

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°18

Le recyclage complet des combustibles nucléaires,
contribution importante à la souveraineté énergétique

Juin 2024

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° 18

Le recyclage complet des combustibles nucléaires,
contribution importante à la souveraineté énergétique

JUIN 2024

AVANT-PROPOS

EDF s'apprête à prolonger la durée de vie de son parc électronucléaire. La mise en service de nouveaux réacteurs REP nécessite également des investissements massifs pour maintenir ou augmenter la production, ainsi que des sources d'uranium et les moyens de le transformer en combustibles.

Début 2024, la France a confirmé son choix historique du retraitement des combustibles nucléaires en vue du recyclage des matières fissiles valorisables, pour réduire, et supprimer à terme, notre dépendance à l'uranium naturel importé. Autre atout du retraitement, il permet de réduire l'inventaire et la radiotoxicité des déchets à vie longue.

D'ores et déjà, la France dispose de stocks stratégiques de matières radioactives, permettant de surmonter d'éventuelles crises conjoncturelles d'approvisionnement en uranium naturel pendant plusieurs années. Le plutonium issu des combustibles usés est déjà, en partie, recyclé dans le combustible Mox et pourrait l'être davantage à l'avenir, grâce à des réacteurs à neutrons rapides et leur cycle associé.

La Commission nationale d'évaluation des études et recherches sur la gestion des matières et déchets radioactifs (CNE) examine, dans son présent rapport n°18 de juin 2024, les conditions à remplir pour arriver à la fermeture complète du cycle du combustible nucléaire.

La CNE analyse année après année la gestion des déchets radioactifs. Elle doit remettre un avis fin 2025 sur le dossier d'autorisation de création Cigéo, projet de centre de stockage géologique des déchets radioactifs de haute activité issus du retraitement ainsi que de déchets de moyenne activité. Elle présente ici d'ores et déjà deux recommandations relatives à Cigéo.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	3
RESUME - CONCLUSION	7
INTRODUCTION	11
CHAPITRE I : LA RELANCE DU NUCLEAIRE	13
1.1 LA RELANCE DE LA PRODUCTION ELECTRONUCLEAIRE.....	14
1.1.1 <i>Les réacteurs de forte puissance</i>	14
1.1.2 <i>Les petits réacteurs modulaires SMR électrogènes</i>	14
1.1.3 <i>Les petits réacteurs modulaires SMR/AMR pour de nouveaux usages</i>	15
1.2 DES REACTEURS ELECTRONUCLEAIRES DE PUISSANCE POUR LA FERMETURE DU CYCLE	16
1.3 FRANCE 2030.....	16
1.4 LE ROLE DU CEA DANS LA RELANCE DU NUCLEAIRE	18
CHAPITRE II : DE LA BONNE UTILISATION DES MATIERES	21
2.1 L'INDISPENSABLE VALORISATION DES MATIERES RADIOACTIVES.....	21
2.1.1 <i>Les risques pesant sur l'approvisionnement en uranium naturel</i>	21
2.1.2 <i>La nécessaire autonomie pour la conversion et l'enrichissement de l'uranium</i>	22
2.1.3 <i>L'uranium appauvri, ressource nationale garantissant une autonomie de 7 à 8 ans en REP</i> 23	
2.1.4 <i>L'uranium de retraitement, une ressource en passe d'être mieux valorisée</i>	24
2.1.5 <i>La valorisation du plutonium avec le MOX</i>	25
2.2 LE MULTIRECYCLAGE EN REP (MRREP).....	25
2.3 LA TRAJECTOIRE POUR LA FERMETURE COMPLETE DU CYCLE AVEC DES RNR	27
CHAPITRE III : IMPLICATIONS SUR LES USINES DU CYCLE	31
3.1 ETAT DES LIEUX	31
3.2 FUTURES USINES DE FABRICATION DE MOX	32
3.2.1 <i>Combustible envisagé pour le MRREP</i>	32
3.2.2 <i>Usines de fabrication des MOX MR</i>	33
3.3 FUTURES USINES DE RETRAITEMENT.....	33
3.3.1 <i>Les limites du procédé Purex et les performances d'un nouveau procédé</i>	33
3.3.2 <i>Options pour les usines d'après 2040, mise à niveau ou renouvellement</i>	34
3.4 PRISE EN COMPTE DU COMBUSTIBLE RNR DANS LES USINES	35
3.4.1 <i>Fabrication des MOX RNR</i>	35
3.4.2 <i>Retraitement des MOX RNR</i>	35
3.5 IMPACT DES SMR/AMR SUR LES USINES	36
3.6 R&D ET QUALIFICATIONS EN PREPARATION DU MRREP ET DES RNR.....	36
3.7 CONCLUSION	37
CHAPITRE IV : DECHETS HA-MAVL	39
4.1 LA DEMANDE D'AUTORISATION DE CREATION (DAC) DE CIGEO	39
4.1.1 <i>Méthode retenue pour l'analyse du dossier de DAC</i>	39
4.1.2 <i>L'inventaire des déchets appelés à être stockés dans Cigéo</i>	40
4.1.3 <i>Réversibilité</i>	41
4.1.4 <i>La phase industrielle pilote (Phipil)</i>	42
4.2 AVANCEMENT DU PROGRAMME DE R&D SUR LA GESTION DES DECHETS BITUMES	43
4.3 LES RECHERCHES EN COURS.....	44
4.3.1 <i>Amélioration continue des connaissances</i>	44
4.3.2 <i>Conforter des choix technologiques</i>	45
4.3.3 <i>Intégrer des innovations techniques</i>	46
4.3.4 <i>Poursuivre des études prospectives</i>	46

CHAPITRE V : LE STOCKAGE GEOLOGIQUE, SOLUTION INTERNATIONALE DE REFERENCE	49
5.1 INTRODUCTION	49
5.2 LES PAYS OU LE STOCKAGE GEOLOGIQUE EST AUTORISE	49
5.2.1 <i>Finlande</i>	49
5.2.2 <i>Suède</i>	50
5.3 LES PAYS OU LE PROCESSUS DE CHOIX D'UN SITE POUR LE STOCKAGE GEOLOGIQUE EST EN COURS D'INSTRUCTION ..	50
5.3.1 <i>Canada</i>	50
5.3.2 <i>Suisse</i>	51
5.4 LES PAYS OU LE PROCESSUS DE CHOIX DE SITE DOIT ENCORE ETRE DETERMINE.....	52
5.4.1 <i>Belgique</i>	52
5.5 PAYS EN SITUATION D'ATTENTE OU DE BLOCAGE.....	53
5.5.1 <i>Espagne</i>	53
5.5.2 <i>Grande-Bretagne</i>	54
5.5.3 <i>Etats-Unis</i>	54
GLOSSAIRE	57
ANNEXE I : COMPOSITION DE LA COMMISSION NATIONALE D'EVALUATION	63
ANNEXE II : ACTIVITE DE LA COMMISSION	65
ANNEXE III : AUDITIONS REALISEES PAR LA COMMISSION	67
ANNEXE IV : LISTE DES PERSONNES AUDITIONNEES PAR LA COMMISSION.....	69
ANNEXE V : LISTE DES DOCUMENTS TRANSMIS A LA COMMISSION EN 2023-2024	71
ANNEXE VI : LE PLAN FRANCE 2030 – EXAMEN DES PROJETS DE NOUVEAUX REACTEURS PAR LA COMMISSION.....	73
ANNEXE VII : LES PLANS DE VALORISATION DES MATIERES.....	81
ANNEXE VIII : RAPPEL SUR LE CYCLE DE L'URANIUM DANS LA PRODUCTION ELECTRONUCLEAIRE	85
ANNEXE IX : LES COMBUSTIBLES ENVISAGES POUR LE MRREP	89
ANNEXE X : ESSAIS ANNEAUX UGE ET INERIS.....	93

RESUME - CONCLUSION

Les pouvoirs publics ont décidé une relance de l'utilisation de l'énergie nucléaire en France, incluant la construction de nouveaux réacteurs de puissance et le soutien à des projets de petits réacteurs modulaires. Le Conseil de politique nucléaire (CPN) de février 2024 a également confirmé la politique de retraitement des combustibles usés avec l'objectif de parvenir à terme à la fermeture complète du cycle. La Commission souligne que les réacteurs à neutrons rapides (RNR) de puissance élevée sont la seule filière permettant la fermeture complète du cycle.

La Commission recommande à nouveau que l'objectif de puissance installée du parc électronucléaire soit fixé dès que possible et que les simulations d'évolution du parc pour l'atteindre soient mises à jour : type et nombre de réacteurs, calendrier de construction, durée de fonctionnement, usines du cycle du combustible, quantité et nature des déchets produits. À ce titre, une attention particulière doit être portée aux phases de transition entre les types de réacteurs.

S'agissant des projets de petits réacteurs modulaires soutenus par l'État, la Commission recommande que la suite du programme France 2030 concentre son soutien sur un nombre très restreint de projets pour qu'il soit efficace. Ces projets devraient être sélectionnés en prenant en compte l'intérêt des technologies développées pour la stratégie énergétique nationale et un niveau de maturité réaliste attesté par une évaluation indépendante. Par ailleurs, la Commission recommande que le cadre d'intégration de ces concepts dans des environnements industriels et urbains soit établi au plus tôt et prévoie la concertation avec les parties prenantes.

La prospective stratégique et technologique à long terme en matière d'énergie nucléaire du futur est une des missions du CEA. Concernant les réacteurs du futur et le cycle associé, la Commission déplore que le CEA ne présente pas de stratégie de recherche ni de programme de R&D propre plus ambitieux que le simple soutien aux initiatives des start-up. La Commission observe que le CEA dispose de personnels de haute qualité scientifique et technique à même de mener à bien des recherches ambitieuses. L'absence de programme innovant fait peser un risque de démotivation et de perte de compétences dommageables à la relance du nucléaire.

7

DE LA BONNE UTILISATION DES MATIERES

Des plans de valorisation des matières nucléaires ont été produits par leurs détenteurs en 2023. Ils montrent que la plupart ont des perspectives de valorisation crédibles. De façon générale, la Commission recommande de ne pas envisager le déclassement des matières radioactives en déchets sauf si l'absence d'intérêt de ces matières devenait avérée.

Les risques conjoncturels sur l'approvisionnement en uranium naturel à court et moyen terme sont limités. En revanche, des risques structurels sont élevés dans le temps long. D'abord, la montée en puissance annoncée du parc nucléaire mondial accélère la consommation des ressources. Ensuite, des tensions géopolitiques peuvent entraîner la perte d'accès à certaines ressources. La Commission considère que la décision de report à la fin du siècle des RNR est insuffisamment fondée, car elle ne s'appuie que sur des considérations liées au prix de l'uranium en négligeant les risques sur sa disponibilité.

La Commission observe que la France dispose, au travers de ses industriels, des moyens nécessaires à la conversion et à l'enrichissement de l'uranium naturel dont elle a besoin. La Commission recommande de mener à bien les actions permettant d'accéder au niveau européen à la souveraineté de la filière d'utilisation de l'uranium de retraitement.

La Commission note que les travaux récents de la filière nucléaire sur le MRREP, avec la proposition du combustible MOX MR, conduisent à des simplifications significatives de gestion, ce qui répond en partie aux critiques qu'elle a émises sur les premières orientations du projet. Ces travaux représentent une amélioration sensible de la crédibilité technique du projet. En revanche,

les simulations de déploiement présentées à la Commission montrent que la mise en œuvre du MRREP avec un combustible MOX MR est intrinsèquement limitée dans la durée, car on ne disposera plus à terme de suffisamment de plutonium issu du retraitement d'UOX pour le fabriquer.

Si la mise en œuvre du MRREP était décidée, et compte tenu de la limitation en durée intrinsèque du concept de MOX MR, la Commission recommande de conduire les travaux de R&D permettant de s'assurer que le multirecyclage en RNR sera disponible au plus tard au moment où la fabrication du MOX MR ne sera plus possible, et de piloter la gestion du parc pour garantir qu'un stock suffisant de plutonium de qualité fissile appropriée soit disponible à cette date.

L'objectif de fermeture complète du cycle n'est accessible que par le déploiement d'un parc de RNR de puissance élevée, qui par ailleurs offre des garanties contre les risques de crise structurelle d'approvisionnement en uranium. La Commission est convaincue que cet objectif ne pourra être atteint que par la création d'un nouveau programme d'ensemble, à visée industrielle, échancé et financé, allant jusqu'au déploiement d'un parc de RNR de puissance et des usines du cycle associées. Ce programme devra inclure toutes les installations indispensables à sa réalisation, dont un outil d'irradiation pour qualifier en spectre rapide les combustibles et les matériaux. Le programme devra conduire à la fermeture complète du cycle en temps opportun et dans des conditions économiques acceptables.

IMPLICATIONS SUR LES USINES DU CYCLE

L'essentiel des travaux présentés étudie les conséquences du MRREP sur les usines du cycle.

En ce qui concerne la fabrication des combustibles, une nouvelle usine devra être impérativement construite pour prendre la suite de Melox dans les années 2040. Les cadences nécessaires sont très significativement supérieures à celles atteintes jusqu'ici pour le monorecyclage, avec une forte dépendance à la puissance installée, dont l'estimation doit être mise à jour dans les scénarios de renouvellement du parc.

8

Pour ce qui concerne le retraitement, deux options sont envisagées pour traiter les combustibles MOX MR : soit l'adaptation des usines actuelles (consistant à dupliquer un certain nombre d'équipements pour atteindre la cadence nécessaire), soit le changement des procédés (utilisant la voloxydation du combustible après cisailage et un monoamide pour séparer uranium et plutonium). Ces procédés ont été testés en laboratoire, mais des travaux importants sont encore nécessaires pour les qualifier à l'échelle industrielle.

La Commission observe que seule la seconde option permet aussi d'envisager le retraitement de MOX RNR, très riches en plutonium, dans les nouvelles usines. La Commission recommande d'intensifier et de concrétiser la R&D pour porter les nouveaux procédés jusqu'à l'industrialisation, en veillant à concentrer les efforts en priorité sur les briques utiles aux RNR. Pour les usines de fabrication de combustible comme pour le retraitement, la Commission recommande que les études soient complétées pour prendre en compte les besoins d'un parc de RNR de puissance.

DECHETS HA-MAVL

La Commission poursuit son analyse du dossier d'autorisation de création de Cigéo en vue de produire son rapport à la fin de l'année 2025. D'ores et déjà, la Commission recommande que le décret d'autorisation de création fixe l'inventaire des déchets à stocker dans Cigéo à celui défini dans l'inventaire de référence.

La Commission recommande par ailleurs que les critères de réussite de la Phipil soient fixés en amont du décret d'autorisation de création, la priorité étant donnée à la validation des processus industriels. La pleine responsabilité de sa mise en œuvre revient à l'exploitant. La Commission recommande qu'il n'y ait pas d'interruption des opérations de mise en stockage pendant la phase d'instruction de la Phipil.

La Commission soutient les actions de recherche conduites en parallèle du projet Cigéo. Elle considère indispensable qu'une activité de R&D significative soit conduite afin d'identifier et d'accompagner des innovations tout au long de cette période, et de maintenir une compétence scientifique et technique sur le long terme dans tous les domaines d'intérêt pour Cigéo. Elle souligne qu'une réelle capacité de R&D dans la durée, avec les outils associés, contribue à la crédibilité de l'exploitant.

Pour ce qui concerne la gestion des déchets bitumés, la Commission recommande aux acteurs du programme Babylone de lui consacrer des moyens suffisants pour le mener à bien sans délai, même si le stockage des déchets bitumés n'est pas envisagé dans la première tranche de Cigéo. Elle demande par ailleurs que la situation des travaux sur la destruction des fûts d'enrobés bitumés lui soit systématiquement présentée lors des auditions consacrées à la gestion des déchets bitumés.

LE STOCKAGE GEOLOGIQUE, SOLUTION INTERNATIONALE DE REFERENCE

La Commission a réalisé une revue des stratégies de gestion des déchets de haute et moyenne activité, dont notamment les combustibles usés, dans le monde. Il en ressort que le stockage géologique est la solution de référence retenue dans tous les pays pour lesquels l'information est accessible, même si l'avancement de la mise en œuvre de cette stratégie est très différent d'un pays à l'autre.

La Finlande et la Suède sont les seuls pays ayant à ce jour autorisé la création d'une installation de stockage géologique ; la construction de l'installation finlandaise est très avancée. Le Canada et la Suisse ont tous deux une procédure en cours pour le choix du site d'implantation du stockage, tandis que la Belgique est en cours d'élaboration de son processus de sélection. Tous les autres pays sont moins avancés dans la démarche, soit par choix délibéré d'attendre, soit en raison de divers blocages de nature politique, institutionnelle ou juridique.

INTRODUCTION

Les décisions indispensables en matière d'énergie doivent, compte tenu de leur impact économique et environnemental, reposer sur le socle des connaissances scientifiques les plus abouties. La mission de la Commission nationale d'évaluation des études et des recherches relatives à la gestion des matières et déchets radioactifs (CNE) est d'évaluer les travaux scientifiques et technologiques concernant le traitement, l'utilisation, l'entreposage ou le stockage des matières et déchets radioactifs. Elle remet ses recommandations au Parlement pour éclairer ses décisions.

Instituée par la loi en 1991, confirmée et élargie dans ses missions par la loi en 2006, cette Commission comprend douze membres (*cf.* annexe 1), nommés par le Gouvernement sur proposition de l'Assemblée nationale, du Sénat, de l'Académie des sciences et de l'Académie des sciences morales et politiques. Scientifiques et ingénieurs français ou étrangers, professeurs des universités, directeurs de recherche, les membres de la CNE exercent leurs fonctions bénévolement et sont indépendants de la filière nucléaire française.

La CNE est une commission indépendante. Son rapport annuel est transmis au Parlement puis rendu public. Tous les documents publiés par la CNE sont accessibles sur son site internet.

Les lois de 1991 et de 2006 relatives à la gestion des matières et déchets radioactifs disposent que des recherches seront conduites sur la séparation des matières recyclables des combustibles usés et la transmutation des éléments radioactifs à vie longue, l'entreposage et le stockage géologique réversible des déchets.

La Commission évalue ces recherches et formule des recommandations. Pour cela, elle auditionne régulièrement les acteurs de la recherche, organise des visites techniques (*cf.* annexes 2, 3, et 4) et analyse les documents portés à sa connaissance (*cf.* annexe 5).

11

Depuis le discours du Président de la République à Belfort du 10 février 2022, les nouvelles orientations stratégiques se dessinent peu à peu au travers des impulsions données par la puissance publique (plan France relance, programme France 2030, soutien au projet NUWARD, décision d'achever le réacteur RJH, annonce concernant de nouvelles tranches EPR, adoption en avril 2024 du projet de loi concernant la sûreté nucléaire et la radioprotection, ...), accompagnées par un renforcement de la gouvernance de la filière nucléaire (nomination d'un délégué interministériel au nouveau nucléaire en novembre 2022, rattachement du Haut-Commissaire à l'énergie atomique au Premier ministre via le SGDSN en septembre 2023 et extension de ses missions, tenue de deux conseils de politique nucléaire en juillet 2023 et février 2024). Ces choix, s'ils sont confirmés, engageront les acteurs industriels et la R&D pour plusieurs dizaines d'années et tous les sujets relatifs au cycle des matières et des déchets radioactifs seront impactés.

Le premier chapitre de ce rapport se propose de préciser les contours de la relance du nucléaire.

Le deuxième chapitre vise à présenter les enjeux liés à la bonne utilisation des matières valorisables alors que le choix de la fermeture du cycle du combustible électronucléaire vient d'être réaffirmé.

Dans le troisième chapitre, la Commission s'attache à préciser davantage la place des usines du cycle du combustible dans le déploiement du nouveau nucléaire, à analyser la mise en œuvre éventuelle du multi-recyclage du plutonium en REP (MRREP) et de la préparation de la fermeture du cycle grâce à des réacteurs à neutrons rapides (RNR) de quatrième génération.

Le quatrième chapitre traite des questions liées à la gestion des déchets de haute et moyenne activité à vie longue (HA-MAVL) avec un point particulier concernant l'analyse par la Commission du dossier de demande d'autorisation de création (DAC) du projet Cigéo déposé par l'Andra en janvier 2023.

Enfin, le cinquième chapitre dresse un panorama international des projets de stockage géologique, mode de gestion des déchets de haute activité qui est la référence à l'international.

Pour ce 18^{ème} rapport, la Commission a tenu compte des documents qui lui ont été transmis jusqu'à la date du 30 mars 2024.

CHAPITRE I : LA RELANCE DU NUCLEAIRE

Annoncée dans ses grandes lignes par le Président de la République dans son discours de Belfort le 10 février 2022, la relance de la filière nucléaire française doit en principe être concrétisée dans la prochaine version de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) qui, selon le gouvernement, devrait être promulguée par décret avant la fin de l'année 2024. Alors que le dossier de l'énergie a été confié au ministère de l'économie et des finances à l'occasion du dernier remaniement gouvernemental, l'heure semble être à la rupture avec la PPE de 2019 (toujours formellement en vigueur), qui prévoit une diminution de la puissance électronucléaire installée. Dans les conditions actuelles, et en intégrant l'EPR de Flamanville lorsqu'il sera connecté au réseau, la puissance du parc en France atteindra 62 GWe. L'électrification jouera un rôle clé pour assurer la transition énergétique dans de bonnes conditions. Selon les acteurs de la filière entendus par la Commission, la puissance électronucléaire affichée pour le moyen terme devrait au moins être maintenue au niveau actuel, sinon augmentée.

À la fin de l'année 2022, une enquête menée par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) auprès des Français a révélé une évolution en faveur du développement de l'énergie nucléaire. Cette tendance reflète une évolution plus large vers l'acceptation d'un « mix énergétique » intégrant à la fois les énergies renouvelables et le nucléaire.

Dans le contexte d'une stratégie nationale qui vise la neutralité carbone dès 2050, la Commission considère qu'il est très souhaitable que l'objectif de puissance électronucléaire installée soit officialisé. Cet objectif est en effet structurant non seulement pour la construction des prochains réacteurs de type EPR2, mais aussi pour le calendrier de transition vers les réacteurs de génération quatre, et plus encore pour la définition des usines appelées à succéder aux installations actuelles du cycle du combustible (*cf. chapitres 2 et 3*). Le seul maintien de la puissance actuelle rend nécessaire de prendre des mesures ambitieuses pour remplacer, entretenir et développer le parc nucléaire existant.

