris • Tél. : 01 44 49 80 93 et 01 44 49 80 94

ISSN : 2257-5758