13

En cohérence avec cette nouvelle stratégie, au moins trois grands défis industriels sont identifiés. Tout d'abord, il est prévu de poursuivre les travaux nécessaires pour prolonger l'utilisation des réacteurs nucléaires actuels tant que leur niveau de sûreté sera jugé satisfaisant par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN). Ensuite, il est prévu de construire de nouveaux réacteurs de type EPR2. Enfin, à l'occasion du Conseil de politique nucléaire (CPN) de février 2024, le Président de la République a confirmé la poursuite du retraitement et de la valorisation des combustibles à moyen et long terme dans la perspective de la fermeture du cycle, ce qui implique des investissements importants pour prolonger puis renouveler les usines du cycle.

En marge du nucléaire de puissance, il est envisagé de développer des petits réacteurs (SMR ou AMR) afin de contribuer soit à la production d'électricité soit à la décarbonation de l'industrie.

Le présent chapitre est organisé en cinq sections assorties de recommandations : la section 1.1 détaille les actions lancées concernant les réacteurs de puissance et les petits réacteurs modulaires de type SMR-AMR ; la section 1.2 est consacrée à l'objectif de fermeture du cycle à l'aide de réacteurs de puissance ; la section 1.3 revient sur les nouveaux usages et les nouveaux acteurs de la filière nucléaire ; la section 1.4 rappelle le contenu du plan France 2030 ; enfin la section 1.5 donne l'appréciation de la Commission concernant le rôle qui devrait être dévolu au CEA dans le projet global de relance du secteur nucléaire en France. Les aspects liés au cycle du combustible sont abordés dans les chapitres 2 et 3 du présent rapport.

1.1 LA RELANCE DE LA PRODUCTION ELECTRONUCLEAIRE

1.1.1 Les réacteurs de forte puissance

Le parc électronucléaire actuel est constitué exclusivement de réacteurs de puissance, bien adaptés à l'infrastructure de réseau électrique robuste dont la France dispose. Ces réacteurs fournissent environ 70 % de la production électrique nationale à un coût compétitif, et rendent la France exportatrice. Ils offrent par ailleurs la possibilité de contribuer au suivi de charge, ce qui permet de compenser l'intermittence des renouvelables et la fluctuation de la demande.

La prolongation de l'exploitation des réacteurs actuels est la priorité affichée par EDF qui conduit depuis 2014 son « grand carénage », programme industriel de rénovation et de modernisation des centrales nucléaires. Il concerne les réacteurs de 900 MWe après la quatrième visite décennale, pour un coût global de près de 50 Md€. Cette opération, qui doit s'étaler jusqu'en 2030 au plus tard, vise à valider la prolongation de tous ces réacteurs jusqu'à 50 ans. L'objectif d'EDF est ensuite d'aller au-delà et d'atteindre au moins 60 ans d'exploitation pour le plus grand nombre possible d'entre eux. En parallèle, le programme AP1300 vise à augmenter la puissance des réacteurs de 1300 MWe, ce qui fournirait une puissance additionnelle équivalente à celle d'un EPR2 (soit 1,6 GWe).

Le programme de construction de réacteurs de type EPR2 est la seconde priorité d'EDF. La première série de six réacteurs est sur le point d'être lancée et les lieux de leur implantation ont déjà été retenus et annoncés par le gouvernement : Penly, Gravelines et Bugey. Le coût prévisionnel pour la construction de ces six premiers EPR2 dépasse 50 Md€. Une deuxième série de huit réacteurs est envisagée. La standardisation et la construction en série de réacteurs est considérée, à juste titre selon la Commission, comme une condition nécessaire pour restaurer les performances de la filière nucléaire en matière de respect de la qualité de construction, des coûts et des délais.

Pour le long terme, EDF affiche toujours l'objectif de fermeture du cycle du combustible à l'aide d'un parc de réacteurs à neutrons rapides (RNR). Pour autant, EDF n'envisage pas le déploiement d'un tel parc avant d'avoir dépassé le pic financier de ses autres investissements prioritaires. Par ailleurs, le coût unitaire des RNR estimé par le CEA (sur la base d'anciens projets) serait au moins 50 % plus élevé que celui d'un réacteur à eau pressurisée de puissance comparable : EDF considère que ce surcoût d'investissement ne se justifie pas dans les conditions actuelles.

La Commission recommande à nouveau que l'objectif de puissance installée du parc électronucléaire soit fixé dès que possible et que les simulations des scénarios de parcs pour l'atteindre (calendrier de construction des réacteurs, durée de fonctionnement des réacteurs, usines du cycle du combustible, quantité et nature des déchets produits) soient mises à jour, avec une attention particulière sur les phases de transition, dont celle vers les réacteurs à neutrons rapides.

1.1.2 Les petits réacteurs modulaires SMR électrogènes

Les réacteurs modulaires de petite taille (*small modular reactor*, SMR) électrogènes ne présentent pas nécessairement d'intérêt significatif pour la production d'électricité en France métropolitaine. Leur intérêt se situe davantage dans des contextes spécifiques tels que les territoires à faibles besoins de puissance, en raison de leur isolement ou du dimensionnement de leur infrastructure de réseau électrique. Ils peuvent également constituer une solution intéressante pour remplacer des centrales thermiques existantes sans devoir modifier le réseau électrique. Des défis restent à relever par les promoteurs de ce type de projets, notamment en termes de maturité industrielle à court terme et de démonstration de la validité de leur modèle économique.

Le projet Nuward (en principe destiné à l'export) fait l'objet d'un suivi régulier de la part de la Commission. La société Nuward est à présent en place et il est prévu d'achever la conception en 2024 après l'arbitrage des derniers choix technologiques. La pose de la première pierre est toujours prévue en 2028. Le projet nécessite la qualification de trois innovations : utilisation d'échangeur à plaques, de barres de commande immergées, d'un cœur sans bore.

Les spécificités en matière de cycle sont limitées car le combustible sera proche de celui des réacteurs en service. Pour autant, une étude détaillée des besoins du réacteur en matières et en combustibles, ainsi que des déchets de toutes natures qu'il produira lors de son fonctionnement comme de son démantèlement est indispensable. À la connaissance de la Commission, elle n'a pas été entreprise à ce jour.

1.1.3 Les petits réacteurs modulaires SMR/AMR pour de nouveaux usages

À côté des acteurs traditionnels du nucléaire, la relance de la filière se manifeste à travers l'émergence de nouveaux acteurs, dont le point commun est la recherche de la décarbonation de l'électricité ou de l'industrie. Parmi ces acteurs, on retrouve plusieurs entreprises privées de type start-up explorant, en fonction des opportunités du marché, différentes technologies pour atteindre cet objectif de décarbonation.

Les projets de ces nouveaux acteurs visent le marché de l'électricité, mais aussi celui de la chaleur industrielle ou urbaine et de la production d'hydrogène. Ils reposent sur un large spectre de technologies et sont à des stades d'avancement très différents. Les projets fondés sur les technologies autres qu'à eau pressurisée ou eau bouillante, entrent dans la famille des réacteurs modulaires avancés (AMR, *Advanced Modular Reactors*). Certains de ces concepts sont des petits réacteurs à neutrons rapides.

Indépendamment de leurs ambitions économiques, l'évaluation de leur intérêt pour la nation (qui devra guider le choix d'apporter un soutien public à leur développement) doit intégrer une combinaison de facteurs (cf. Rapport 17) : dispersion d'unités dans le monde (risque de prolifération et problématique de sécurité nucléaire), niveau de maturité technologique (TRL), disponibilité à court ou à long terme, capacité d'intégration dans le paysage énergétique et industriel, capacité à contribuer à la décarbonation.

Quelle que soit la technologie retenue, certains points nécessitent une attention particulière. L'approvisionnement en matière, la fabrication du combustible et la gestion des déchets générés (particulièrement dans une vision globale du cycle) sont d'une manière générale très incomplètement abordés. De plus, les usages visés par certains de ces projets impliquent que les réacteurs soient implantés à proximité de zones urbaines ou d'installations industrielles. Dans le cas particulier de la proximité d'installations industrielles, il est nécessaire de démontrer la sûreté en tenant compte de la combinaison des risques nucléaire et industriel. Dans tous les cas, il convient de ne pas sous-estimer la difficulté à obtenir l'adhésion des parties prenantes.

L'État ayant engagé un soutien technique et financier pour que le secteur privé fasse émerger différents concepts nucléaires visant à décarboner certains secteurs de l'industrie, la Commission recommande que le cadre d'intégration de ces concepts dans des environnements industriels et urbains soit établi au plus tôt. La réalisation de projets concrets sur des sites identifiés devrait se faire sur la base de ce cadre et en concertation avec les parties prenantes.

1.2 DES REACTEURS ELECTRONUCLEAIRES DE PUISSANCE POUR LA FERMETURE DU CYCLE

Le CPN a confirmé les grandes orientations de la politique française sur l'aval du cycle du combustible nucléaire combinant le retraitement des combustibles usés, le recyclage des matières et à terme la fermeture complète du cycle.

La Commission souligne que les réacteurs à neutrons rapides (RNR) de puissance élevée sont la seule filière permettant la fermeture complète du cycle.

Parmi les diverses technologies de RNR existantes, les RNR refroidis au sodium (RNR-Na) apparaissent comme la technologie la plus mature, bénéficiant d'un retour d'expérience significatif en particulier en France. Cependant, l'absence de projet concret actuel nécessite une grande vigilance quant à la perte éventuelle de compétences dans ce domaine. Ce point est commenté en détail en partie 2.3.

1.3 FRANCE 2030

Le plan « France 2030 », doté de 54 Md€ destinés aux actions de décarbonation et au soutien d'acteurs émergents, vise à développer la compétitivité industrielle et les technologies d'avenir. France 2030 comprend un volet nucléaire avec deux actions consacrées aux nouveaux réacteurs, dotées chacune de 500 M€ : d'une part le soutien au projet Nuward, d'autre part le financement d'autres projets de petits réacteurs plus innovants sur la base d'appels à projet dont le premier est à présent clos. Quinze dossiers ont été présentés dont onze ont reçu un financement public. Les sociétés lauréates sont : Blue Capsule, Calogena, GenF, Hexana, Jimmy, Newcléo, Naaréa, Otrera, Renaissance Fusion, Stellaria et Thorizon.

L'OPECST a mandaté la Commission pour examiner les projets de nouveaux réacteurs du point de vue de leur impact sur les matières et les déchets nucléaires. Une série d'auditions a été organisée en 2023, dont la Commission a rendu compte dans son rapport n°17. Ce travail a été poursuivi cette année ; l'annexe 6 décrit les projets examinés en janvier 2024. Au total, la Commission a examiné à ce jour 17 projets, dont 9 parmi les onze projets lauréats de France 2030 :

- le projet de réacteur calogène basse température et neutrons thermiques proposé par Calogéna ;
- le projet de réacteur calogène à gaz haute température et neutrons thermiques proposé par Jimmy Energy ;
- le projet de réacteur à neutrons thermiques à haute température refroidi au sodium liquide proposé par Blue Capsule ;
- le projet de réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium proposé par Hexana ;
- le projet de réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium proposé par Otrera ;
- le projet de réacteur à neutrons rapides refroidi au plomb proposé par Newcleo ;
- le projet de réacteurs à sels fondus et neutrons rapides proposé par Naarea ;
- le projet de réacteur à sels fondus et neutrons rapides proposé par Stellaria ;
- le projet de réacteur utilisant la fusion nucléaire proposé par Renaissance Fusion.

Les auditions de 2024 confirment la pertinence des observations déjà formulées par la Commission et des recommandations qu'elle avait émises. En particulier, la plupart des projets n'ont jusqu'ici abordé que partiellement la question des besoins en combustibles des réacteurs étudiés et très peu celle des déchets produits. La possibilité de retraiter le combustible usé, souvent mise en avant, l'est en général sur la base d'une estimation superficielle.

Les auditions montrent que les différents projets examinés en 2024 mobilisent à ce stade de lancement des moyens financiers limités, dont une part notable est apportée par des fonds publics pour les projets lauréats de France 2030. Les phases ultérieures nécessiteront des financements beaucoup plus conséquents (en centaines de M€). Les plans de financement communiqués à la Commission tablent sur des levées de fonds privés complétées pour une part significative par des fonds publics. L'enveloppe prévue dans le programme France 2030 pour les réacteurs innovants, d'un montant total de 500 M€, ne permettra de soutenir à ce niveau qu'un ou deux projets.

Les projets de réacteurs innovants font l'objet d'une attention certaine de la part des principaux acteurs de la filière nucléaire française.

EDF déclare suivre attentivement les projets de petits réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium, qui peuvent contribuer à entretenir la compétence française sur le sujet dans la perspective d'un développement futur de RNR Na de puissance. Elle exerce par ailleurs une veille sur les autres projets pour éviter de découvrir tardivement des évolutions technologiques majeures susceptibles de bouleverser le secteur.

Orano déclare soutenir tous les projets de nouveaux réacteurs, avec une préférence pour les projets de réacteurs à neutrons rapides, soit à combustible solide (refroidissement par sodium ou plomb) soit à sels fondus (chlorures). Cette dernière technologie intéresse particulièrement Orano malgré sa maturité très inférieure à celle des RNR à combustible solide et fait l'objet de travaux internes. Cet intérêt découle d'une logique industrielle centrée sur le cycle (fabrication et régénération des sels).

Le CEA soutient les start-up à travers l'agence de programme nucléaire innovant (APNI), créée en février 2023 au sein du CEA, qui apporte une assistance dans la constitution des dossiers de subventions et centralise les demandes de prestations scientifiques. Le CEA apporte un soutien technique principalement avec la mise à disposition d'outils de calculs et d'infrastructures expérimentales. Le CEA n'intervient pas dans la conception des réacteurs, mais peut mettre à disposition des start-up certains de ses brevets.

La Commission recommande que le CEA clarifie sa politique de gestion de sa propriété intellectuelle vis-à-vis des porteurs de nouveaux projets, car celle-là ne semble pas comprise de la même manière par tous les acteurs.

Tous les acteurs historiques de la filière nucléaire considèrent que les délais annoncés par les nouveaux entrants pour le développement et la mise en service de leurs réacteurs sont trop optimistes, même en comptant sur l'agilité de fonctionnement des start-up, qui permettrait d'accélérer les temps de développements. Les mêmes acteurs présentent pourtant leurs actions en soutien à ces développements en se basant sur ces calendriers très ambitieux.

La Commission estime qu'une mise à jour plus réaliste des calendriers sera indispensable au moment d'engager des actions concrètes et des dépenses significatives notamment dans des infrastructures de recherche.

Par ailleurs, le modèle économique des projets de petits réacteurs modulaires, qui repose sur la standardisation des composants et la vente d'un nombre important de réacteurs, reste à valider. Enfin, dans la mesure où la plupart des start-up n'envisagent pas d'assumer elles-mêmes le rôle d'exploitant nucléaire, il faudra identifier des acteurs, existants ou nouveaux, pour le faire. Ces points ont été examinés en détail dans le rapport 17 de la Commission.

Même si les différents projets peuvent peut-être rencontrer un marché, en particulier, dans les nouveaux usages de l'énergie nucléaire (chaleur industrielle par exemple), toutes les technologies envisagées ne présentent pas le même intérêt stratégique pour la filière nationale.

La Commission recommande que la stratégie de conduite de la suite du programme France 2030, qui va devoir être fixée, concentre son soutien sur un nombre très restreint de projets pour qu'il soit efficace. Ces projets devraient être sélectionnés en prenant en compte l'intérêt des technologies développées pour la stratégie énergétique nationale et un niveau de maturité réaliste attesté par une évaluation indépendante.

1.4 LE ROLE DU CEA DANS LA RELANCE DU NUCLEAIRE

Le CEA, organisme de recherche initialement dédié aux questions nucléaires, développe aujourd'hui ses activités dans quatre domaines principaux : les énergies bas carbone, la médecine du futur, le numérique, la défense et sécurité. Avec la relance du nucléaire, il se positionne comme un soutien aux pouvoirs publics dans la réflexion stratégique et scientifique. Il contribue à ce titre aux travaux du CPN qui a réaffirmé le rôle central du CEA pour l'animation et le pilotage de la recherche sur le développement du nucléaire.

Les priorités affichées par le CEA pour sa R&D dans le domaine nucléaire sont d'abord la prolongation de l'exploitation des centrales actuelles et l'achèvement du réacteur Jules Horowitz (RJH), puis les combustibles résistant aux accidents (*Accident Tolerant Fuel*, ATF), ensuite les SMR de technologie existante et les nouveaux usages du nucléaire, et enfin seulement les réacteurs les plus innovants à spectre rapide, les RNR de puissance et le « cycle avancé ».

La Commission a pu constater la reprise en main du chantier du réacteur Jules Horowitz, avec l'ambition de consolider le calendrier et les relations avec le tissu industriel.

18

La Commission demande que lui soient présentés les aspects cycle liés au projet RJH: fabrication du combustible et des cibles pour la production de radioisotopes à usage médical, disponibilité des matières, gestion des déchets.

S'agissant des actions de recherche sur la prolongation de la durée de vie des centrales, les ATF et les SMR, la Commission observe que le CEA répond simplement à des besoins exprimés par les industriels sans jouer de rôle d'impulsion et de pilotage stratégique de programmes d'innovation scientifique.

Par exemple, l'assistance apportée par le CEA aux start-up se limite à répondre aux demandes de prestations d'essais ou de calculs. Pour la réalisation de ces essais, un schéma des besoins d'infrastructures est proposé par le CEA qui inclut la continuité des laboratoires chauds (pour les besoins de l'aval du cycle et l'analyse des combustibles irradiés), la réalisation d'une maquette critique avant 2040 et de différentes boucles expérimentales.

Pour ce qui concerne les RNR de puissance et le cycle avancé, la Commission constate que le CEA se limite depuis l'abandon d'Astrid à l'achèvement de quelques travaux techniques relevant de la dernière phase d'Astrid et à des études d'esquisse. Le CEA considère qu'un RNR restera structurellement plus cher à construire (de l'ordre de 50 %) qu'un réacteur à eau pressurisée. Il estime de plus que le besoin de tels réacteurs, qui ne se justifierait que par la raréfaction ou une augmentation considérable du prix de l'uranium naturel, n'apparaîtra pas avant la fin du siècle. Dans ce contexte, le CEA envisage une démarche qualifiée de « prudente » : d'abord un démonstrateur, puis une tête de série et enfin la série proprement dite. Il estime à 45 ans la durée du processus entre la décision de démarrage et la mise en service du premier réacteur de série.

La prospective stratégique et technologique à long terme en matière d'énergie nucléaire du futur est une des missions du CEA. La Commission regrette que le CEA ne présente pas de stratégie de recherche ni de programme de R&D propre plus ambitieux que le simple soutien aux initiatives des start-up, concernant les réacteurs du futur et le cycle associé.

La Commission observe que le CEA dispose de personnels de haute qualité scientifique et technique à même de mener à bien des recherches ambitieuses. L'absence de programme innovant fait peser un risque de démotivation et de perte de compétences dommageables à la relance du nucléaire.

Les recommandations de la Commission concernant les travaux de préparation de la fermeture du cycle sont détaillées au chapitre 2.

CHAPITRE II : DE LA BONNE UTILISATION DES MATIERES

2.1 L'INDISPENSABLE VALORISATION DES MATIERES RADIOACTIVES

Dans son rapport n°17 de juin 2023, la Commission a fortement recommandé l'étude des possibilités de valorisation des matières radioactives. Le retraitement des combustibles usés est un choix politique inscrit dans la loi du 28 juin 2006 en tant que moyen de réduire la quantité et la nocivité des déchets radioactifs. Il a aussi une grande valeur ajoutée. En effet le retraitement offre la possibilité de récupérer des matières réutilisables, uranium et plutonium, qui présentent le plus grand potentiel énergétique parmi toutes les matières. Cette valorisation accrue de la ressource est favorable à la souveraineté énergétique.

Depuis 2023, les réflexions des pouvoirs publics intègrent opportunément un volet relatif à la valorisation des matières radioactives. Le 5^{ème} PNGMDR (2022-2026), publié en décembre 2022, prescrit la réalisation d'études sur la valorisation des matières fissiles, fertiles ou sources de radioéléments, même si les réflexions sur le stockage de certaines matières doivent être poursuivies. À cet égard, les propriétaires de matières radioactives ont reçu commande par l'ASN de plans de valorisation pour chaque type de matière. Ces plans ont été remis en fin d'année 2023.

Ce chapitre aborde les questions relatives à l'uranium (naturel, appauvri, de retraitement) et au plutonium. Une synthèse des informations communiquées à la Commission sur les autres plans de valorisation est présentée dans l'annexe 7 du présent rapport. Afin d'éclairer les paragraphes qui suivent, l'annexe 8 présente quelques rappels sur le cycle de l'uranium dans l'industrie électronucléaire.

De façon générale, la Commission recommande de ne pas envisager le déclassé des matières radioactives en déchets sauf si l'absence d'intérêt de ces matières devenait avérée.

21

2.1.1 Les risques pesant sur l'approvisionnement en uranium naturel

Les risques sur l'approvisionnement en uranium naturel (Unat) sont, à court et moyen terme, limités à la nécessité de réorganiser, le cas échéant, sa provenance géographique ou de faire face à des hausses de prix. Dans le temps long, l'épuisement des réserves est en revanche certain, en raison de la montée en puissance annoncée du parc mondial de réacteurs nucléaires.

La production mondiale est estimée à 60 000 tonnes en 2022. Celle-ci est répartie sur l'ensemble des continents, Amérique latine mise à part. Les pays de l'OCDE participent à cette production : en 2022 près de 12 000 tonnes ont été produites dans trois de ses pays membres, Canada (7 350 tonnes), États-Unis (75 tonnes) et Australie (4 550 tonnes). Une part significative – 27 000 tonnes – provenait en 2022 de la Russie (2 500 tonnes) et des anciennes républiques satellites de l'URSS, Kazakhstan (21 200 tonnes) et Ouzbékistan (3 300 tonnes). La Chine a pour sa part produit 1 700 tonnes. L'Afrique a assuré une production de 7 600 tonnes, avec la Namibie (5 600 tonnes) et le Niger (2 000 tonnes).

Orano a produit 7 100 tonnes en 2023, 55 % provenant du Canada, 29 % du Kazakhstan et le complément du Niger. Orano a par ailleurs des projets en Mongolie, en Ouzbékistan et au Niger.

EDF consomme l'équivalent de 7 000 tonnes d'uranium naturel par an, ce qui représente 12 % de la production mondiale. Selon Orano et EDF, l'approvisionnement en uranium ne pose pas de problème aujourd'hui pour la filière nucléaire française. Les opérateurs français s'attachent à consolider leurs liens avec leurs fournisseurs et à les diversifier géographiquement. Par ailleurs, EDF se garantit par des contrats d'achat à long terme.

Si les tensions géopolitiques perduraient, les fournitures provenant des pays d'Eurasie et d'Afrique pourraient s'avérer plus difficiles à obtenir, voire se tarir. En tout état de cause, des crises remettant en cause des liens commerciaux établis pourraient entraîner des hausses de prix pendant le temps nécessaire pour les surmonter. Des tensions sur les prix pourraient également résulter de l'accaparement de la ressource par des pays développant intensément leur parc nucléaire comme la Chine. Même si les contrats à long terme sont l'objectif de la majorité des acquéreurs d'uranium naturel, les prix sur le marché spot constituent un indicateur intéressant. À cet égard, après des années à des niveaux très bas, le prix spot de l'uranium s'établit depuis début 2024 autour de 100 \$/lb U₃O₈, ce qui suggère une tension sur le marché.

À plus long terme, la disponibilité de l'uranium naturel sur le marché mondial ne peut être considérée comme assurée, bien au contraire, car elle dépend de la croissance de la production électronucléaire mondiale et de la composition du parc correspondant. Les réserves raisonnablement assurées à un coût de production de 100 \$/lb U₃O₈ sont de 8 millions de tonnes. Les besoins en uranium naturel ont, en 2023, atteint 65 000 tonnes pour un parc mondial en exploitation de 391 GWe. Selon le scénario moyen de la *World Nuclear Association* (WNA) publié en 2023, la puissance disponible du parc mondial en 2040 s'élèverait à 686 GWe et les besoins d'uranium naturel seraient multipliés par deux. Ils seraient multipliés par près de trois pour le scénario haut (parc mondial de 931 GWe). De surcroît, une part croissante de SMR et d'AMR dans le parc mondial aurait pour effet d'augmenter encore les besoins, dans la mesure où ces « petits » réacteurs consomment, à production d'énergie électrique égale, davantage de matière fissile que les réacteurs de puissance. Selon ces prévisions, un défaut structurel de production d'uranium naturel pourrait intervenir avant la fin du siècle.

La Commission recommande que des études soient conduites pour évaluer les risques sur la disponibilité de la ressource en uranium naturel en tenant compte de l'évolution des politiques sur l'énergie nucléaire au niveau international et des scénarios de déploiement qui en découlent.

Les opérateurs sont en mesure de se prémunir contre les risques conjoncturels de défaut d'approvisionnement en mettant en place des mesures conservatoires techniques et économiques. Face aux risques structurels d'approvisionnement liés à la raréfaction des ressources, le prix courant n'est plus un indicateur déterminant pour baser une stratégie énergétique de long terme. L'évolution géopolitique est susceptible de rapprocher l'occurrence de ces risques.

La Commission considère que la décision de report à la fin du siècle des RNR est insuffisamment fondée : elle ne s'appuie que sur des considérations liées au prix de l'uranium en négligeant les risques sur sa disponibilité. Elle rappelle que les RNR permettent de s'affranchir de ces risques.

2.1.2 La nécessaire autonomie pour la conversion et l'enrichissement de l'uranium

L'uranium naturel a une teneur massique en ²³⁵U de 0,7 %, tandis que le combustible des REP est de l'uranium enrichi entre 3 et 5 % d'²³⁵U. Le procédé d'enrichissement comporte une phase de conversion en UF₆, puis l'enrichissement proprement dit et enfin la déconversion (voir annexe 8).

Les pays de l'OCDE concentrent près de 60 % des capacités mondiales de conversion, Coverdyn aux États-Unis pour 7 000 tonnes de capacité nominale, Cameco au Canada pour 13 000 tonnes et Orano en France pour 15 000 tonnes. Rosatom en Russie dispose de capacités nominales de 13 000 tonnes et la Chine via CNCC de 12 000 tonnes.

Orano dispose des capacités de conversion nécessaires pour couvrir l'intégralité des besoins en combustible d'EDF. En pratique EDF diversifie ses sources d'approvisionnement.

Compte tenu de la progression engagée du parc électronucléaire mondial dans les prochaines décennies, la demande de services de conversion devrait dépasser vers 2030 les capacités primaires, qui correspondent à celles des pays de l'OCDE et la part des capacités russes et chinoises mises sur le marché. Des investissements seront donc nécessaires au plan mondial.

L'enrichissement de l'uranium naturel demande de l'énergie comptabilisée sous forme « d'unités de travail de séparation » (UTS). Les capacités mondiales sont de 64 millions d'unités (MUTS), la construction de 7 MUTS additionnelles étant annoncée. Les principaux opérateurs dans l'OCDE sont Urenco aux États-Unis et en Europe (17,9 MUTS notamment à Sellafield en Angleterre), et Orano en France (7,5 MUTS). Les capacités nominales actuelles représentent 28 MUTS en Russie et 10 MUTS en Chine.

Les besoins d'EDF, soit 6 MUTS par an, sont inférieurs aux capacités d'Orano.

La Commission observe que la France dispose au travers de ses industriels des moyens nécessaires à la conversion et à l'enrichissement de l'uranium naturel dont elle a besoin. La situation spécifique de l'uranium de retraitement est traitée au paragraphe 2.1.4 *infra*.

La déconversion ne pose pas de problème particulier pour la filière française d'aujourd'hui.

2.1.3 L'uranium appauvri, ressource nationale garantissant une autonomie de 7 à 8 ans en REP

À l'issue de l'opération d'enrichissement, on obtient d'un côté l'uranium naturel enrichi (UNE) à 3-5 % d'²³⁵U et de l'autre l'uranium appauvri (Uapp), dont la teneur en ²³⁵U est de l'ordre de 0,3 % (contre 0,7 % environ pour l'uranium naturel).

Fin 2023, l'inventaire d'uranium appauvri représentait 337 000 tonnes sous forme d'U₃O₈, répartis pour moitié environ entre Bessines et le Tricastin. Les activités d'enrichissement augmentent ce stock d'environ 6 500 tonnes par an ; il devrait donc approcher 500 000 tonnes en 2050. Les capacités d'entreposage sont régulièrement augmentées en fonction des besoins.

L'uranium appauvri est utilisé couramment pour la fabrication de MOX, à hauteur de 100 à 150 tonnes/an.

L'uranium appauvri peut éventuellement être réenrichi pour produire de l'uranium enrichi en ²³⁵U (moyennant un investissement énergétique plus fort que l'enrichissement à partir de l'Unat). Certains industriels étrangers arbitrent régulièrement entre réenrichissement de l'Uapp dont ils disposent et approvisionnement sur le marché de l'Unat pour couvrir leurs besoins. Orano produit une partie de son Unat et pour le reste s'approvisionne sur des marchés à terme qui la protègent des fluctuations des prix. Pour Orano, le réenrichissement de l'Uapp n'est donc pas justifié actuellement d'un point de vue économique. Mais l'envol du prix de l'uranium naturel, ou une rupture de son approvisionnement, pourraient justifier l'utilisation massive de l'Uapp pour le combustible des réacteurs à neutrons thermiques après son réenrichissement. Le stock actuel d'Uapp équivaut à 60 000 tonnes d'uranium naturel, soit 8 années de consommation du parc national actuel.

À plus lointaine échéance, l'Uapp pourrait servir à la fabrication des combustibles pour réacteurs à neutrons rapides. À noter que pour cette utilisation, l'uranium (doublement) appauvri issu du réenrichissement est également utilisable. Un parc de RNR de 60 GWe consommerait 135 tonnes d'Uapp par an. Le stock d'Uapp constituerait alors une réserve quasi inépuisable permettant de s'affranchir complètement des mines.

La Commission recommande de considérer le stock d'uranium appauvri comme un stock stratégique permettant de garantir huit années d'autonomie du parc nucléaire français actuel constitué de REP en cas de crise importante sur la disponibilité de l'uranium naturel.

2.1.4 L'uranium de retraitement, une ressource en passe d'être mieux valorisée

L'inventaire d'uranium de retraitement (URT), issu du retraitement du combustible usé UOX des REP ou du combustible des UNGG représente, fin 2021, environ 32 000 tonnes réparties entre EDF (26 000 tonnes), Orano (5 500 tonnes, UNGG) et le CEA (500 tonnes, UNGG). Il est sous forme d'oxyde U_3O_8 . L'ensemble est entreposé à Pierrelatte (site du Tricastin). Ces capacités d'entreposage sont régulièrement étendues (projets Fleur 1- Orano et Fleur 2-EDF).

L'URT est une des matières radioactives réutilisables issues des combustibles usés. Il peut en effet se substituer à l'uranium naturel. Son utilisation nécessite alors les mêmes opérations de conversion et d'enrichissement que celle de l'Unat. Sa composition isotopique oblige toutefois à utiliser des installations distinctes de celles utilisées pour l'uranium naturel afin d'éviter la pollution de ces dernières par ^{236}U qui est un poison neutronique et ^{232}U qui pose des problèmes de radioprotection. Ces installations dédiées ne sont à ce jour disponibles qu'à l'étranger. Par ailleurs, pour compenser l'effet de poison neutronique de l' ^{236}U , l'URT doit être enrichi à 4,1 % d' ^{235}U (au lieu de 3,7 % en moyenne pour l'Unat).

Lorsque l'arrêt progressif de 14 réacteurs était programmé et que les ressources en uranium semblaient suffisantes pour couvrir les besoins de la filière, sans tension sur les prix ni rupture d'approvisionnement, l'orientation privilégiée pour l'URT était son déclassement en déchet radioactif et son stockage définitif. Dans la situation qui prévaut en 2024, l'uranium de retraitement disponible sur le sol national pourra au contraire contribuer à l'indépendance énergétique dès que la conversion ne sera plus effectuée en Russie.

24

Interrompue pendant une dizaine d'années, l'utilisation de l'uranium de retraitement enrichi (URE) par EDF vient de reprendre dans un réacteur de la centrale de Cruas et sera poursuivie dans d'autres réacteurs de 900 MWe jusqu'à leur arrêt. EDF envisage de la poursuivre également dans les réacteurs de 1300 MWe à partir de la VD4 (2025). EDF estime pouvoir résorber le stock ou le réduire d'un facteur 10 d'ici 2050 dans tous les scénarios d'évolution du parc et consommer ensuite l'URT issu du retraitement au fil de l'eau y compris dans les EPR2. La consommation du stock d'URT pourrait cependant être modulée en fonction de son intérêt comme réserve stratégique.

Mais pour cela EDF doit recourir aux services de Rosatom qui seule dispose actuellement des installations adaptées à la conversion de l'URT en UF_6 . Dès lors, l'investissement dans des capacités de conversion dédiées autres que russes est souhaitable. Des travaux sont en cours impliquant Cameco, Orano et Westinghouse en vue de proposer deux options pour la réalisation d'une filière de conversion européenne de l'URT qui pourrait être implantée en France ou au Royaume-Uni. Les résultats de ces études sont attendus mi-2024, en vue du Conseil de politique nucléaire de fin d'année.

Pour l'étape d'enrichissement de l'URT en URE, réalisée aujourd'hui soit aux Pays-Bas soit en Russie, il est également souhaitable de s'affranchir de la Russie. Une extension spécifique de l'usine GBII est envisagée.

La déconversion de UF_6 enrichi en UO_2 enrichi et la préparation des assemblages de combustible dit URE sont déjà réalisés par Framatome dans son usine de Romans.

La Commission recommande de mener à bien les actions permettant d'accéder à la souveraineté de la filière d'utilisation de l'uranium de retraitement.

Orano envisage d'employer la même filière qu'EDF pour l'URT issu des REP. Pour l'URT issu des combustibles usés UNGG (qui présente des teneurs en ^{235}U plus faibles que l'URT des REP), la valorisation par mélange avec du HALEU¹ pour des clients néerlandais, suisses ou la fabrication de combustibles pour réacteurs Candu pour la Roumanie est également envisageable. L'URT pourrait également alimenter les RNR. Le CEA n'a pas de plan de valorisation propre pour son URT : au vu des petites quantités qu'il détient, il prévoit de s'aligner sur les procédures d'Orano.

2.1.5 La valorisation du plutonium avec le MOX

Le Pu issu des REP est d'ores et déjà recyclé dans le combustible MOX, mélangé à de l'uranium appauvri. La teneur en Pu du MOX varie autour de 8,5 % selon les réacteurs. Grâce au recyclage du Pu, l'économie d'uranium naturel réalisée est de l'ordre de 10 %. Cette économie augmente jusqu'à 20 % avec l'utilisation d'URT en lieu et place de l'uranium naturel.

Vingt-deux réacteurs 900 MWe d'EDF sont actuellement chargés en combustible MOX, sur un total autorisé de 24. L'extension de l'utilisation du MOX aux réacteurs de 1300 MWe a fait l'objet d'études concluantes. Un premier chargement est prévu en 2031 sur l'un des 4 réacteurs de ce palier à Paluel.

Permettant une économie d'uranium naturel, le MOX est un pilier de la stratégie de fermeture du cycle qui a été réaffirmée par le Conseil de politique nucléaire du 26 février 2024. De ce fait, le rétablissement de la productivité de l'usine Melox revêt une importance décisive.

2.2 LE MULTIRECYCLAGE EN REP (MRREP)

Dans le texte ci-dessous, les termes de combustibles UOX ou MOX désignent en fait des assemblages de ces combustibles.

Les combustibles MOX usés contiennent comme les combustibles UOX des matières énergétiques recyclables, principalement du plutonium. Ils ne sont pas pour l'instant retraités. Une avancée supplémentaire vers la fermeture du cycle du combustible consisterait donc dans leur retraitement. Deux voies sont envisagées pour la valorisation des matières radioactives ainsi récupérées. Leurs calendriers sont différents.

La meilleure valorisation énergétique du plutonium issu du retraitement des combustibles MOX usés consiste à l'utiliser dans des RNR. Cela assure également la fermeture complète du cycle. Dans l'attente de la disponibilité des RNR, cette option impose d'accepter une augmentation progressive de l'inventaire de ces combustibles usés en les considérant comme une matière valorisable, et de réaliser les installations d'entreposage nécessaires.

La seconde voie consiste à utiliser le Pu issu du retraitement des MOX usés dans un REP : on parle alors de multirecyclage en REP (MRREP). L'intérêt de cette seconde voie est de s'appuyer sur les prochains réacteurs REP de Gen III, sans attendre le déploiement des RNR de Gen IV.

Pour un certain nombre d'acteurs de la filière, la voie MRREP doit être mise en place prioritairement, la voie RNR s'y substituant progressivement au-delà de 2050. Pour sa part, la Commission souligne depuis plusieurs années qu'il y aurait un intérêt à opter d'emblée pour la voie des RNR. Celle-ci est en effet plus efficace en termes de valorisation des matières radioactives déjà disponibles, d'économies de ressources naturelles, et de souveraineté nationale. Même si

¹ High-Assay Low-Enriched Uranium (combustible enrichi entre 5 et 20 % en ^{235}U)

certaines acteurs reconnaissent de plus en plus la nécessité de hâter l'arrivée des RNR, le MRREP reste l'option de référence dans les travaux présentés à la Commission.

Le programme MRREP est apparu en 2019 au moment de l'arrêt du programme Astrid et a été présenté comme une étape intermédiaire avant la fermeture du cycle avec des RNR, avec les objectifs suivants :

- éviter l'accumulation des combustibles MOX usés à entreposer ;
- stabiliser le stock de plutonium ;
- économiser les matières fissiles : le recyclage actuel procure une économie d'uranium naturel de 20 à 25 % (en incluant l'utilisation de l'URT), le MRREP doit augmenter cette économie jusqu'à 30 à 40 % par rapport au cycle ouvert ;
- favoriser le démarrage progressif d'un futur parc de RNR-Na, grâce aux acquis en matière de retraitement apportés par la R&D devant accompagner le MRREP.

La Commission s'est intéressée de près à ce programme dont elle s'est fait présenter chaque année les évolutions. Dans ses rapports n° 13 à 17, la Commission a émis un certain nombre de critiques, dont les principales sont les suivantes.

- La Commission a souligné la complexité du MRREP et les investissements importants qui seront nécessaires en R&D et en outils industriels.
- La Commission s'est montrée sceptique sur les synergies avancées entre le programme MRREP et la préparation de futurs programmes de RNR. La Commission redoutait que les ressources humaines et financières très significatives qui devraient être consacrées au MRREP ne le soient aux dépens de la progression des programmes sur les RNR.
- La Commission a constaté une certaine hésitation des acteurs concernant le combustible de type MOX2 destiné au MRREP (MOX utilisant du plutonium issu de MOX usé). L'annexe 9 décrit les différents types de combustibles MOX2 qui ont été présentés à la Commission.
- La Commission a observé que le MRREP conduit à augmenter la production d'actinides mineurs par rapport au MOX actuel et même par rapport à un futur MOX RNR, avec pour conséquence des colis de déchets plus actifs.
- La Commission a souligné la complexité de la fabrication des combustibles MRREP du fait de la nécessité de compenser la dégradation du vecteur isotopique du plutonium issu du retraitement des MOX usés.

Pour l'ensemble de ces raisons, la Commission a recommandé de privilégier la recherche de la fermeture du cycle par des RNR et estimé que l'étape intermédiaire du MRREP ne présente pas d'intérêt technologique ou scientifique majeur vis-à-vis de cet objectif.

Une journée d'audition a été consacrée à la présentation des dernières évolutions du programme MRREP, dont l'analyse technique est présentée au chapitre 3. La Commission note que plusieurs éléments nouveaux répondent à certaines de ses critiques. Les travaux conduits par le CEA, EDF, Framatome et Orano sur le MRREP au cours des deux dernières années ont recherché la plus grande simplification possible du concept pour limiter d'une part l'ampleur des travaux de R&D nécessaires et d'autre part les évolutions à apporter à l'outil industriel comme aux réacteurs EPR2, et donc *in fine* réduire les coûts de l'opération ainsi que les risques associés au déploiement du MRREP. Pour permettre cette simplification, un certain nombre d'objectifs initiaux du MRREP ont dû être abandonnés ou revus à la baisse, comme la réduction du stock d'actinides mineurs ou l'équivalence énergétique entre le MOX2 et l'UOX.

La Commission observe que les travaux récents de la filière nucléaire sur le MRREP conduisent à des simplifications significatives de gestion. En particulier, le combustible MOX2 dit MOX MR est nettement plus simple à qualifier et à fabriquer que les autres combustibles étudiés. Ces travaux représentent une amélioration sensible de la crédibilité technique du projet. Pour autant, de nombreux points restent à valider, qui sont discutés dans le chapitre 3.

La Commission reste sceptique sur le calendrier annoncé, qui envisage un déploiement vers 2040 ; au vu des éléments techniques présentés et des étapes restant à franchir, il semble peu probable que le MRREP puisse être mis en service industriellement avant 2050.

Les simulations de déploiement présentées à la Commission montrent que la mise en œuvre du MRREP avec un combustible MOX MR n'est pas pérenne. À terme, on ne disposera plus de suffisamment de plutonium issu du retraitement d'UOX pour le fabriquer. L'échéance de fin inéluctable du MRREP utilisant le MOX MR sera d'autant plus proche que la puissance installée du parc sera élevée. Les travaux exposés à la Commission ne font apparaître aucune perspective crédible du MRREP au-delà de l'utilisation du MOX MR.

En tout état de cause, le programme MRREP est actuellement envisagé comme une étape vers la mise en œuvre de réacteurs RNR. L'articulation entre le programme MRREP et la mise en service d'un parc de RNR ne sera possible qu'avec un stock de plutonium suffisant en termes de quantité et de qualité de son vecteur isotopique. Cette contrainte pourrait conduire à un arrêt plus rapide que prévu du programme MRREP. Or, les résultats de simulation présentés sur la transition entre un parc d'EPR2 avec MRREP et un parc de RNR sont encore très incomplets. Seuls des parcs de puissances installées relativement modestes (30 et 40 GWe) ont été étudiés à ce jour, alors que tous les scénarios de prospective énergétique misent sur des puissances beaucoup plus élevées.

Le MRREP basé sur le MOX MR est intrinsèquement limité dans la durée. La Commission recommande, si la mise en œuvre du MRREP était décidée, de conduire sans délai des travaux de simulation de l'évolution du parc avec une hypothèse de puissance installée mise à jour, afin de préciser l'échéance d'arrêt de l'utilisation du MOX MR, et donc du MRREP. En effet, il est indispensable de conduire les travaux de R&D permettant de s'assurer que le multirecyclage en RNR sera disponible au plus tard au moment où la fabrication du MOX MR ne sera plus possible. De plus, il serait nécessaire de piloter la gestion du parc (proportion de réacteurs mettant en œuvre le MRREP) pour garantir qu'un stock suffisant de plutonium de qualité fissile appropriée soit disponible à cette date.

27

Au total, même s'il existe quelques synergies entre la démarche MRREP et la démarche de fermeture du cycle par des RNR (la principale étant l'étude du retraitement des MOX usés), il n'en reste pas moins que les deux démarches sont concurrentes pour ce qui concerne l'allocation des ressources humaines et financières car des travaux significatifs devront avoir commencé sur des RNR avant que les travaux de mise au point et de qualification du MRREP soient achevés.

2.3 LA TRAJECTOIRE POUR LA FERMETURE COMPLETE DU CYCLE AVEC DES RNR

Tous les acteurs de la filière, industriels comme scientifiques, considèrent que la fermeture complète du cycle du combustible ne peut être atteinte que par la mise en œuvre de RNR de forte puissance, comparable à celle des REP actuels. L'enjeu de fermeture ayant été réaffirmé, il est indispensable de préparer l'étape de déploiement de RNR par des travaux de R&D conséquents.

Les AMR à neutrons rapides peuvent trouver une utilité pour certains besoins de l'industrie. Ils peuvent avoir par ailleurs avoir un intérêt pour valider certaines briques technologiques utilisables dans des RNR de puissance. Pour autant, la Commission souligne que les AMR de puissance modérée ne sont pas un outil approprié à la fermeture complète du cycle.

La Commission s'est fait présenter l'état des études conduites sur les RNR par le CEA depuis l'arrêt d'Astrid. Ces travaux s'inscrivent en totalité dans la continuité de l'expérience française en matière de RNR refroidis au sodium (Rapsodie, Phénix, Superphénix, Astrid). Cependant, la Commission

note que les plus récents se réduisent pour l'essentiel à des études papier et à des simulations numériques.

Un recensement des difficultés technologiques à surmonter pour envisager la construction d'un RNR sur la base du concept Astrid a été communiqué à la Commission par le CEA. Il présente l'état d'avancement de ses travaux ainsi que la maturité technologique atteinte. Le CEA indique qu'un certain nombre de points qu'il a identifiés n'aboutiront pas à l'issue des études en cours, en particulier :

- le développement d'un matériau de gaine pour le combustible permettant un accroissement significatif des performances ;
- la justification de la pertinence de la stratégie de mitigation des "Accidents Graves" à l'aide de plateformes de simulation multiphysique pour l'étude des situations accidentelles avec fusion du cœur ;
- la justification de la pertinence de la stratégie de mitigation des "risques sodium" à l'aide d'une plateforme de simulation multiphysique pour l'étude de la réaction sodium eau en environnement confiné (générateur de vapeur) ;
- le développement de la "vision sous sodium" (reconstruction d'images) de près (défectométrie, lecture, ...) comme de loin (repérage, déformation de structure, corps migrants) ;
- la mise au point de l'inspection des structures immergées dans la cuve du réacteur (levée de doute, contrôle des soudures) par des capteurs immergés dans le sodium.

Les travaux relatifs à la fabrication de combustible destiné aux RNR-Na, conduits à un rythme soutenu entre 2009 et 2019 par le CEA et Orano, se sont quasiment arrêtés avec la fin d'Astrid. Seules quelques simulations numériques sont poursuivies pour identifier les voies qui seraient à privilégier en cas de reprise des activités. En ce qui concerne l'aval du cycle des combustibles pour RNR, les travaux présentés sont anciens. Le CEA affirme qu'il y a une synergie entre les travaux nécessaires pour les RNR et ceux envisagés dans le cadre du MRREP. La Commission souligne que les assemblages de combustibles RNR et REP sont pourtant fondamentalement différents.

28

L'appréciation portée par la Commission dans son rapport n°14 de 2020 demeure donc pleinement d'actualité : « *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 études conduites par le CEA se limitent à résoudre des difficultés techniques identifiées lors du projet de démonstrateur Astrid, pourtant arrêté en 2019.

L'objectif de fermeture complète du cycle a été réaffirmé. L'ensemble des auditions a convaincu la Commission que cet objectif ne pourra être atteint que par la création d'un nouveau programme global, à visée industrielle, échéancé et financé, allant jusqu'au déploiement d'un parc de RNR de puissance et des usines du cycle associées.

Le périmètre de ce programme devrait inclure toutes les réalisations indispensables à son aboutissement, et tout particulièrement les plateformes d'essai majeures qui ne sont pas disponibles par ailleurs. Un outil d'irradiation pour qualifier en spectre rapide les combustibles et les matériaux relève de ce périmètre.

En capitalisant sur les acquis du passé, le programme devra obtenir la fermeture complète du cycle en temps opportun et dans des conditions économiques acceptables. Ceci requiert la mise en place d'une organisation réunissant l'ensemble des acteurs de l'industrie, parmi lesquels EDF, Framatome et Orano, et de la recherche, dont le CEA.

Pour se prémunir des risques de crise structurelle et compte tenu des délais de mise en œuvre, la Commission recommande que ce programme soit lancé dès maintenant.

CHAPITRE III : IMPLICATIONS SUR LES USINES DU CYCLE

La position de la Commission sur le MRREP et sur la fermeture complète du cycle avec des RNR a été exposée au chapitre précédent. Dans ce qui suit, la mise en œuvre du MRREP, étudiée depuis quelques années par les acteurs du nucléaire comme une voie transitoire vers le déploiement de RNR, est considérée. On porte l'attention sur les caractéristiques des usines de l'amont et l'aval du cycle électronucléaire nécessaires pour accompagner le MRREP si sa mise en œuvre était décidée, puis pour prendre en compte les combustibles des RNR. On considère aussi les services que pourraient apporter les industriels aux premiers développements des SMR utilisant du plutonium ou de l'uranium HALEU.

3.1 ETAT DES LIEUX

Pour l'amont du cycle, la France dispose d'une usine d'enrichissement d'uranium naturel en ^{235}U à Tricastin (George Besse II) pour ajuster l'isotopie de l'uranium aux conditions de fonctionnement des réacteurs, et d'une usine de fabrication des assemblages de combustible (AC) neufs à Romans (Framatome). Elles ont les capacités pour alimenter les REP du parc nucléaire actuel de 62 GWe (puissance nominale) en uranium enrichi jusqu'à 4 % en ^{235}U . Ce combustible est appelé combustible UNE (uranium naturel enrichi) ou combustible UOX (ce qui indique qu'il ne contient que de l'uranium) ou encore combustible REP (car utilisé dans ces réacteurs). Ces usines pourront alimenter en combustible les EPR2.

À l'aval du cycle, pour valoriser la matière fissile des assemblages de combustible nucléaire usé (ACU) que sont l'uranium et le plutonium, la France dispose des usines :

- de retraitement de la Hague (UP2-800 et UP3) pour séparer l'uranium et le plutonium,
- de fabrication d'assemblage de combustible MOX à Marcoule (Melox) à partir des oxydes de ces éléments séparés,
- de fabrication de combustible à base d'uranium de retraitement (URT) à Romans (Framatome, INB 63). Ce combustible est appelé URE (uranium de retraitement réenrichi) pour le distinguer de l'UNE.

Plus précisément, les usines de la Hague permettent de retraiter les ACU UOX à 1 % en ^{235}U et 1 % en plutonium. Melox permet de fabriquer des AC MOX avec un combustible constitué d'uranium appauvri et de 8,8 % de plutonium issu du retraitement des ACU UOX (plutonium de première génération de qualité fissile 60 %). À noter que l'autorisation de production de Melox est de 195 tML par an (tonne de métal lourd). Son record de production par le procédé Mimas (mélanges micronisés successifs de UO_2 et PuO_2) date de 2012, avec 150 tML. Mais à la suite de l'adoption d'un nouveau procédé d'obtention de UO_2 par voie sèche, la production s'est effondrée à moins d'un tiers de son record. Le retour au procédé de préparation de UO_2 par voie humide a été décidé et les moyens industriels nécessaires sont en cours de mise en place. Transitoirement, Orano importe l' UO_2 . La cadence de fabrication du MOX par le procédé Mimas-voie humide remonte progressivement (59 tML en 2022, cf. annexe 8).

Il convient de noter que la composition isotopique de l'URT est plus complexe que celle de l'UNE : il contient en particulier du ^{236}U neutrophage, qui nécessite d'enrichir l'URT à des teneurs en ^{235}U supérieures à celles de l'UNE. La présence de traces de ^{232}U pose par ailleurs des problèmes de radioprotection. C'est pourquoi l'URT est peu compétitif tant que le cours de l'uranium naturel reste bas. L'usine dédiée de Romans permet néanmoins de fabriquer des AC URE avec un combustible à 5 % en ^{235}U et 30 ppb en ^{232}U , issu de l'URT. Le chaînon manquant au cycle du combustible français pour mono-recycler plutonium et uranium des ACU UOX est la conversion de l'URT en vue de son enrichissement réalisée uniquement en Russie, et l'enrichissement lui-même qui peut être réalisé en Russie ou aux Pays Bas.

Les usines de la Hague peuvent aussi retraiter des ACU MOX à 6 % de Pu en dilution avec du nitrate d'uranyle ou de l'URT mais la cadence industrielle est faible (voir 3.3.1). Orano a un bon retour d'expérience pour avoir retraité, à l'échelle de la dizaine de tonnes, plusieurs lots d'ACU MOX contenant entre 4 et 7 % de plutonium.

Les orientations du nouveau programme nucléaire envisagent la possibilité de multi-recycler le plutonium dans les REP (MRREP) de type EPR2 et de mono-recycler l'URT issu du CU UOX (l'URT issu du retraitement du CU MOX n'ayant pas d'intérêt, voir paragraphe 3.3.2). Le MRREP est aussi considéré comme une étape vers les RNR. La finalité des RNR est de multi-recycler le plutonium et l'uranium de leur combustible pendant toute la vie des réacteurs, sans avoir recours à l'uranium naturel mais seulement à l'uranium appauvri. Les caractéristiques du CU en cas de multi-recyclage en REP et en RNR seraient donc modifiées par rapport à celle du CU UOX actuel, surtout par une teneur élevée en plutonium d'isotopies différentes de celle du plutonium utilisé actuellement dans le MOX. Il est important de savoir dans quelle mesure les usines actuelles de l'aval du cycle peuvent accompagner ce programme, avec ou sans modifications, ou si elles doivent être remplacées par de nouvelles usines.

Enfin, des SMR/AMR alimentés avec du combustible riche en plutonium ou uranium enrichi, dont il faudrait préparer le combustible et retraiter le combustible usé, pourraient apparaître dans le paysage nucléaire à côté des réacteurs de puissance. À ce stade, la plupart des porteurs de projet n'ont pas affiché de stratégie concrète tant sur l'amont que sur l'aval du cycle. Les conséquences sur les usines ne peuvent pas pour l'instant être évaluées.

Le CEA, EDF, Framatome et Orano travaillent depuis quelques années sur la faisabilité de la mise en œuvre du MRREP dans les EPR2 après 2050. Les scénarios envisagés prévoient ensuite le remplacement du MRREP par des RNR.

Dans ce qui suit, on détaille la dernière vision industrielle partagée par les acteurs et son implication sur les usines du futur.

3.2 FUTURES USINES DE FABRICATION DE MOX

3.2.1 Combustible envisagé pour le MRREP

La qualité fissile d'un combustible MOX est mesurée par le nombre de fissions par tonne de métal lourd, qui dépend, pour un flux donné de neutrons thermiques, de sa composition isotopique et des sections efficaces de fission des différents isotopes d'uranium et de plutonium.

Après plusieurs concepts de combustibles envisagés (voir annexe 9) dans le cadre du MRREP, les études s'orientent vers un combustible considéré comme proche du MOX REP, dit MOX MR. Un AC de MOX MR comporte des crayons de combustible à 3 teneurs en plutonium (4,04 % - 7,15 % - 10,78 %) sur support à uranium appauvri (0,25 % de ²³⁵U). En effet, la composition isotopique d'un MOX se dégrade à chaque cycle de recharge du réacteur REP (il y a moins d'isotopes ²³⁹Pu et ²⁴¹Pu, très fissiles, et de plus en plus d'isotope ²⁴⁰Pu non fissile). Il faut donc ajuster la composition isotopique du plutonium du combustible avec du plutonium de première génération provenant du CU UOX, qui est plus riche en ²³⁹Pu et donc de meilleure qualité fissile (60 %). Ainsi le MRREP commencerait avec une qualité fissile du plutonium de 55 % pour aller progressivement vers 50 %. La moindre efficacité du MOX MR comparée au MOX classique serait compensée par un nombre plus important d'AC MOX MR que d'AC MOX dans les cœurs des EPR2 pour avoir la même puissance. Selon EDF, la moitié des AC des EPR2 pourraient être constitués de ces MOX MR à condition d'enrichir le carbure de bore des barres d'arrêt du réacteur à 50 % en ¹⁰B. Le taux de combustion serait de 50 GWj/tML.

3.2.2 Usines de fabrication des MOX MR

Melox2 devra être impérativement construite pour prendre la suite de Melox dans les années 2040. La nouvelle usine sera requise pour fabriquer le MOX classique (MOX REP) nécessaire aux EPR2 en mode mono-recyclage à 30 %, avant que ne commence le MRREP. Dans le scénario présenté par Orano, la capacité de Melox2 avec deux lignes redondantes de fabrication de MOX REP serait entre 140 et 170 tML/an permettant d'alimenter largement un parc de 62 GWe (avec possibilité d'extension).

Le procédé de préparation du MOX REP sera « Mimas-voie humide », déjà utilisé dans Melox. Il ne sera pas nécessaire de faire évoluer le procédé pour les MOX MR (ou seulement à la marge). En revanche, les nouvelles usines devront être adaptées en termes de flux, de gestion des rebuts, de charge thermique et de radioprotection.

Les quantités annuelles de MOX MR nécessaires pour un parc de 62 GWe avec des EPR2 moxés à 50 % seraient de 310 tML/an, ce qui représenterait environ 170 tML/an supplémentaires. Si une telle puissance du parc était installée lors de la mise en route du MRREP, la capacité de Melox2 devrait donc être doublée. Les scénarios qui sont documentés par le CEA et Orano portent plutôt sur des puissances de 40 et 50 GWe. Les demandes en MOX MR seraient alors de 210 et 260 tML/an et le MRREP pourrait être déployé grâce à une troisième ligne de fabrication. Le fait qu'il faille plus de MOX MR que de MOX REP tient aux différences de pourcentage de moxage des EPR2 et de la qualité fissile du plutonium.

La Commission observe que ces chiffres sont basés sur des scénarios de puissance du parc obsolètes. Ils doivent être mis à jour.

3.3 FUTURES USINES DE RETRAITEMENT

33

3.3.1 Les limites du procédé Purex et les performances d'un nouveau procédé

Actuellement les usines de la Hague utilisent le procédé Purex pour séparer le plutonium et l'uranium à la cadence de 4 tML de CU UOX par jour. Les usines ne sont autorisées à fonctionner qu'avec des solutions aqueuses telles que le rapport Pu/U soit inférieur à 1,63 %.

Le retour d'expérience d'Orano sur le traitement des MOX REP (60 tML retraitées entre 2004 et 2008) montre que le procédé Purex ne peut pas être utilisé facilement avec les solutions résultant de la dissolution directe d'un CU MOX trop riche en plutonium. Pour traiter des ACU riches en Pu, il faut diluer les solutions pour ramener la teneur en plutonium dans les limites acceptables par l'usine (2,19 % pour traiter les CU MOX). Or, la caractéristique commune des nouveaux CU à retraiter pour déployer le MRREP (CU MOX en entreposage et futurs CU MOX MR) est une teneur en plutonium supérieure à 6 %. Leur dilution entraînera donc une augmentation considérable des volumes à traiter.

La principale étape limitante de la cinétique du procédé Purex est la dissolution complète du plutonium du combustible dans l'acide nitrique, qui est fortement ralentie pour le MOX en raison de sa teneur plus élevée en Pu, en comparaison à l'UOX. Ainsi, la cadence de traitement des ACU MOX passerait à 1,8 tML par jour environ. En outre, les teneurs élevées en plutonium et en américium des CU MOX, auraient des conséquences sur le nombre de cycles de purification du plutonium et sur la vitrification des produits de fission. Il apparaît donc clairement que, pour retraiter industriellement des ACU MOX dans les ateliers actuels de la Hague avec le procédé Purex, il faudra augmenter les cadences pour gagner en capacité.

En conséquence, deux options sont envisagées pour retraiter les combustibles MOX MR.

La première option est une adaptation des usines actuelles, consistant à dupliquer les lignes de dissolution, de séparation uranium-plutonium et de conversion du plutonium de nitrate en oxyde, ainsi que les évaporateurs des produits de fission et les installations de vitrification. Par ailleurs, l'adaptation des installations de vitrification est nécessaire pour tenir compte de l'augmentation de la teneur en américium des solutions à vitrifier car celle-ci a un impact sur la dose alpha cumulée à 10 000 ans. Ainsi, il faudra diluer les solutions de produits de fission et d'actinides mineurs issues des combustibles MOX MR usés avec celles issues du traitement des combustibles UOX usés.

La deuxième option est de changer de procédé, en utilisant la voloxydation pour dissoudre complètement le combustible après cisailage (voir paragraphe 3.6) et un monoamide (déjà sélectionné en laboratoire à Atalante) à la place du tributylphosphate (TBP) pour séparer uranium et plutonium. Cela permettrait un traitement de grandes quantités de MOX sans dilution et de supprimer la phase redox et le phosphore dans les usines. Ces procédés ont été testés en laboratoire, mais des travaux importants sont encore nécessaires pour les qualifier à l'échelle industrielle. Notons qu'un nouveau procédé sera forcément nécessaire dans le cas des MOX RNR, qui sont très riches en Pu. La position d'Orano est que ce changement serait souhaitable dès le traitement des MOX MR. Cependant, changer de procédé est une entreprise considérable car cela entraîne une modification complète de l'aval du cycle tel qu'il est pratiqué depuis des décennies.

3.3.2 Options pour les usines d'après 2040, mise à niveau ou renouvellement

Le CPN de février 2024 a confirmé la stratégie de fermeture complète du cycle et donc le retraitement des CU, avec des investissements importants dans les usines de la Hague. Les objectifs de puissance du parc d'EPR2 vers 2050 ne sont pas encore précisés. EDF et Orano envisagent deux options pour les usines de retraitement qui devront soutenir le MRREP : une mise à niveau progressive des usines de la Hague en gardant le procédé Purex amélioré ou un report de la mise en service d'une nouvelle usine en 2055 utilisant un nouveau procédé.

Retraitement des ACU UOX et URE

Dans un premier temps, seul l'URT des ACU UOX sera mono-recyclé sous forme d'URE à 100 % dans les EPR2. En effet l'URT des autres combustibles usés est particulier (présence des isotopes ^{232}U et ^{236}U en quantités supérieures à celles de l'URT des UOX) et de plus très appauvri. Il n'y a pas d'intérêt à le réenrichir dans l'immédiat.

En revanche, il pourrait être employé à terme en ajustant sa composition isotopique avec du HALEU et dans des RNR. La réflexion sur ce sujet n'est pas vraiment lancée. Quant au plutonium issu des ACU UOX, il est précieux puisqu'il servira à ajuster la composition isotopique des AC MOX MR successifs.

Retraitement des MOX REP

Le retraitement des ACU MOX actuellement en entreposage, en cohérence avec celui des ACU UOX et ACU URE sera la première étape pour aller vers celui des ACU MOX MR en régime continu.

Le CEA a particulièrement étudié un scénario à 40 GWe multi-recyclant le plutonium dans 24 EPR2 : l'évolution de la demande en MOX MR jusqu'en 2100, la demande en retraitement, l'évolution des stocks de CU et celle des divers déchets ont été estimées. Des comparaisons sont faites avec le mono-recyclage. Par exemple, il faudrait retraiter 1010 tML/an de CU (respectivement 650 de UOX, 160 d'URE, 100 de MOX et 100 tML/an de MOX-MR) contre 620 tML/an de UOX seulement en cas de mono-recyclage.

Le besoin en uranium naturel serait réduit de 20 % par rapport au mono-recyclage. Néanmoins, la production d'actinides mineurs augmenterait d'environ 50 % et le flux de plutonium dans le cycle serait triplé. La consommation de Pu de bonne qualité fissile doit être contrôlée pour ne pas obérer le démarrage des RNR.

Dans l'option d'une mise à niveau des usines de la Hague en gardant le procédé Purex amélioré, les équipements seraient doublés pour atteindre une capacité de 1200 tML/an. Le procédé pourrait être mis en service entre 2045 et 2050.

Dans l'autre option, la mise en service d'une nouvelle usine serait repoussée à 2055, afin d'introduire la voloxydation et le nouveau procédé au monoamide. La conception pourrait démarrer en 2035 mais les détails ne sont pas connus.

La Commission observe que ces chiffres sont basés sur des scénarios de puissance du parc obsolètes. Ils doivent être mis à jour.

La Commission souligne que les futures usines de fabrication de MOX MR et de retraitement des MOX et MOX MR usés sont complémentaires et leurs constructions ne doivent pas être trop décalées dans le temps. Aussi, la Commission recommande de traiter les dossiers à égalité.

3.4 PRISE EN COMPTE DU COMBUSTIBLE RNR DANS LES USINES

Les études de cycle amont et aval doivent être conduites en cohérence avec la perspective du déploiement d'un parc de réacteurs. La fermeture complète du cycle ayant été réaffirmée, il convient de se poser dès maintenant la question des usines de fabrication puis de retraitement de combustible MOX RNR.

35

3.4.1 Fabrication des MOX RNR

Dans sa présentation à la Commission, Orano évoque la possibilité d'équiper Melox2 d'une ligne MOX RNR dédiée avec une capacité de 8 à 10 tML/an et pour faire face à une demande de combustible pour des têtes de série AMR à neutrons rapides et combustible solide. En cas de besoin, un pilote de capacité de 1 à 2 tML/an pourrait être construit avant Melox2.

La Commission recommande que les études relatives à Melox2 soient complétées pour prendre en compte les besoins d'un parc de RNR de puissance.

3.4.2 Retraitement des MOX RNR

Les nombreuses fonctions indispensables des installations pour retraiter les ACU MOX RNR sont connues. Elles n'existent pas dans les usines actuelles et ne sont pas explicitement prévues dans les usines destinées au MRREP. La réflexion porte aujourd'hui sur la construction d'un pilote pour répondre aux besoins exprimés par les start-up pour les AMR. A cet égard, une ligne pilote est envisageable dans les usines de la Hague renouvelées. Ce serait une installation équipée d'une tête permettant la découpe des ACU MOX RNR et la solubilisation complète du plutonium. Son couplage avec la ligne de préparation d'AC MOX RNR neufs permettrait d'alimenter un démonstrateur vers 2050.

La Commission estime indispensable de compléter ces réflexions par une étude du retraitement des combustibles usés qui seraient issus de RNR de puissance.

3.5 IMPACT DES SMR/AMR SUR LES USINES

Les AMR qui appellent des innovations au niveau du combustible sont notamment les AMR à neutrons rapides (à combustible MOX solide), les MSR (à combustible liquide) et les AMR utilisant de l'uranium HALEU.

Framatome rappelle qu'elle a l'expérience de la conception de combustibles MOX et MOX RNR et qu'elle dispose par ailleurs de la licence pour produire du combustible Triso. Elle compte entrer dans le marché international du HALEU (avec de l'uranium contenant entre 5 et 20 % d'²³⁵U) en se portant candidate aux appels d'offre du *HALEU Availability Program* du *Department of Energy* (DOE) américain. Cet uranium est utilisé sous forme d'alliage métallique pour les cœurs des réacteurs de recherche et de préparation d'isotopes à usage médical, et sous forme d'oxydes dans les SMR ou AMR envisagés en Europe.

La Commission rappelle (cf. Rapport 17) que les enjeux liés à l'accessibilité et à la circulation de ces matières hautement enrichies (risques de criticité, charge thermique, risques de prolifération, gestion du combustible irradié) doivent être étudiés de manière précise, en particulier quant au respect des traités internationaux. Ils sont en effet susceptibles d'avoir un impact très significatif sur la cinétique de déploiement industriel.

36

Pour les combustibles liquides pour MSR à neutrons rapides, des investissements sont identifiés à ce jour, ils concernent des installations de R&D au CEA : un nouveau laboratoire à Atalante et un nouvel équipement de caractérisation des sels fondus au Leca-Star.

Orano souhaite accompagner les besoins des start-up. Elle pourrait répondre aux premiers besoins avec une ligne pilote de fabrication de sels de 0,1 à 0,5 t Pu/an à la Hague, puis de 1 à 2 t Pu/an pour alimenter des têtes de séries de MSR.

La Commission souligne que, quel que soit le combustible utilisé, les réflexions sur le retraitement des nouveaux combustibles pour SMR/AMR sont pour l'instant embryonnaires. La question du retraitement devra être traitée quand les lauréats de la seconde vague seront connus.

3.6 R&D ET QUALIFICATIONS EN PREPARATION DU MRREP ET DES RNR

Selon les acteurs entendus par la Commission, la majeure partie de la R&D relative au cycle associé au nouveau nucléaire, en dehors des SMR, porte sur la qualification du MOX MR et sur le retraitement du MOX sous ses différentes formes, dans la continuité des actions déjà engagées.

En ce qui concerne la R&D sur la fabrication, la recherche d'additifs plus résistants à la température et au rayonnement gamma pour la fabrication des poudres est en cours. Par ailleurs, le CEA a abandonné les développements sur le cryobroyage en raison des difficultés technologiques liées à la vidange de la poudre après broyage.

Une irradiation expérimentale de crayons MOX et MOX MR obtenus par le procédé « mimas voie humide » (que l'on pourra ainsi comparer entre eux), ainsi que des crayons MOX MR Chromox (dopés au Cr) est planifiée en 2033 dans un réacteur de 1300 MWe avec pour objectif l'acquisition de données pour la qualification des codes de calculs scientifiques. Trois à quatre cycles d'irradiation seront réalisés. Les essais d'irradiation du MOX MR dans un réacteur 1300 MWe sont indispensables pour valider son comportement en réacteur EPR2 car ces réacteurs sont les plus proches en termes de flux neutroniques.

En ce qui concerne la R&D sur le retraitement, le CEA porte maintenant l'essentiel de ses moyens sur la voloxydation et la dissolution totale du plutonium dans l'acide nitrique. La voloxydation consiste en un traitement thermique (typiquement entre 450°C à 650°C) du combustible MOX usé sous atmosphère oxydante, qui provoque des transformations de phases par oxydation entraînant la pulvérisation de l'oxyde du combustible et le relâchement de certains produits de fission gazeux ou volatiles. La séparation du combustible de la gaine est ainsi facilitée et la poudre générée est plus facile à dissoudre. Les études de base ont été conduites à Atalante sur des pastilles UO₂ et MOX non irradiées (type Mimas) et la validation du procédé se poursuit sur des MOX irradiés. Les résultats déjà obtenus montrent que la voloxydation est efficace mais qu'elle doit être améliorée. Parallèlement, un prototype de four de voloxydation sous agitation, dans lequel est prévu un programme d'essais paramétriques avec de l'oxyde d'uranium, a été construit. Outre la poursuite de la caractérisation des coques voloxydées, la suite de l'étude verra la réalisation d'essais de voloxydation sur combustible MOX Mimas à microstructure gros grains (éventuellement dopé au chrome) et le développement d'un système de piégeage et de caractérisation des gaz émis lors de la voloxydation des MOX irradiés, en particulier du tritium. Il s'agit d'un programme très important pour le MRREP. La réalisation des expériences de voloxydation et de dissolution consécutive du MOX irradié nécessite de nouveaux équipements à Atalante.

La Commission considère que la mise au point du retraitement des MOX usés est indispensable quelle que soit l'option MRREP ou RNR : c'est en fait la partie importante commune aux deux options.

Au-delà de la R&D spécifique en cours, il reste à étudier notamment des scénarios d'accident et qualifier la fabrication du MOX MR avec le procédé Mimas et la fabrication des grappes d'arrêt modifiées. Par ailleurs, le contenu radiologique des déchets issus du retraitement des MOX usés, en particulier des MOX MR, se répercutera sur la nature (inventaire radiologique, puissance thermique, matrice vitreuse) et le nombre de colis vitrifiés.

Les acteurs ont identifié les verrous à lever pour la conception des nouvelles usines et certaines voies explorées sont prometteuses. La Commission recommande d'intensifier et de concrétiser la R&D pour mener ces nouveaux procédés jusqu'à l'industrialisation, en veillant à porter les efforts en priorité sur les briques utiles aux RNR.

3.7 CONCLUSION

Tous les acteurs du nucléaire sont impliqués dans les études pour décider si la mise en route du MRREP dans des EPR2 est techniquement possible. Les caractéristiques du combustible permettant de mettre en œuvre le MRREP sont établies, ainsi que les performances des usines pour le préparer et en recycler continuellement la matière fissile. Néanmoins, que l'on réalise ou non le MRREP, la fermeture du cycle impliquera tôt ou tard une transition vers les RNR. La fabrication et le retraitement du MOX RNR arriveront très probablement avant la fin de vie des usines projetées. C'est pourquoi la Commission souligne l'importance d'anticiper cette évolution dès la conception des usines.

CHAPITRE IV : DECHETS HA-MAVL

4.1 LA DEMANDE D'AUTORISATION DE CREATION (DAC) DE CIGEO

La stratégie française de gestion des déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue prévoit leur stockage géologique, solution qui fait l'objet d'un consensus scientifique au niveau international (voir chapitre 5 *infra*). L'Andra a déposé en janvier 2023 une demande d'autorisation de création pour un stockage géologique dénommé Cigéo situé sur les territoires de la Meuse et de la Haute-Marne. Conformément à l'article 1er de la loi n°2016-1015 du 25 juillet 2016, codifié à l'article L542-10-1 du Code de l'environnement, la demande d'autorisation de création donne lieu à un rapport de la CNE, qui sera joint à l'avis de l'ASN et au compte-rendu des débats publics de 2005 et de 2013 organisés par la CNDP (Commission nationale du débat public) pour leur examen par l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST).

4.1.1 Méthode retenue pour l'analyse du dossier de DAC

La Commission a pour mission d'analyser les fondements scientifiques et techniques des travaux réalisés et présentés par l'Andra pour démontrer la faisabilité et la sûreté de Cigéo. Compte tenu du volume de documents à analyser (documents du dossier de DAC lui-même et éléments justificatifs issus de plusieurs décennies de recherches conduites par l'Andra), la Commission estime qu'une durée de trois années environ sera nécessaire pour élaborer son rapport, qu'elle prévoit de publier à la fin de l'année 2025.

La Commission a tout d'abord identifié les principales disciplines scientifiques qui sont mises à contribution pour la conception et l'analyse de sûreté de Cigéo :

- la géologie ;
- l'hydrogéologie ;
- la science des matériaux ;
- la chimie des radionucléides et leurs interactions avec les composants de Cigéo ;
- la chimie des interfaces ;
- les sciences de l'environnement et du climat.

Pour chacun de ces domaines scientifiques, les données recueillies au cours de trente années de recherche dans le laboratoire souterrain et au niveau international sont examinées pour s'assurer de leur exhaustivité par rapport aux besoins de la conception de Cigéo, de leur qualité et de leur cohérence avec les données de la littérature scientifique.

L'utilité première de ces données est d'alimenter les modèles pour réaliser des simulations numériques qui seules peuvent permettre d'évaluer le comportement à long terme du stockage. La Commission examine les modèles conceptuels utilisés, les modèles numériques associés et les résultats des simulations numériques. Elle porte une attention particulière aux données d'entrée et à l'interprétation des résultats, en intégrant les incertitudes.

La Commission examine également la faisabilité de la récupérabilité des colis pendant l'exploitation.

En plus de ces sujets proprement scientifiques, la Commission a identifié plusieurs thèmes, qualifiés de « transverses » par l'Autorité de sûreté nucléaire, qui appellent une clarification pendant la phase d'instruction du dossier. Il s'agit des questions concernant les inventaires, la réversibilité et la phase industrielle pilote. La Commission estime utile de faire connaître quelques éléments de son appréciation sur ces sujets dès le présent rapport.

4.1.2 L'inventaire des déchets appelés à être stockés dans Cigéo

Les déchets appelés à être stockés dans l'installation Cigéo sont identifiés dans l'article D542-91 du code de l'environnement, en vigueur depuis le 11 décembre 2022, lequel définit les notions d'inventaire de référence et d'inventaire de réserve :

« L'inventaire sur lequel l'Andra se fonde pour mener les études et recherches relatives à la conception du centre de stockage prévu à l'article L.542-10-1 comprend, pour l'application du plan national de gestion des matières et déchets radioactifs, un inventaire de référence et un inventaire de réserve. L'inventaire de réserve prend en compte les incertitudes liées notamment à la mise en place de nouvelles filières de gestion des déchets ou à des évolutions de politique énergétique.

Le centre de stockage est conçu pour accueillir les déchets de l'inventaire de référence. Il est également conçu pour être en mesure d'accueillir les substances qui figurent à l'inventaire de réserve, sous réserve le cas échéant d'évolutions dans sa conception pouvant être mises en œuvre en cours d'exploitation à un coût économiquement acceptable.

L'inventaire des déchets à retenir pour la demande d'autorisation de création du centre de stockage peut être précisé par arrêté du ministre chargé de l'énergie pris après avis de l'Autorité de sûreté nucléaire et de l'Andra. »

Le dossier de demande d'autorisation de création de Cigéo contient, dans le plan directeur d'exploitation (PDE), une liste des déchets pris en compte pour la conception et l'analyse de sûreté du stockage souterrain. En synthèse, il s'agit principalement des déchets existants et de ceux qui seront produits par le fonctionnement puis le démantèlement des installations nucléaires existantes, auxquelles il faut ajouter les installations autorisées mais non encore en service suivantes : EPR de Flamanville, réacteur Jules Horowitz (RJH), installation ITER. Les durées de fonctionnement considérées sont de 50 ans pour les réacteurs électrogènes et le RJH et de 20 ans pour ITER.

40

En particulier, pour les déchets de haute activité, Cigéo est conçu avec l'hypothèse du retraitement de tous les combustibles usés, ce qui implique que seuls les déchets ultimes (actinides mineurs et produits de fission) conditionnés en colis de déchets vitrifiés soient à stocker. Les définitions retenues par l'Andra dans son dossier de DAC sont donc conformes au discours tenu depuis l'origine du projet aux populations de Meuse et Haute-Marne concernant la finalité de Cigéo.

La liste des déchets indiquée dans le PDE constitue l'inventaire de référence (au sens de l'article D542-91) sur la base duquel les études de sûreté présentées dans le dossier de DAC ont été réalisées. Toute modification de ce périmètre affecterait potentiellement les résultats de ces études.

Le dernier alinéa de l'article D542-91 rend possible une actualisation par l'Andra de son dossier de DAC pour modifier l'inventaire de référence, par exemple en incluant tout ou partie de l'inventaire de réserve. Une telle modification requerrait un arrêté du ministre chargé de l'énergie.

La Commission souligne d'une part que toute modification de l'inventaire de référence du dossier de DAC en cours d'instruction nécessiterait de nouvelles études de sûreté et de conception. D'autre part la Commission rappelle que les engagements pris auprès des populations de Meuse-Haute-Marne quant au catalogue de l'inventaire de référence des déchets à stocker dans Cigéo ont constitué la base des discussions des lois de 2006 et de 2016 sur la gestion des déchets radioactifs. Une nouvelle concertation serait donc indispensable.

La Commission recommande que le décret d'autorisation de création fixe l'inventaire des déchets à stocker dans Cigéo à l'inventaire de référence. Par ailleurs, la Commission estime utile de mentionner l'inventaire radiologique associé.

4.1.3 Réversibilité

L'évolution, en France, de la législation et de la réglementation depuis 1991, a permis de préciser progressivement l'acceptation de la notion de réversibilité d'un stockage géologique.

La première loi relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue, la loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991, prévoyait la communication annuelle par le Gouvernement au Parlement d'un rapport portant sur l'avancement des travaux sur trois axes, dont « *l'étude des possibilités de stockage réversible ou irréversible dans les formations géologiques profondes* ».

La deuxième loi relative au même sujet, la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006, dite loi de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs, a élargi les recherches aux matières radioactives et aux déchets de moyenne activité. Elle a également réservé la notion de stockage géologique au seul stockage réversible.

Depuis lors, les études techniques ont conforté l'idée qu'il serait possible d'atteindre un niveau de sûreté satisfaisant tout en assurant la réversibilité du stockage. C'est ce dont prend acte une troisième loi, la loi n° 2016-1015 du 25 juillet 2016 « *précisant les modalités de création d'une installation de stockage réversible en couche géologique profonde des déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue* ».

En vigueur au moment du dépôt de la DAC, l'article 1er de cette loi, codifié à l'article L542-10-1 du Code de l'environnement, définit la réversibilité : « *la réversibilité est la capacité, pour les générations successives, soit de poursuivre la construction puis l'exploitation des tranches successives d'un stockage, soit de réévaluer les choix définis antérieurement et de faire évoluer les solutions de gestion* ». La loi précise par ailleurs comment la réversibilité est atteinte : « *la réversibilité est mise en œuvre par la progressivité de la construction, l'adaptabilité de la conception et la flexibilité d'exploitation d'un stockage en couche géologique profonde de déchets radioactifs permettant d'intégrer le progrès technologique et de s'adapter aux évolutions possibles de l'inventaire des déchets consécutives notamment à une évolution de la politique énergétique* ». En outre, la loi précise que la réversibilité inclut la récupérabilité des colis : « *Elle inclut la possibilité de récupérer des colis de déchets déjà stockés, selon des modalités et pendant une durée, cohérentes avec la stratégie d'exploitation et de fermeture du stockage.* »

41

Les quatre composantes de la réversibilité sont donc selon la loi :

- la **progressivité** de la construction,
- la **flexibilité** de l'exploitation,
- la **récupérabilité** des colis de déchets pendant une certaine durée,
- l'**adaptabilité** de la conception et de sa capacité à prendre en compte un inventaire de nature et de volume distincts de celui de départ.

Ces quatre composantes de la réversibilité sont d'importances inégales pour la définition du projet Cigéo et pour l'exploitation du centre de stockage.

La progressivité est essentiellement une bonne pratique constructive. Les méthodes de construction de Cigéo pourront être adaptées aux aléas du chantier ou modernisées en fonction des progrès techniques.

La flexibilité de Cigéo concerne ses modalités d'exploitation qui pourront être adaptées au rythme d'arrivée des colis de déchets de haute ou moyenne activité. Par exemple, les chroniques d'arrivées des colis dépendront du rythme des opérations de retraitement et de conditionnement des déchets ultimes qui pourra être affecté par une modification de la durée de vie des réacteurs.

La récupérabilité des colis de déchets est, pour sa part, un élément essentiel de la réversibilité à laquelle doit se conformer Cigéo selon les lois de 2006 et de 2016. Aisément compréhensible, ce concept doit toutefois être précisé. Dans son acception la plus large, la récupérabilité devrait porter sur la totalité des colis, sans limitation de temps. En réalité, la sûreté à long terme du stockage

géologique suppose sa fermeture, pour garantir de manière passive la sûreté à long terme. La récupérabilité doit donc être assurée au plus pendant la période d'exploitation. À cet égard, la loi du 25 juillet 2016 précise utilement que « *les modalités de la récupérabilité et sa durée d'exercice doivent être cohérentes avec la stratégie d'exploitation et de fermeture du stockage* ».

Selon la même loi, la récupérabilité des colis de déchets doit être démontrée par des essais *in situ*, réalisés pendant la phase industrielle pilote (Phipil) correspondant au démarrage de l'exploitation. Pour conforter l'importance de la Phipil, il est également précisé que « *tous les colis de déchets doivent rester aisément récupérables durant cette phase* ».

Au stade de la DAC, seule la récupérabilité a des enjeux scientifiques et techniques forts dans la mesure où la conception du stockage doit garantir la capacité à identifier et récupérer certains colis pendant la période prescrite par la loi (d'ordre séculaire). La Commission se propose donc d'analyser plus particulièrement dans le dossier de DAC les éléments permettant de garantir l'accès à l'ensemble des ouvrages souterrains (descenderie, quartiers, alvéoles) notamment sous l'angle de leur tenue mécanique et de leur déformation.

La quatrième composante de la réversibilité est « *l'adaptabilité de la conception [...] permettant d'intégrer le progrès technologique et de s'adapter aux évolutions possibles de l'inventaire des déchets consécutives notamment à une évolution de la politique énergétique* ».

Conformément à la loi, des études dites d'adaptabilité sont conduites pour évaluer la faisabilité du stockage d'autres déchets décrits dans l'inventaire de réserve. Si, dans l'avenir, il était envisagé de stocker certains de ces déchets dans Cigéo, une modification du décret d'autorisation de création devrait être instruite.

La Commission recommande de dissocier les études d'adaptabilité de l'instruction de la DAC.

4.1.4 La phase industrielle pilote (Phipil)

La phase industrielle pilote (Phipil) est une innovation de la loi n° 2016-1015 du 25 juillet 2016 qui a une justification politique, tout autant que technique. Le pouvoir législatif a, en effet, voulu qu'il soit procédé en deux temps pour l'autorisation de création : d'abord une autorisation de mise en service limitée à la phase industrielle pilote, ensuite une autorisation de mise en service complète. Ainsi, selon l'article 1er de cette loi, codifié à l'article L542-10-1 du Code de l'environnement, « *l'exploitation du centre débute par une phase industrielle pilote permettant de conforter le caractère réversible et la démonstration de sûreté de l'installation, notamment par un programme d'essais in situ. L'autorisation de mise en service est limitée à la phase industrielle pilote. Tous les colis de déchets doivent rester aisément récupérables durant cette phase. La phase industrielle pilote comprend des essais de récupération de colis de déchets. [...] L'autorisation de mise en service est limitée à la phase industrielle pilote.* »

La proposition de l'Andra quant au contenu et à l'organisation de la phase industrielle pilote est détaillée dans le PDE, qui distingue deux phases successives.

- La première phase, commencera à la signature du décret d'autorisation de création, et couvrira la période de construction et de qualification de l'installation jusqu'aux essais en inactif inclus.
- La seconde phase, à partir de l'autorisation de mise en service de l'installation, commencera par les essais sur colis actifs et se poursuivra par un début d'exploitation industrielle de l'installation.

La première phase de la Phipil intègre le test des installations depuis la surface, la descente de colis inactifs et leur récupération. Elle se conclut par la mise à jour du rapport de sûreté en vue de l'obtention de l'autorisation d'exploiter délivrée par l'ASN. La Commission considère cette première phase comme une phase classique de qualification d'une installation industrielle.

La seconde phase de la Phipil correspond à la validation du fonctionnement industriel du stockage en actif.

Les résultats de la Phipil feront l'objet d'un rapport de la CNE, d'un avis de l'ASN et d'un avis des collectivités territoriales. Ces éléments seront adressés à l'OPECST. À l'issue de la Phipil, la poursuite de l'exploitation est soumise à une autorisation de l'ASN.

La Commission recommande que les critères de réussite de la Phipil soient fixés en amont du décret d'autorisation de création.

La Commission recommande d'ores et déjà que la priorité soit donnée, dans le déroulement de la Phipil, à la validation des processus industriels et que l'exploitant conserve la pleine responsabilité de sa mise en œuvre.

La Commission recommande qu'il n'y ait pas d'interruption des opérations de mise en stockage pendant la phase d'instruction de la Phipil.

4.2 AVANCEMENT DU PROGRAMME DE R&D SUR LA GESTION DES DECHETS BITUMES

Pour répondre aux demandes exprimées par l'Autorité de sûreté nucléaire et l'Autorité de sûreté nucléaire de défense, l'Andra, le CEA, EDF et Orano ont lancé en octobre 2020 un programme de R&D quadripartite d'une durée initialement prévue de 5 ans. L'objectif de ce programme, nommé Babylone, qui reprend l'ensemble des recommandations de la revue internationale conduite en 2018 et 2019 sur la suggestion de la Commission, est d'apporter les éléments de connaissance et de démonstration nécessaires au stockage des colis de déchets bitumés dans Cigéo, si possible en l'état, avec une conception des alvéoles destinés aux déchets bitumés la plus standard possible. Ce programme comporte 4 volets :

- la maîtrise du domaine de composition et de la robustesse des analyses de réactivité, incluant l'étude de la réactivité des enrobés bitumés soumis à une température externe allant jusqu'à 200°C (les températures supérieures n'ont pas d'intérêt pour la sûreté) ;
- la modélisation d'essais à l'échelle 1 et de l'effet du vieillissement des enrobés bitumés (incluant l'hydrolyse des bitumes et la formation de bulles d'hydrogène par radiolyse) ;
- la maîtrise du gonflement des bitumes par reprise d'eau et de l'agression mécanique consécutive du COx (en support aux évaluations après fermeture) ;
- la faisabilité d'un procédé de destruction des enrobés bitumés par dissolution chimique (pour des quantités limitées de fûts d'enrobés bitumés, FEB).

La Commission réalise un suivi détaillé de ces travaux auxquels elle a consacré plusieurs auditions depuis le lancement du programme Babylone. Des exposés présentés lors de la dernière de ces auditions, la Commission retient les éléments ci-dessous.

Le CEA a repris l'exploitation des résultats expérimentaux de microcalorimétrie issus du précédent programme quadripartite, en améliorant le traitement du signal. Ce nouveau traitement permet d'éliminer les suspicions de réactivité à basse température dont la revue internationale avait mis en doute la signification physique. Il conforte l'estimation précédente du CEA selon laquelle il n'y a pas de réaction exothermique dans les déchets bitumés en-dessous de 150°C. La Commission prend acte de ce premier résultat encourageant vis-à-vis du stockage des colis en l'état.

Ces travaux doivent être complétés par différents types d'essais dont la préparation est en cours, parmi lesquels des essais de microcalorimétrie supplémentaires réalisés avec des compositions volontairement plus riches en sels favorisant la réaction exothermique.

Par ailleurs, des essais de comportement thermique sur des enrobés réels, c'est à dire sur des échantillons prélevés sur des enrobés bitumés de la Hague, ainsi que des essais sur des enrobés irradiés à une échelle représentative de la réalité sont également en préparation. La Commission accorde une très grande importance à ces travaux qu'elle juge indispensables pour conforter les résultats obtenus avec le plan d'expérience initial.

Le CEA a également défini une méthode permettant la détermination de courbes de réaction enveloppes qui pourront être utilisées dans les simulations destinées aux études de sûreté.

La Commission déplore que le quatrième volet du programme soit aujourd'hui complètement passé sous silence. Ce volet doit être consacré à l'étude de faisabilité d'un procédé de destruction des enrobés bitumés par dissolution chimique, qui serait particulièrement adapté dans le cas où un nombre limité de FEB ne pourraient pas être stockés en l'état dans Cigéo. Elle rappelle que cette étude est nécessaire quels que soient les résultats des trois premiers volets du programme. Elle est, du reste, prescrite par l'ASN, dans son avis n° 2020-AV-0369 du 1er décembre 2020.

La Commission demande que la situation des travaux sur la destruction des FEB lui soit systématiquement présentée lors des auditions consacrées à la gestion des déchets bitumés, qu'ils aient ou non produit des résultats.

Même si des premiers résultats encourageants ont été obtenus, la Commission observe un glissement du calendrier global du programme Babylone dont l'achèvement est aujourd'hui annoncé fin 2027.

La Commission recommande aux acteurs du programme Babylone de lui consacrer des moyens suffisants pour le mener à bien sans délai, même si le stockage des déchets bitumés n'est pas envisagé dans la première tranche du programme Cigéo.

Concernant l'agression mécanique de la paroi de l'alvéole consécutive au gonflement des bitumes par reprise d'eau (lente reprise d'eau par osmose après fermeture), les simulations présentées par l'Andra montrent que les critères de sûreté sont respectés : même dans les conditions les plus pénalisantes, l'endommagement de la roche est limité et ne compromet pas la garde saine du COx.

4.3 LES RECHERCHES EN COURS

Le dossier de DAC de Cigéo déposé début 2023 par l'Andra s'appuie sur un vaste corpus scientifique et technique acquis sur plus de 30 ans, par l'Andra, par des collaborations avec des organismes de recherche nationaux et internationaux, et en interaction avec des institutions homologues à l'étranger. Pour autant, la démarche de recherche de l'Andra ne s'est pas arrêtée avec le dépôt du dossier. Les actions en cours ont pour but de continuer l'acquisition de connaissances scientifiques afin d'affiner les marges du dimensionnement, de conforter certains choix technologiques pour la construction et de réduire les coûts.

4.3.1 Amélioration continue des connaissances

Dans une démarche d'amélioration continue des connaissances, conformément aux règles en vigueur visant à mettre en œuvre les meilleures techniques disponibles, l'Andra poursuit un programme de recherche autour de Cigéo. Des études sont entreprises actuellement par l'Andra

pour affiner des outils de modélisation numérique et améliorer la connaissance des données d'entrée.

L'Andra dispose de nombreux outils de modélisation numérique avec lesquels elle a réalisé le dimensionnement de l'INB Cigéo. La conception de ces outils repose par nature sur des compromis entre objectifs contradictoires : décrire le plus finement possible la physique des processus mais en utilisant un nombre raisonnable de paramètres, coupler au maximum les processus tout en maîtrisant le temps de calcul. Dans tous les cas, les choix d'hypothèses simplificatrices sont faits dans le sens de la sûreté, ce qui induit des marges de dimensionnement. Dans sa démarche d'amélioration continue, l'Andra poursuit ses travaux pour coupler plus finement les mécanismes. Cette démarche est illustrée par les deux exemples suivants.

Après exploitation, l'INB Cigéo est destinée à être scellée de manière à ce que les fonctions de sûreté isoler, confiner et retarder soient assurées de manière passive sur le long terme. L'Andra a choisi que les ouvrages de fermeture soient imperméables à la circulation de l'eau mais passants aux gaz. Ce choix de conception permet d'éliminer progressivement les gaz générés dans le stockage (essentiellement l'hydrogène issu de la radiolyse de l'eau et de la corrosion des aciers), afin de limiter les surpressions et ainsi de préserver les propriétés mécaniques et de transfert du CO₂. Jusqu'alors les processus thermiques, hydrauliques, chimiques et mécaniques impliqués dans le transitoire hydraulique-gaz étaient pris en compte de manière relativement découplée dans les modèles. De nouveaux développements ont abouti à une prise en compte totalement couplée des processus thermo-hydro-chemo-mécaniques, ce qui rend la résolution numérique plus précise. Ces travaux de recherche seront utilisés lors de la préparation et la réalisation de démonstrateurs de fermeture mis en place au cours de la Phipil.

Le chemisage métallique de l'alvéole HA a notamment pour fonction de préserver un jeu autour des colis pendant une durée *a minima* séculaire pour assurer la fonction de récupérabilité. Des expériences de vieillissement multi-échelle ont été menées sur des coques en acier non allié, en imposant un chargement mécanique externe en même temps qu'un endommagement progressif par corrosion généralisée. Les résultats ainsi obtenus ont alimenté la modélisation numérique couplée corrosion-déformation-rupture des composants du chemisage : l'évolution phénoménologique ainsi que le mode de ruine par flambement radial ont confirmé la capacité des coques en acier non allié à remplir la fonction visée.

4.3.2 Conforter des choix technologiques

Après plusieurs décennies de recherches sur la définition du revêtement, la réalisation des galeries et leur tenue, une galerie d'alvéole MA-VL de 9 m de diamètre (maquette à l'échelle $\frac{3}{4}$) ainsi qu'un croisement de galeries, ont été creusés dans le laboratoire souterrain. Ces galeries ont été instrumentées par des cordes vibrantes destinées à mesurer la déformation de l'ouvrage souterrain. Les données ont été utilisées pour mieux contraindre la modélisation numérique de l'évolution de la structure. Les essais successifs de creusement à différentes échelles n'ont pas montré de variation de comportement de la zone fracturée : il est observé que le coefficient de proportionnalité entre le diamètre creusé et la zone fracturée reste constant et la géométrie de la fracturation induite autour de l'ouvrage est conservée (en chevron pour les ouvrages orientés suivant la contrainte horizontale majeure, et en chevron et écaillage pour ceux orientés suivant la contrainte horizontale mineure). Ces travaux confortent la faisabilité du creusement des galeries de 12 m de diamètre prévu lors de la Phipil.

Les calcaires du Barrois sont la formation géologique sur laquelle reposent les installations de surface de l'INB Cigéo. Ces calcaires sont karstifiés et constituent un aquifère dont le niveau et les écoulements sont hétérogènes. Les modèles utilisés sont revisités : la nouvelle conceptualisation et la modélisation de la réponse hydrologique pluie/débit en surface et en subsurface visent à préciser la conception détaillée du dispositif de protection contre le risque d'inondation des installations et à conforter l'absence d'incidence environnementale, y compris dans le contexte du changement climatique global.

4.3.3 Intégrer des innovations techniques

Les contraintes mécaniques du massif rocheux tendent à déformer les galeries excavées. Depuis une dizaine d'années, l'Andra a choisi d'intégrer des matériaux compressibles entre le COx et les voussoirs en béton des ouvrages souterrains. Lors de la phase initiale de convergence rapide du COx, ces matériaux jouent un rôle de tampon grâce à leur compressibilité : ils limitent la sollicitation sur les galeries ouvragées et réduisent les déformations résiduelles. D'une part leur usage améliore la durabilité des matériaux cimentaires, d'autre part il permet de réduire l'épaisseur des voussoirs et la quantité de ferrailage.

Plusieurs matériaux sont à l'étude et un important programme d'essais multi-échelles est en cours. Une campagne expérimentale à l'échelle 1 vise à démontrer le fonctionnement à moyen et à long terme des anneaux de voussoirs et à développer les lois de comportement associées (Annexe 10). En complément, différents matériaux compressibles ont été mis en œuvre dans le laboratoire souterrain pour éprouver la faisabilité technique de leur intégration. L'instrumentation des ouvrages souterrains permet de suivre leur comportement hydro-mécanique et les interactions roche/structure. L'ensemble de ces données consolide les résultats de modélisation numérique multi-physique en support au dimensionnement.

4.3.4 Poursuivre des études prospectives

L'Andra pilote également des études prospectives qui pourraient à long terme conduire à des innovations de rupture, lesquelles pourraient être utilisées au titre de la progressivité de la conception.

Des études évaluent la possibilité de remplacement des conteneurs de stockage et des chemisages métalliques des déchets HA par des céramiques monolithes ou composites. Les matériaux céramiques ont une très bonne résistance à la lixiviation par les eaux du site. Par ailleurs, si on réduisait la quantité d'acier dans le stockage, la production d'hydrogène post-fermeture serait réduite. Toutefois l'intérêt de ces matériaux pour une application dans Cigéo est incertain, car des verrous scientifiques majeurs restent à lever : procédé de fabrication, assemblage et soudure des deux parties d'un conteneur, résistance mécanique au chargement, comportement à long terme et vérification de la récupérabilité.

Par ailleurs, l'Andra mène une veille sur l'instrumentation et la surveillance. Parmi les solutions pour le contrôle des colis à leur arrivée, la Commission note un intérêt particulier pour des méthodes de tomographie transportable ou caméra gamma. Pour le suivi des ouvrages souterrains, de nouveaux capteurs sont développés pour la surveillance (corrosion et production d'hydrogène). Cela intègre des développements sur l'alimentation autonome, la durabilité des fibres optiques, la transmission de données via un signal acoustique.

La simulation du comportement du stockage passe par des outils de modélisation numérique multi-physique de processus couplés thermo-hydro-mécano-chimiques complexes et consommateurs de temps de calcul. De nouvelles méthodes reposant sur l'intelligence artificielle (IA) sont une piste pour diminuer les temps de calcul. Des modèles fondés sur l'IA peuvent être construits en utilisant comme base d'apprentissage les résultats de calcul des outils numériques traditionnels, qui décrivent soigneusement les processus par un ensemble d'équations complexes. Des travaux exploratoires ont été initiés ; les premiers résultats sont encourageants. La Commission suivra avec intérêt l'avancée de ces recherches.

La Commission soutient les actions de recherche conduites en parallèle du projet Cigéo. Elle considère indispensable qu'une activité de R&D significative soit conduite afin d'identifier et d'accompagner des innovations tout au long de cette période, et de maintenir une compétence scientifique et technique sur le long terme dans tous les domaines d'intérêt pour Cigéo.

La Commission souligne qu'une réelle capacité de R&D dans la durée, avec les outils associés, contribue à la crédibilité de l'exploitant.

CHAPITRE V : LE STOCKAGE GEOLOGIQUE, SOLUTION INTERNATIONALE DE REFERENCE

5.1 INTRODUCTION

Le stockage géologique des déchets est la solution de référence pour tous les pays réfléchissant à un exutoire pour leurs déchets de plus haute activité. Une vue d'ensemble de la gestion des déchets nucléaires au niveau international permet de distinguer quatre grandes catégories de pays :

- les pays qui ont choisi le stockage géologique pour la gestion des combustibles usés et en ont autorisé la construction ;
- les pays qui ont choisi le stockage géologique pour la gestion des déchets de haute et moyenne activité à vie longue ainsi que pour les combustibles usés et mènent actuellement un processus de choix de site ;
- les pays qui ont choisi le stockage géologique pour la gestion des déchets de haute et moyenne activité à vie longue et des combustibles usés mais doivent encore définir le processus de choix de site ;
- les pays en situation d'attente ou de blocage.

5.2 LES PAYS OU LE STOCKAGE GEOLOGIQUE EST AUTORISE

49

5.2.1 Finlande

En 2015, le gouvernement a accordé à Posiva le permis de construire pour l'installation de stockage et l'usine d'encapsulation de combustible usé associée. En 2016, STUK a autorisé Posiva à commencer la construction de l'installation de stockage géologique ; celle-ci a commencé en décembre 2016. La construction de l'usine d'encapsulation a débuté en 2019. Une étape importante a été franchie en 2021 avec la soumission au gouvernement de la demande d'autorisation d'exploitation de l'usine d'encapsulation et de l'installation de stockage définitif, ainsi que du dossier de l'analyse de sûreté pour la demande d'autorisation d'exploitation.

Les travaux d'excavation souterraine de la première phase du stockage final, commencés en décembre 2016 comme première phase de la construction nucléaire, ont été achevés et l'installation remise à Posiva. Les installations auxiliaires sont en cours de montage. La construction de la station de réception des conteneurs est terminée ; l'installation de l'élévateur à conteneurs a commencé.

Les équipements de l'installation d'encapsulation sont en phase d'installation, d'essai et de mise en service, l'accent étant mis sur la mise en service. Les seuls systèmes de l'installation d'encapsulation qui sont encore en phase de fabrication sont le chariot de transfert du château de transport de combustible et le manipulateur de combustible usé qui déplace les assemblages de combustible du château de transport vers la station de séchage et le conteneur de stockage. Les principaux systèmes qui ont été installés comprennent la station de soudure du couvercle en cuivre, le chariot de transfert et l'élévateur de couvercles. La salle de contrôle a été mise en service et la soudure des couvercles a été testée.

Les travaux de développement et de conception se sont concentrés sur l'industrialisation et l'optimisation de la barrière ouvragée, de sa fabrication et de son inspection, ainsi que sur la qualification du système de barrière ouvragée. Un essai *in situ* grandeur nature a été mis en œuvre

dans Onkalo pour recueillir des données sur les performances de la phase initiale du système de stockage.

Le processus de qualification des alvéoles de stockage a commencé. Le système d'installation de remblai granulaire a été testé avec le véhicule de guidage automatisé. La fabrication du véhicule de transfert et d'installation des conteneurs de stockage et du système de transfert et d'installation des tampons est en cours.

Posiva a poursuivi le recrutement et la formation du personnel pour la phase d'exploitation et les préparatifs en vue de commencer un essai de mise en stockage. La plupart des composants de la barrière ouvragée nécessaires pour l'essai ont été fabriqués et les machines qui se trouvent sur site ont été testées en vue de cet essai.

L'agencement de l'ensemble de l'installation de stockage a été mise à jour à l'aide des données d'entrée les plus récentes, y compris les résultats des études finalisées sur la conductivité thermique de la roche. L'élaboration des manuels, des guides et des programmes d'entretien des systèmes s'est poursuivie.

5.2.2 Suède

En février 2024, l'autorité de sûreté, SSM, a approuvé le rapport d'analyse de sûreté mis à jour par SKB en vue de l'augmentation de la capacité d'entreposage intérimaire du combustible nucléaire irradié, et a autorisé l'exploitation en phase d'essai avec capacité augmentée.

Gestion du combustible usé

Le 27 janvier 2022, le gouvernement a délivré l'autorisation en vertu de la loi sur les activités nucléaires et l'autorisation en vertu du Code de l'environnement pour le stockage définitif de combustible nucléaire irradié à Forsmark et pour l'usine d'encapsulation à Oskarshamn. Une audience devant le tribunal foncier et environnemental aura lieu en mai 2024 concernant les conditions d'exécution des activités futures. L'autorisation suit un processus par étapes conformément aux dispositions de la loi sur les activités nucléaires : permis de construction, puis autorisation de passer en phase d'essai et enfin permis d'exploitation en routine. SKB a mis à jour le rapport d'analyse de sûreté post-fermeture en mars 2023 et le rapport préliminaire d'analyse de sûreté de toutes les phases de stockage devrait être soumis à la fin de 2024 à SSM pour examen et approbation.

5.3 LES PAYS OU LE PROCESSUS DE CHOIX D'UN SITE POUR LE STOCKAGE GÉOLOGIQUE EST EN COURS D'INSTRUCTION

5.3.1 Canada

Alors que le Canada envisage d'accroître la production d'énergie nucléaire dans le cadre de ses plans d'action sur le changement climatique, les Canadiens et les peuples autochtones veulent être assurés que le plan de gestion sûre et à long terme du combustible nucléaire irradié est en bonne voie.

La Société de Gestion des Déchets Nucléaires (SGDN) a été fondée en 2002 en tant qu'organisme sans but lucratif chargé de la gestion sûre et à long terme des déchets radioactifs de moyenne et de haute activité du Canada. La SGDN est toujours sur la bonne voie pour choisir un site pour un stockage géologique en profondeur des combustibles usés à la fin 2024. La SGDN continue ses travaux visant à faire progresser la planification d'un stockage pour les déchets de moyenne activité et les déchets de haute activité autres que les combustibles usés.

Depuis plus d'une décennie, les collectivités participent à un vaste processus de sélection d'un site pour un stockage géologique en profondeur, afin de confiner et d'isoler en toute sûreté le combustible nucléaire irradié du Canada. À la suite d'un processus par étapes visant à faire un tri parmi l'ensemble des 22 collectivités qui avaient initialement manifesté leur intérêt à participer, il reste deux sites potentiels : la région de la Nation Ojibway de Saugeen-South Bruce, dans le sud de l'Ontario, et la région de la Nation Ojibway de Wabigoon Lake-Ignace, dans le nord-ouest de l'Ontario. Les premiers travaux techniques, y compris des forages, ont été achevés dans chacune des zones d'implantation potentielles. La SGDN a récemment publié une mise à jour de ses rapports de confiance dans la sûreté. Ces rapports s'appuient sur les précédents rapports de confiance dans la sûreté de 2022 et confortent la conclusion selon laquelle la SGDN est convaincue qu'un stockage géologique peut être construit sur l'un ou l'autre des sites.

Tout en poursuivant ses travaux visant à établir un stockage pour le combustible nucléaire irradié du Canada, la SGDN évalue également l'incidence des projets de petits réacteurs modulaires (SMR) et d'autres nouveaux projets nucléaires sur ses activités et sa planification. Les deux sites envisagés pour le stockage de combustible nucléaire irradié ont la capacité d'être étendus, et la SGDN est convaincue que l'un ou l'autre pourrait abriter le combustible irradié qui résultera des récentes annonces de nouveaux projets nucléaires.

Cependant, au cas où le Canada aurait besoin d'une capacité supplémentaire à l'avenir, la SGDN explore la possibilité d'inclure tout combustible irradié provenant de SMR ou d'autres nouveaux projets nucléaires dans le même stockage que celui qui sera utilisé pour gérer les déchets de moyenne activité et les déchets de haute activité autres que les combustibles usés.

Les quatre communautés (deux communautés autochtones et deux municipalités) qui font toujours partie du processus de sélection d'un site ont établi leurs propres processus pour déterminer si elles sont une « communauté d'accueil consentante ». Avant de prendre leur décision, les collectivités travaillent avec la SGDN à l'établissement d'un accord d'hébergement (*hosting agreement*) qui décrit les avantages pour la collectivité et les engagements de la SGDN tout au long des différentes étapes du projet. Le travail se poursuivra avec chacune des communautés tout au long de 2024, en veillant à ce que le projet et l'accord d'hébergement soient bien compris.

Le 8 mars 2024, le canton d'Ignace a adopté une résolution approuvant la signature d'un accord d'hébergement avec la SGDN pour un site de stockage géologique sur le territoire de la Wabigoon Lake Ojibway Nation.

Lorsqu'un site aura été choisi, la SGDN entamera le processus décisionnel en matière de réglementation avec l'Agence d'évaluation d'impact du Canada et la Commission canadienne de réglementation nucléaire. La SGDN envisage le début de la construction vers 2033 et de l'exploitation vers 2043.

5.3.2 Suisse

Après les difficultés éprouvées par la Nagra (l'organisme suisse responsable de la gestion des déchets radioactifs) dans le processus de sélection de site pour le stockage des déchets de faible et moyenne activité, le gouvernement et le parlement suisses ont décidé de confier le processus de sélection de site au gouvernement, sur base de la législation sur l'aménagement du territoire. En 2005, le plan sectoriel a été introduit dans la législation suisse sur l'énergie nucléaire en tant que processus de sélection des sites. Cette législation exige la définition d'un concept pour le processus de sélection d'un site définissant les rôles et les responsabilités des différents acteurs et les critères à utiliser dans le processus organisé en trois phases. Le concept exige de partir d'une « carte blanche » de la Suisse (rien n'étant exclu *a priori*) et de donner « la priorité à la sûreté ». Le processus demande d'identifier les options disponibles dans une première phase, puis d'évaluer les options en resserrant leur nombre dans une deuxième phase et le choix de l'option à mettre en œuvre dans la troisième phase.

Le développement du concept a commencé en 2006 avec la participation d'un large éventail de parties prenantes et a été publié en 2008 par le gouvernement suisse. Comme son programme scientifique avait démarré dès les années quatre-vingt, la Nagra disposait d'une base scientifique solide qui lui a permis de soumettre des propositions d'implantation à la fin de l'année 2008 – trois régions d'implantation pour le stockage de déchets de haute activité et six régions d'implantation pour le stockage de déchets de faible et moyenne activité. Ces propositions ont été acceptées par le gouvernement suisse après une période d'examen et de consultation en 2011.

En 2014, la Nagra a présenté ses propositions de réduction des options en tenant compte des résultats de certains travaux de terrain supplémentaires (sismique 3D dans les trois régions d'implantation). Au cours de cette phase, les zones d'implantation des installations de surface ont également été fixées en concertation avec les citoyens dans le cadre de « conférences régionales ». Après examen et une longue période de consultation, le gouvernement suisse a décidé en 2018 que trois régions d'implantation devraient faire l'objet d'études détaillées pour décider des sites définitifs.

Au cours des années suivantes, neuf forages ont été réalisés, une série d'études géologiques et de conception ont été réalisées, et une évaluation globale a été effectuée qui a conduit la Nagra à choisir la région d'implantation « Nördlich Lägern » comme site pour un « stockage combiné », c'est-à-dire permettant le stockage de tous les déchets radioactifs dans la même installation de stockage, dans des emplacements séparés selon les catégories de déchets. En outre, il a été décidé de construire les installations d'encapsulation du combustible usé et des déchets vitrifiés ainsi que les installations de conditionnement des déchets de faibles et moyennes activités entreposés provisoirement à Würenlingen. Cette décision a été annoncée en septembre 2022 en vue de la préparation des demandes d'autorisation générales (autorisation d'implantation et « décision de principe ») qui seront soumises au gouvernement fin 2024.

Actuellement, la préparation de la documentation scientifique et technique pour la demande d'autorisation générale est en cours, ce qui nécessite également une certaine interaction avec la région d'implantation afin d'assurer une intégration optimale du projet. Après le dépôt de la demande d'autorisation générale, l'examen des autorités de sûreté nucléaire et d'autres organismes publics (aménagement du territoire, protection de l'environnement, etc) durera jusqu'en 2028 environ, puis une phase de large consultation s'en suivra avec une décision du gouvernement suisse vers 2029. Cette décision doit être ratifiée par le parlement et peut faire l'objet d'un référendum national. Sous réserve que l'autorisation générale soit accordée, le permis de construire pour la mise en stockage sera préparé et les installations correspondantes seront construites pour effectuer des travaux expérimentaux qui mèneront ensuite à l'obtention du permis de construction nucléaire. L'exploitation de la partie dédiée aux déchets de faible et moyenne activité du stockage pourrait commencer en 2050, l'exploitation de la partie dédiée aux déchets de haute activité en 2060. La mise en place des déchets devrait être terminée en 2075, puis la surveillance *in situ* se poursuivra avec une fermeture prévue vers 2125.

5.4 LES PAYS OU LE PROCESSUS DE CHOIX DE SITE DOIT ENCORE ETRE DETERMINE

5.4.1 Belgique

La Belgique a une histoire nucléaire longue et très diversifiée qui remonte à 1930 pour la production de radium et aux années 1950 pour la recherche nucléaire et la production d'énergie. La plupart des infrastructures du cycle du combustible sont présentes sur le territoire national (usine pilote de retraitement, usines de fabrication de MOX et d'UOX, installations de traitement et de conditionnement, installations de stockage...).

La R&D liée au stockage géologique des déchets de haute activité a commencé en 1974 en mettant l'accent sur les argiles peu indurées en tant que roche hôte potentielle. Un laboratoire souterrain a été construit dans les années 1980 (laboratoire d'études nucléaires souterrain HADES situé dans

la commune de Mol, province d'Anvers) ; il a permis de recueillir des informations clés concernant à la fois la sûreté à long terme et les aspects de faisabilité.

Le programme belge manquait cependant d'une politique formelle de gestion à long terme pour les déchets de haute et moyenne activité à vie longue ainsi que pour les combustibles usés. En octobre 2022, un arrêté royal a établi, dans une première phase, le stockage géologique sur le territoire belge, sur un ou plusieurs sites en tant que politique nationale, sans aucune mention de roche-hôte ou de site.

La mise en œuvre de cette politique se fera selon un processus de choix de site dont les lignes de force résultent d'un exercice participatif à l'échelle nationale, mené sous les auspices d'une fondation indépendante. Parmi ses principaux résultats, on peut citer :

- la confirmation du stockage géologique comme solution pour la gestion à long terme des déchets de moyenne et haute activité à vie longue et les combustibles usés ;
- la nécessité de maintenir l'élan décisionnel ;
- la nécessité de faire la distinction entre les déchets ultimes (déchets de moyenne activité à vie longue, déchets vitrifiés) et les matières potentiellement valorisables (combustible usé) ;
- l'importance d'évaluer les différents scénarios possibles pour le stockage (un ou plusieurs sites, domestiques et/ou multinationaux...) ;
- la nécessité d'établir un « gardien » indépendant pour surveiller la qualité du processus de sélection d'un site.

Une seconde phase de la politique nationale devrait être proposée au gouvernement en 2025.

5.5 PAYS EN SITUATION D'ATTENTE OU DE BLOCAGE

5.5.1 Espagne

Le processus de démantèlement des centrales nucléaires en Espagne n'a pas été révisé et la fermeture des dernières unités commencera en 2027 et se terminera en 2035.

Le plan de gestion des déchets en vigueur de 2006 à 2023 précisait que la seule solution définitive pour les déchets de haute activité provenant de toutes les centrales déjà fermées ou encore en activité jusqu'en 2035 serait un stockage en couches géologiques profondes, qui devrait être construit dans un délai de 70 ans. La construction d'une installation d'entreposage temporaire centralisée était prévue pour couvrir la phase d'attente. L'emplacement de cette installation d'entreposage centralisé et le projet de construction détaillé ont été déterminés.

Cependant, le 23 décembre 2023, le Conseil des ministres a approuvé un nouveau plan général de gestion des déchets radioactifs (publié au Journal officiel le 8 janvier 2024) qui a changé la donne. D'une part, il confirme le calendrier de fermeture des centrales encore en activité. D'autre part, le projet d'installation centralisée de stockage temporaire a été abandonné et remplacé par 7 installations individuelles de stockage temporaire sur les sites des centrales nucléaires actuelles. Enfin, la solution finale d'un stockage en couches géologiques profondes, qui devait être opérationnel dans les années 2070, a été confirmée. La première des installations d'entreposage temporaire individualisé a été mise en service à la centrale nucléaire de Garoña, actuellement en cours de démantèlement, par transfert des 2 premiers conteneurs de combustible irradié. Les 6 autres installations d'entreposage temporaire individualisées seront mises en place dans un avenir proche.

5.5.2 Grande-Bretagne

Au Royaume Uni, la *Nuclear Decommissioning Authority* (NDA) est l'organisme gouvernemental chargé de mettre en œuvre la politique de gestion des déchets radioactifs de haute activité et d'élaborer une stratégie de gestion des déchets de faible activité. L'inventaire des déchets radioactifs du Royaume-Uni identifie 4 560 000 m³ de déchets radioactifs.

Le *Nuclear Waste Services* (NWS) a été créée en 2022 par la fusion du *Low Level Waste Repository* (LLWR), qui est l'exploitant du stockage de déchets de faible activité existant, et de *Radioactive Waste Management Limited*, qui est le développeur d'une installation de stockage géologique pour les déchets de haute activité.

En janvier 2018, un processus de sélection d'un site a été lancé pour le stockage géologique. Il s'adresse aux communautés intéressées par le dialogue en vue de la formation de partenariats pour la planification et la sélection d'un site. Au total, quatre partenariats ont été formés depuis 2021 avec des communautés en Cumbria et dans le Lincolnshire.

Le NWS étudie les données existantes dans ces collectivités et évalue six facteurs d'implantation : la sûreté et la sécurité, la collectivité, l'environnement, la faisabilité technique, le transport et l'optimisation des ressources. En septembre 2023, le NWS a annoncé l'abandon d'un des sites en Cumbria, après avoir évalué qu'il n'y avait pas suffisamment de substrat rocheux approprié disponible pour accueillir un stockage. Le dialogue se poursuit avec les parties restantes et le NWS prépare des études de site près du rivage et sous la mer.

5.5.3 Etats-Unis

54

Il y a eu peu de progrès aux États-Unis concernant la gestion du combustible usé des centrales, commerciales et militaires et de leurs déchets radioactifs de haute activité. La gestion des déchets est dans une situation de blocage institutionnel. En effet, la loi sur la politique en matière de déchets nucléaires dispose que la solution de gestion définitive est un stockage géologique à Yucca Mountain et exclut tout site d'entreposage intérimaire exploité par le DOE. Mais le site de Yucca Mountain a été refusé par la justice et le programme de gestion des déchets du DOE n'est toujours pas financé ; en outre, il n'y a aucun progrès en ce qui concerne la gestion des combustibles usés ou des déchets de haute activité ou toute initiative visant à réviser la loi.

Au 1er janvier 2024, plus de 179 000 assemblages de combustible usé étaient entreposés à sec dans plus de 4 100 conteneurs. La construction des deux installations d'entreposage intérimaire autorisées par la NRC a été empêchée par des procédures judiciaires.

Dans l'attente d'un déblocage, le Congrès a financé le DOE pour qu'il aille de l'avant pour identifier un site pour une installation fédérale d'entreposage intérimaire et pour utiliser une approche basée sur le consentement lors de la réalisation de ces activités. Le DOE a terminé les évaluations de l'infrastructure du site et de l'infrastructure de transport à proximité du site de la centrale pour le retrait des combustibles usés de 19 sites de centrales nucléaires et d'une installation de stockage en piscine. Le DOE continue de soutenir une démonstration à grande échelle de l'entreposage pendant 10 ans de combustible à haut taux de combustion et a commencé à en planifier le transport, en 2027, vers une installation qui récupérera et examinera les combustibles entreposés.

Le DOE poursuit ses activités de recherche et de développement sur le stockage (par exemple, les effets de la corrosion atmosphérique sur les soudures de stockage) et le transport (par exemple, la détermination des profils de contrainte ou des fûts de carburant et de transport). La recherche et le développement du DOE sur la gestion des déchets se poursuivent pour déterminer la faisabilité du stockage direct des conteneurs de combustible usé existants à usage unique (stockage uniquement) et à double usage (stockage et transport) dans un stockage géologique. Ces travaux ont consolidé la compréhension de la performance à long terme des systèmes de stockage dans trois principaux types de roches géologiques : argile/schiste, sel et roche cristalline.

Par ailleurs, le département de l'énergie des États-Unis (DOE) continue à financer le développement des réacteurs avancés (par exemple, X-Energy, TerraPower, Kairos Power, eVinci) et a demandé à tous les développeurs de réacteurs avancés des données sur le combustible et les combustibles usés ainsi que les déchets de haute activité attendus pour permettre au DOE de préparer la gestion de l'aval du cycle du combustible si ces réacteurs venaient à être autorisés et exploités.

GLOSSAIRE

AC : assemblage de combustibles.

ACU : assemblage de combustibles usés.

ADS : *accelaror driven system*, ou réacteur nucléaire piloté par un accélérateur en français, encore appelé système hybride (couplant un accélérateur de particules à un réacteur sous-critique).

AFCN : agence fédérale de contrôle nucléaire de Belgique.

AIEA : agence internationale de l'énergie atomique.

AM : actinides mineurs.

Am : americium.

AMR : *advanced modular reactor*, réacteur modulaire avancé.

Andra : agence nationale de gestion des déchets radioactifs.

AP1300 : programme d'augmentation de puissance des réacteurs de 1300 MWe du parc (palier N4).

APNI : agence de programme nucléaire innovant (créée au sein du CEA).

ASN : autorité de sûreté nucléaire.

ATF : *accident tolerant fuel* (combustible nucléaire plus robuste aux accidents graves).

CEA : commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives.

Cigéo : projet de stockage géologique de déchets de haute et moyenne activité à vie longue (HA et MAVL) .

CLIS : commission locale d'information et de suivi du laboratoire de Bure.

CNDP : Commission nationale de débat public.

CNE : commission nationale d'évaluation.

CNRS : centre national de la recherche scientifique.

COx : argilites du Callovo-Oxfordien (roches argileuses fortement compactées et à très faible perméabilité).

CPN : conseil de politique nucléaire (conseil des ministres restreint chargé d'élaborer les grands axes stratégiques de la filière nucléaire française).

CU : combustible usé.

CU MOX : combustible mixte d'oxyde d'uranium et de plutonium usé.

CU UOX : combustible d'oxyde d'uranium usé.

DAC : demande d'autorisation de création.

DGEC : direction générale de l'énergie et du climat du ministère de la transition écologique.

DGRI : direction générale de la recherche et de l'innovation.

DOE : ministère américain de l'énergie (*Department of Energy* en anglais).

DUP : déclaration d'utilité publique.

EBS : *engineering building solution* / barrière ouvragée.

EDF : électricité de France.

EI Cabril : installation d'élimination des déchets de faible activité et de déchets de faible activité, située dans la municipalité de Hornachuelos (Córdoba).

ENRESA : entreprise nationale chargée de gérer les déchets radioactifs en Espagne.

EPR : réacteur à eau pressurisée de 3^{ème} génération de 1650 MWe (« european pressurized reactor » en anglais).

EPR2 : Evolutionary Power Reactor 2, aussi initialement appelé EPR-NM (« Nouveau Modèle »), est un projet de réacteur nucléaire à eau pressurisée de génération III+.

FAVL : déchets de faible activité à vie longue.

Framatome : chaudiériste nucléaire, fournisseur d'équipements, de services et de combustible pour des niveaux de sûreté et de performance élevés.

GBII : usine d'enrichissement Georges Besse 2.

GIFEN : groupement des industriels français de l'énergie nucléaire.

GWe : gigawatt électrique.

HADES : laboratoire souterrain sur le site du SCK.CEN à Mol (Belgique) dédié au stockage géologique des déchets de longue durée de vie et/ou de haute activité.

HA-MAVL : déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue.

HAVL : déchets de haute activité à vie longue.

HALEU : *High-Assay Low-Enriched Uranium* (combustible entre 5 et 20 % en ²³⁵U).

INB : installation nucléaire de base.

IN2P3 : institut national de physique nucléaire et de physique des particules dépendant du CNRS.

IRSN : institut de radioprotection et de sûreté nucléaire.

ITER : projet international dédié à la recherche sur les réacteurs à fusion contrôlée dans un tokamak.

LIL-LL : *Low and Intermediate Level waste – Long Lived*.

LIL-SL : *Low and Intermediate Level waste – Short Lived*.

MAVL : déchets de moyenne activité à vie longue.

Md€ : milliard d'euros.

MIMAS (*micronized masterblend*) : procédé (comportant 7 étapes) utilisé en France dans l'usine Melox pour la fabrication du combustible MOX destiné aux REP. Ce procédé est plus adapté aux besoins industriels mais conduit à un mélange de poudres UO₂ et PuO₂ moins homogène que le procédé COCA (Cobroyage Cadarache, mis en œuvre dans le passé au CFCa à Cadarache).

MIX : il s'agit d'un assemblage contenant 8 % de plutonium sur un support UO₂ enrichi (< 5 %). L'enrichissement de l'uranium est adapté à la dégradation de la qualité fissile du plutonium (jusqu'à 49,5 %), ce qui permet d'envisager une solution considérée aujourd'hui comme techniquement pérenne.

Melox : usine qui fabrique des assemblages de combustibles à base de plutonium - le combustible MOX - utilisés dans les réacteurs à eau sous pression (REP) et à eau bouillante (REB) – Filiale d'Orano Recyclage.

Melox 2 : nouvelle usine de fabrication de combustible MOX envisagée pour remplacer Melox.

MOX : combustible composé d'un mélange d'oxydes (« mixed oxides » en anglais, UO₂ et PuO₂).

MOX2 : combustible MOX contenant du Pu issu du traitement d'assemblages MOX usés (deuxième recyclage du Pu en REP).

MOX MR : le MOX destiné au multirecyclage en REP ; c'est un assemblage similaire au MOX actuel (PuO₂ sur support UO₂ appauvri et trizonage), à la différence de la moindre qualité fissile du plutonium (52,5 % à 55 %).

MOX RNR : MOX conçu spécifiquement pour les RNR.

MRREP : multi-recyclage de plutonium en REP (réacteur à eau pressurisée).

MSR : réacteur à sel fondu (*molten salt reactor* en anglais).

MUTS : million d'unités de travail de séparation.

MWe : mégawatt électrique.

MWth : mégawatt thermique.

Nagra : organisme suisse responsable de la gestion des déchets radioactifs.

Nuward : projet porté par EDF de réacteur SMR (340 MWe) basé sur la technologie REP.

NDA : *nuclear decommissioning authority* – organisme gouvernemental du Royaume-Uni chargé de mettre en œuvre la politique gouvernementale sur les déchets radioactifs de haute activité et d'élaborer une stratégie de gestion des déchets de faible activité.

NRC : *Nuclear Regulatory Commission*, autorité de sûreté nucléaire américaine.

NWMO : *Nuclear Waste Management Organization*, organisme chargé de la gestion des déchets radioactifs au Canada.

NWS : *Nuclear Waste Services* – organisme chargé de la gestion des déchets radioactifs en Grande-Bretagne.

OCDE : Organisation de coopération et de développement économiques.

ONDRAF/NIRAS : organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies, organisme national chargé de la gestion des déchets radioactifs en Belgique.

OPECST : office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et techniques.

Orano : multinationale française spécialisée dans les métiers du combustible nucléaire, de l'amont à l'aval du cycle (anciennement Areva).

Phipil : phase industrielle pilote de Cigéo.

PNGMDR : plan national de gestion des matières et déchets radioactifs.

PME : petite et moyenne entreprise.

PPE : planification pluriannuelle de l'énergie.

Purex : *plutonium uranium refining by extraction*, procédé industriel de traitement des combustibles usés permettant d'extraire et de recycler l'uranium et le plutonium.

R&D : recherche et développement.

REP : réacteur à eau pressurisée.

REX : retour d'expérience.

RJH : réacteur Jules Horowitz.

RNR : réacteur à neutrons rapides.

RNR Na : réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium.

SCK-CEN : centre de recherche de Mol en Belgique.

SFL : *Final repository for long-lived waste in Sweden*.

SFR : *short-lived radioactive waste in Forsmark*.

SGDN : société de gestion des déchets nucléaires, organisme chargé de la gestion à long terme des déchets radioactifs de moyenne et de haute activité du Canada.

SKB : entreprise suédoise de gestion des déchets radioactifs.

SMR : *small modular reactor*, petit réacteur modulaire.

SSM : *Swedish radiation Safety Authority*, autorité de sûreté suédoise.

STUK : autorité du sûreté et radioprotection.

TBP : tributyl-phosphate, ou phosphate tributylque, solvant organique permettant l'extraction sélective de l'uranium et du plutonium.

TFA : déchets de très faible activité.

tML/an : tonne de métal lourd par an.

TRL : *technology readiness level*, échelle maturité technologique d'un projet ou d'un système.

Triso : combustible nucléaire (*Tri-Structural Isotropic*) est un type de combustible avancé composé de minuscules particules d'uranium enfermées dans des couches protectrices en carbure de silicium et en nitrure de bore, qui servent de première barrière de confinement pour retenir les produits de fission. Utilisé principalement dans les réacteurs à haute température (HTR), ce combustible présente des avantages significatifs en termes de sûreté et de performance.

Uapp : uranium appauvri.

Unat : uranium naturel.

UNE : uranium naturel enrichi.

UF₆ : hexafluorure d'uranium (UF₆) est un composé inorganique utilisé dans le procédé d'enrichissement de l'uranium.

UO₂ : di-oxyde d'uranium.

UOX : oxyde d'uranium.

UNGG : filière de réacteur à uranium naturel (pour le combustible) graphite (pour le modérateur) gaz (pour le caloporteur).

URE : uranium de retraitement enrichi.

URENCO : entreprise anglo-germano-néerlandaise spécialisée dans l'enrichissement de l'uranium, chargée de l'enrichissement de l'uranium et des produits liés au cycle du combustible nucléaire pour l'industrie nucléaire civile.

URSS : union des républiques socialistes soviétiques.

URT : uranium de retraitement.

UTS : unités de travail de séparation.

VD4 : 4ème visite décennale.

WNA : *World Nuclear Association*.

ANNEXE I : COMPOSITION DE LA COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION

Vincent LAGNEAU – président de la Commission nationale d'évaluation – professeur d'hydrogéologie et géochimie, directeur du Centre de Géosciences à l'École des Mines de Paris.

Michel DUBOIS – sociologue, Directeur du GEMASS, Sorbonne Université.

Christophe FOURNIER – vice-président de la Commission nationale d'évaluation - ingénieur général hors classe de l'armement (2S).

Philippe GAILLOCHET – directeur de service – Assemblée nationale (1977 – 2015).

Jean-Paul GLATZ – ingénieur en chimie nucléaire, ancien directeur de ITU-JRC, Karlsruhe.

Saida LAÂROUCHI-ENGSTRÖM – vice-présidente de la Commission nationale d'évaluation - ingénieur – conseillère en charge du développement du parc électronucléaire et de la stratégie en matière d'innovation – Vattenfall – Suède.

Virginie MARRY – professeur des universités, Sorbonne université.

José Luis MARTINEZ – directeur de recherche au CSIC (institut de science de matériaux, Madrid, Espagne).

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

Catherine NOIRIEL – professeur assistant, Géosciences & Environnement, Université Paul Sabatier, Toulouse.

Céline PERLOT-BASCOULES – professeur, Sciences des matériaux, Université de Pau et des Pays de l'Adour.

Aude POMMERET – professeur en sciences économiques à l'Université Savoie Mont Blanc.

Conseillers de la CNE :

Jean-Claude DUPLESSY – président honoraire de la Commission nationale d'évaluation – ancien président de la Commission nationale d'évaluation – membre de l'Académie des sciences – directeur de recherche émérite au CNRS.

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.

Maurice LEROY – expert invité 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.

ANNEXE II : ACTIVITE DE LA COMMISSION

Le rapport n°17 a été présenté :

- à l' OPECST le 26 octobre 2023 ;
- au Comité local d'information et de suivi (CLIS) du laboratoire de Bure le 6 novembre 2023 ;
- au collège de l'ASN le 5 décembre 2023.

La Commission a procédé à (cf. annexe 3) :

- 7 auditions plénières, dont 3 auditions à préparation renforcée ;
- 15 auditions restreintes dont 5 consacrées à des projets de réacteurs innovants portés par des start-up lauréats de l'appel à projets France 2030 ;
- 4 ateliers thématiques organisés sur 2 jours avec Andra afin d'éclairer la CNE sur le contenu du dossier de DAC du projet Cigéo ;

On trouvera en Annexe 4 la liste des personnes auditionnées par la CNE représentant les différents opérateurs de la filière nucléaire. Ces auditions rassemblaient en moyenne une soixantaine de personnes, notamment des représentants des principaux acteurs de la loi (CEA et Andra), mais également du CNRS, de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et de son appui technique (IRSN), des industriels principalement concernés détenteurs de matières ou producteurs de déchets (Orano, Framatome, EDF, SOLVAY) ainsi que de l'administration centrale (DGEC et DGRI).

La Commission s'est déplacée à 4 reprises pour des visites techniques :

- Visite du laboratoire souterrain de Bure le 07 novembre 2023 ;
- Visite du MAI du site EDF des Renardières à Moret-sur-Loing le 25 janvier 2024 ;
- Visite du RJH à Cadarache le 29 mars 2024 ;
- Visite de l'établissement de contrôle de Cherbourg (ETAC) le 12 juin 2024.

La liste des documents pris en compte pour ce rapport (arrêtée au 15 avril) est donnée en annexe 5.

ANNEXE III : AUDITIONS REALISEES PAR LA COMMISSION

AUDITIONS PLÉNIÈRES :

(7 auditions)

11 octobre 2023 :	Andra – Travaux de R&D en cours sur Cigéo.
08 novembre 2023 :	Orano (en lien avec le CEA, EDF et Solvay) – thème : valorisation des matières.
09 novembre 2023 – après-midi :	CEA (audition à préparation renforcée) – thème : combustibles et recyclage.
13 décembre 2023 :	CEA (audition à préparation renforcée en lien avec Orano, EDF et Framatome) – thème : multi-recyclage en REP (MRREP).
14 décembre 2023 – matin :	EDF – thème : gestion des combustibles usés.
08 février 2024 :	Orano (audition à préparation renforcée en lien avec EDF et Framatome) – thème : Disponibilité des matières et des combustibles pour le parc futur.
13 mars 2024 :	CEA – avancement du plan d’actions sur les déchets bitumés & point sur les programmes d’assainissement-démantèlement.

AUDITIONS RESTREINTES :

(15 auditions)

13 septembre 2023 – matin :	Andra
13 septembre 2023 – après-midi :	EDF
14 septembre 2023 – matin :	Orano
14 septembre 2023 – après-midi :	GIFEN
26 septembre 2023 – après-midi :	haut-commissaire à l’énergie atomique
29 septembre 2023 – matin :	Framatome
04 octobre 2023 - après-midi :	administrateur général du CEA
09 novembre 2023 – matin :	EDF – Thème des RNR
17 janvier 2024 :	5 auditions privées avec des lauréats de l’appel à projets « réacteurs nucléaires innovants » France 2030 : Blue Capsule (9h-10h), Calogena (10h-11h), Otrera (11h-12h), Hexana (14h-15h), Stellaria (15h-16h)
18 janvier 2024 :	CEA – Place du CEA dans la relance du nucléaire
14 mars 2024 :	EDF – Mise à jour des scénarios relatifs au parc électronucléaire

ATELIERS THEMATIQUES AVEC L'ANDRA :

(4 ateliers)

- 12 mars 2024 : Mécanique et structures (matin)
Phipil (matin)
Capacité techniques de l'exploitant (après-midi)
- 15 mars 2024 : Cassandra et calculs de flux jusqu'à l'exutoire (journée)

ANNEXE IV : LISTE DES PERSONNES AUDITIONNEES PAR LA COMMISSION

Andra

ABADIE Pierre-Marie
ARMAND Gilles
BUMBIELER Frédéric
COCHEPIN Benoit
CROMBEZ Sébastien
DAMON Adrien
DEBELLE Aurélien
FARIN Sébastien
FRASCA Benjamin
GIGLEUX Sylvain
LECONTE Marc
PLAS Frédéric
ROBINEAU Timothé
SAVINO Mary
SCHUMACHER Stephan
TALANDIER Jean
THEODON Louise
VU Minh-ngoc
ZGHONDI Jad

LAUGIER Frédéric
LE MONIES DE SAGAZAN Henri
MOATTI Marie
PRAUD Clément
ROYER Sébastien
SANNA Antonio
SETTIMO David
TAKENOUTI Sylvain
TISSOT Julien
VAAST Guillaume
VIETTE Arnaud

FRAMATOME

FRICHET Alain
LE TESSIER Yann
LOUF Pierre-Henri
MAILHE Pierre
VIDELAINE Philippe
VIOUJARD Nicolas

CEA

ARAB-CHAPELET Bénédicte
BERETTI Christophe
CHABERT KORALEWSKI Christine
CHAPELOT philippe
COURTOIS Nicolas
DEFFAIN Jean-Paul
GARNIER Jean-Claude
GAVOILLE Pierre
JACQ François
JOURDA Paul
LEGENDRE Fabrice
MEYRAND Louis
PHELIP Mayeul
SALVATORES Andrea
STOHR Philippe
SUDREAU François
VIGNERON Pierre

EDF

AMBARD Antoine
BARBE Vincent
BARTHOLEMY Nicolas
BILLAT Hervé
ELIE-LEFEBVRE Jean-François
GIRAUD Olivier
GARREL Julien
GRANET Sylvie
LARGENTON Rodrigue

GIFEN

BARD Olivier
NEUGNOT Christophe

HC

Vincent BERGER

ORANO

AZEMA Célia
CHAMBRETTE Pierre
CRASTE Fabrice
DE BEAUCHAINE Florian
DELAMARE-LAVENU Marie-Pierre
EVANS Cécile
FORBES Pierre
KERBOUL Geneviève
LIBERGE Renaud
MERIDIANO Yannick
METEYER Alison
MOGGIA Fabrice
MONIN Pascal
MORLAES Isabelle
OUDOT Christophe
POUPINEL-DESCAMBRES Marion

ROMARY Jean-Michel

SOLVAY

CAROBENE Francesca
HUART Michèle

START-UP

BLUE CAPSULE

CAREY Mathieu
HOURCADE Edouard
LOKHOV Alexey

CALOGENA

DERAISME Guillaume
BRAVO Xavier
VALLEE Alain

HEXANA

GAUTHÉ Paul
NIZOU Sylvain

OTRERA

CHERBUIIS Grégory
PRADEL Philippe
LEBRET Daniel
VARAINE Frédéric

STELLARIA

GERSCHENFELD Antoine
CAMPIONI Guillaume

ANNEXE V : LISTE DES DOCUMENTS TRANSMIS A LA COMMISSION EN 2023-2024

Andra

- Newsletter du Mag de l'Andra n° 54 – juillet-août 2023.
- Edition 2023 de l'inventaire national des matières et déchets radioactifs – catalogue descriptif des matières 2023 et rapport de synthèse 2023.
- Newsletter du Mag de l'Andra n° 55 à 60 – de septembre 2023 à février 2024

CEA

- Clefs CEA – L'économie Circulaire - N° 75 – Février 2023.
- Méthode d'établissement de courbes « enveloppes » de réactivité chimique sur la base des données acquises dans le cadre des plans d'expérience des enrobés bitumeux fabriqués à Marcoule – 24 janvier 2024.

ANNEXE VI : LE PLAN FRANCE 2030 – EXAMEN DES PROJETS DE NOUVEAUX REACTEURS PAR LA COMMISSION

Le plan d'investissement France 2030 consacre 1 Md€ au soutien du développement de petits réacteurs innovants. Un premier volet, doté de 500 M€, finance le projet Nuward de développement d'un petit réacteur modulaire à eau pressurisée. Le deuxième volet, doté également d'environ 500 M€, vise à soutenir les nouveaux concepts de réacteurs innovants et à favoriser l'émergence de jeunes entreprises innovantes. Il est organisé sous forme de trois appels à projets successifs dont le premier est à présent clos.

Quinze projets ont été déposés dont onze ont été désignés lauréats et sont soutenus par une enveloppe globale de 129,8 M€. Les projets lauréats sont :

- le projet de réacteur calogène à basse température et neutrons thermiques proposé par la société Calogéna ;
- le projet de réacteur calogène à gaz haute température et neutrons thermiques proposé par la société Jimmy Energy ;
- le projet de réacteur calogène à haute température et neutrons thermiques refroidi au sodium liquide proposé par la société Blue Capsule ;
- le projet de réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium proposé par la société HEXANA ;
- le projet de réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium proposé par la société Otrera ;
- le projet de réacteur à neutrons rapides refroidi au plomb proposé par la société Newcleo ;
- le projet de réacteurs à sels fondus et neutrons rapides proposé par la société NAAREA ;
- le projet de réacteurs à sels fondus et neutrons rapides proposé par la société Thorizon ;
- le projet de réacteur à sels fondus et neutrons rapides proposé par la société Stellaria ;
- le projet de réacteur utilisant la fusion nucléaire proposé par la société Renaissance Fusion ;
- le projet de réacteur utilisant la fusion nucléaire proposé par la société GenF.

73

L'OPECST ayant mandaté la Commission pour examiner les projets de nouveaux réacteurs du point de vue de leur impact sur les matières et les déchets nucléaires, une série d'auditions a été organisée en 2023, dont il a été rendu compte dans le rapport n°17 (annexe 7). Ce travail a été poursuivi cette année, avec l'audition des sociétés Blue Capsule, Calogéna, Hexana, Otrera et Stellaria. Les principales informations recueillies par la Commission à l'occasion de ces auditions sont fournies ci-après, sous forme d'une fiche par projet et d'un tableau de synthèse.

Au total, la Commission a examiné à ce jour 17 projets, parmi lesquels 9 des projets lauréats de France 2030 et 6 projets étrangers.

Porteur du projet – partenaires

Calogéna est une SA créée en 2021 et adossée au groupe Gorgé.

Technologie du réacteur

Réacteur à neutrons thermiques et eau pressurisée et piscine ouverte.

Utilisations envisagées :

Production de chaleur pour le chauffage urbain.

Puissance :

30 MW thermiques.

Combustible

Combustible à plaques Al-U₃Si₂ (du type de celui employé pour les réacteurs de recherche) ou combustible à crayons d'UOX avec gaine en zircalloy (choix prévu en 2024). Dans les deux cas l'enrichissement en ²³⁵U est inférieur à 5%.

Gestion du combustible utilisé

Calogéna considère que les deux combustibles envisagés sont compatibles du cycle aval français actuel.

74

Date de mise en service visée

Calogéna prévoit de construire le premier réacteur à partir de 2031.

Avancement du processus de certification

Calogéna annonce une première version d'un dossier d'options de sûreté fin 2024.

Commentaires

La durée de vie visée est d'au moins 60 ans.

Objectif de coût visé = 60 €/MWth.

Porteur du projet – partenaires

Le projet est porté par la société Blue Capsule, SAS créée en novembre 2022.

Les partenaires de Blue Capsule sont notamment le CEA, le CNRS, Framatome (pour le combustible Triso) et Platom (Finlande).

Technologie du réacteur

Réacteur à haute température et neutrons thermiques refroidi par du sodium liquide.

Utilisations envisagées

Production de chaleur industrielle pour la production de soude, d'hydrogène, d'ammoniac, ...

Puissance

150 MWth par réacteur (ou 50 MWe).

Combustible

Combustible Triso contenant de l'uranium enrichi entre 5 et 10 %, avec rechargement en continu.

Gestion du combustible utilisé

Seul le stockage du combustible utilisé est aujourd'hui validé. Blue Capsule a pris contact avec Orano en vue d'examiner le recyclage du Triso.

Date de mise en service visée

Blue Capsule envisage le démarrage du premier de série vers 2035.

Avancement du processus de certification

Des contacts préliminaires ont été pris avec l'ASN et l'IRSN en septembre 2023.

Commentaire

Le fluide secondaire de refroidissement est de l'air à haute température.

La durée de vie prévue pour le réacteur est 60 ans.

L'objectif commercial est l'obtention d'un prix de la chaleur compétitif par rapport au prix du gaz en 2023.

Porteur du projet – partenaires

HEXANA est une start-up issue du CEA.

Ses principaux partenaires sont EDF et Framatome.

Technologie du réacteur

Réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium.

Utilisations envisagées

Production de chaleur et d'électricité.

Puissance

Deux modules de 150 MWe (400 MWth) associés par centrale.

Combustible

Aiguilles MOX RNR type Superphénix (teneur en Pu < 28,5%).

Utilisation de Pu issu d'UOX usé puis ultérieurement de MOX usé.

Gestion du combustible usé

Le combustible est réputé retraitable au vu du retour d'expérience de Superphénix.

Date de mise en service visée

Divergence du premier de série à la fin des années 2030.

Avancement du processus de certification

Dossier d'options de sûreté annoncé en 2026.

Demande d'autorisation de création visée vers 2030.

Commentaire

Stockage intermédiaire d'énergie dans des sels fondus pour suivi de charge.

Fonctionnement possible en mode isogénérateur en ajoutant une seule couverture fertile.

Durée de vie visée supérieure à 60 ans.

Porteur du projet – partenaires

Otrera est une start-up essaimée du CEA. Elle a été créée en février 2023 sous forme de SAS.

Technologie du réacteur

Réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium.

Utilisations envisagées

Production d'électricité et de chaleur industrielle en cogénération.

Puissance

300 MWth (110 MWe et 180 MWth en cogénération).

Combustible

Combustible MOX avec teneur en plutonium de l'ordre de 15%.

Gestion du combustible utilisé

Le combustible MOX sera compatible avec les usines actuelles du cycle nucléaire.

Date de mise en service visée

Le chargement du premier cœur est envisagé en 2032.

Avancement du processus de certification

Non indiqué.

Commentaire

Circuit sodium non pressurisé.

Sûreté renforcée par une quatrième barrière constituée d'une enceinte rapprochée inertée.

Fonctionnement isogénérateur possible moyennant une dégradation du taux de combustion.

La centrale comporte deux cuves fonctionnant alternativement. Les cuves, d'une durée de vie d'au moins 20 ans, seront remplaçables.

Objectifs de coût : 60 €/MWe et 20 à 22 €/MWth.

Porteur du projet – partenaires

Stellaria est une start-up essaimée du CEA. Elle a été créée en mai 2023 sous forme de SAS.

Technologie du réacteur

Réacteur à neutrons rapides et à sels fondus.

Utilisations envisagées

Non indiqué lors de l'audition.

Puissance

Le design actuel est un réacteur de 250 MWth, 110 MWe.

Combustible

Mélange de sels NaCl-ThCl₄-UCl₃-PuCl₃ – composition variable afin de permettre l'adaptation à des stratégies nucléaires différentes.

Le mélange de sel est contenu dans une capsule à double peau remplaçable.

Gestion du combustible usé

Discussions en cours avec Orano pour l'étude du retraitement du combustible.

Les sels sont réputés compatibles du procédé Purex après dissolution dans l'eau.

Date de mise en service visée

Non indiqué lors de l'audition.

Avancement du processus de certification

Non indiqué lors de l'audition.

Commentaire

Les échangeurs sont à plaques avec une forme innovante en développantes de cercles. Le pilotage se fait par extraction de puissance.

La cuve doit être chauffée à 500°C quand le réacteur est à l'arrêt pour conserver l'homogénéité du mélange de sels.

TABLEAU SYNTHETIQUE DES PROJETS DE REACTEURS INNOVANTS EXAMINES PAR LA CNE EN 2024									
Produit	Antériorités scientifiques et technologiques	Utilisation	Puissance	Combustible	Gestion du combustible utilisé	Avancement certification	Mise en service	Coût de l'énergie visé	Commentaire
Réacteur calogène à eau pressurisée									
CALOGENA	Filière REP avec piscine	Production de chaleur pour chauffage urbain	30 MW _{th}	crayons UOX ou plaques AL-U3Si2 enrichissement < 5%	Retraitement	DOS annoncé fin 2024	vers 2031 (premier de série)	60 €/MWh	choix du combustible prévu en 2024 - durée de vie : au moins 60 ans
Réacteur à haute température									
Blue Capsule	partenariat avec Framatome (Triso)	Production de chaleur industrielle	150 MW _{th}	TRISO - uranium enrichi entre 5 et 10%	stockage étude du retraitement envisagée	contacts préliminaires avec ASN en septembre 2023	premier de série vers 2035	compétitif par rapport au gaz	fluide primaire : sodium - fluide de refroidissement secondaire : air haute pression. Durée de vie du réacteur : 60 ans
Réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium et combustible solide									
HEXANA	Filière RNR Na française	Production de chaleur et d'électricité	Une centrale = 2 modules de 150 MWe (400 MW _{th}) associés	MOX RNR	Recyclage du combustible utilisé	DOS annoncé en 2026 DAC visée vers 2030	Fin des années 2030 (premier de série)	Non indiqué	stockage d'énergie intermédiaire dans des sels fondus. Mode isogénérateur possible avec une seule couverture fertile.
OTRERA	Filière RNR Na française	Production d'électricité et de chaleur industrielle en cogénération	300 MW _{th} (110 MWe et 180 MW _{th} en cogénération)	MOX RNR	Combustible retraitable	Non indiqué	chargement du premier cœur visé en 2032	60 €/MWe 20 à 22 €/MWh	quatrième barrière = enceinte rapprochée inertée fonctionnement isogénérateur possible
Réacteurs à sels fondus et spectre rapide									
Stellaria	travaux CEA et CNRS	non indiqué	250MW _{th}	mélange de composition variable (NaCl - ThCl ₄ - UCl ₃ - PuCl ₃)	études en cours sur retraitement	Non indiqué	Non indiqué	Non indiqué	échangeurs à plaques pilotage par extraction de puissance

Les fiches par projet et le tableau synthétique correspondants aux projets examinés en 2023 sont accessibles dans le rapport n° 17 de la CNE (pages 85 à 100) par le lien : https://www.cne2.fr/telechargements/RAPPORT_CNE2_17_2023.pdf

ANNEXE VII : LES PLANS DE VALORISATION DES MATIERES

La définition d'une matière radioactive telle qu'elle figure dans l'article L. 542-1-1 du Code de l'environnement : « une matière radioactive est une substance radioactive pour laquelle une utilisation ultérieure est prévue ou envisagée, le cas échéant après traitement » a ouvert des questions quant à la qualification de matières en déchets et vice-versa. L'ASN a précisé dans un avis (n° 2020-AV-0363 du 29 septembre 2020) les principes sur lesquels s'appuyer pour une distinction. Elle en conclut que l'uranium naturel et l'uranium enrichi sont valorisables, mais elle a émis des doutes quant à la valorisation d'autres matières. Les producteurs ont produit en 2023 des plans de valorisation, non transmis à la Commission, mais dont le contenu lui a été communiqué lors d'une audition dédiée.

Les informations relatives à l'uranium et au plutonium figurent au chapitre 3 du présent rapport. Les autres plans de valorisation sont commentés ci-dessous.

Les matières thorifères

Fin 2022, les matières thorifères sont réparties entre Orano (2300 tonnes de thorium sous forme de nitrate de thorium entreposés à Cadarache) et Solvay (6250 tonnes de thorium sous forme d'hydroxyde, d'oxyde, d'oxalate ou de nitrate entreposés à La Rochelle). Ces inventaires sont bien identifiés et considérés comme fermés. Les nitrates sont conditionnés en sur-fûts inox, les autres le seront d'ici fin 2026, pour une gestion sûre et durable.

À court terme, la valorisation principale est dans le secteur médical en oncologie par alpha immunothérapie en utilisant ^{212}Bi émetteur alpha (chaîne de ^{232}Th qui donne ^{228}Ra puis ^{212}Pb puis ^{212}Bi) ou ^{213}Bi émetteur alpha (irradiation de ^{228}Ra qui donne ^{229}Th puis ^{225}Ac puis ^{213}Bi). Le pivot est ^{228}Ra . Les isotopes de Pb ou Ac sont attachés au vecteur chimique (une molécule spécifique) pour atteindre les cellules cancéreuses. Le principe de valorisation est le suivant : une chaîne de radionucléides est utilisée comprenant en fin de chaîne un émetteur alpha de durée de vie courte pour irradier les cellules (par exemple ^{212}Bi), transporté par un précurseur de durée de vie courte également mais qui n'est pas émetteur alpha (par exemple ^{212}Pb). Il faut en amont un second précurseur de durée de vie un peu plus longue compatible avec la durée du processus industriel par exemple ^{228}Ra .

Deux options industrielles sont possibles : Oranomed se positionne déjà comme fournisseur de traitements (vendeur de ^{212}Pb -vecteur) et estime pouvoir valoriser de cette manière la moitié de son inventaire, avec deux usines en Europe et aux USA en raison de la faible durée de vie des produits. Solvay de son côté se place comme fournisseur de nitrate de thorium dont il espère vendre 25 tonnes par an à partir de 2025 et veut développer les voies ^{212}Pb et ^{225}Ac .

D'autres valorisations industrielles (matériaux réfractaires, catalyseurs...) représentent une demande de quelques tonnes par an pour Orano comme pour Solvay. Solvay étudie depuis 2000 le projet Valor+ pour récupérer à partir de lots historiques de thorium de l'uranium et des terres rares, mais le procédé, techniquement défini, nécessite la disponibilité d'un stockage FAVL pour les déchets engendrés. Enfin à plus long terme (au-delà de 2050), les projets de développement de réacteurs à sels fondus, utilisant ThCl_4 en association avec PuCl_3 et NaCl , peuvent constituer, s'ils débouchent, une autre voie de valorisation des composés de thorium qui pourrait, selon Orano, mobiliser 1000 tonnes de thorium. Le projet Porthos (Orano, Solvay, CNRS) est en cours.

Les combustibles usés

L'inventaire des combustibles usés d'EDF (de trois types : URE, UNE et MOX) s'établit fin 2022 à 14 600 tonnes de métal lourd (tML), dont 10 000 tonnes entreposées à La Hague (UNE : 7 600 tML, URE : 620 tML et MOX : 1830 tML) et 4 600 tonnes dans les piscines des réacteurs (UNE : 4 000 tML, URE : 8 tML et MOX : 620 tML). La saturation des piscines de La Hague est annoncée vers 2029, ce qui nécessite de nouvelles capacités d'entreposage. La future piscine ne sera mise

en service que vers 2034, ce qui a conduit à étudier des mesures palliatives transitoires : densification des piscines existantes, augmentation du nombre d'assemblages MOX dans les réacteurs moxés et mise en œuvre d'un entreposage à sec.

Le recyclage des combustibles UNE usés est déjà effectif. EDF prévoit de l'étendre par le moxage des réacteurs de 1300 MWe. Dans l'avenir, EDF souhaite recycler les URE et MOX usés par multirecyclage dans des RNR à terme et plus tôt dans des REP si l'intérêt du MRREP est confirmé par les études en cours.

En plus des combustibles usés issus du parc électronucléaire, il existe des combustibles dits « particuliers » de divers types utilisés historiquement, répartis entre EDF (200 tML environ) et le CEA (20 tML). Leur entreposage dans les installations actuelles ou prévues ne pose pas de difficulté particulière. EDF envisage leur retraitement pour utilisation dans le parc actuel ou dans un futur parc de RNR (pour les combustibles usés de Superphénix). Le CEA envisage de les utiliser pour la R&D sur les réacteurs de nouvelle génération.

La faisabilité du retraitement des combustibles usés des réacteurs UNGG et du réacteur EL4 de Brennilis est démontrée, moyennant quelques adaptations à La Hague. En revanche, le cisailage des combustibles issus des réacteurs Osiris, Cabri, Phébus, Phénix et Superphénix n'est pas possible avec les installations actuelles de La Hague. Un atelier dédié dit TCP (traitement des combustibles particuliers) a été étudié entre 2013 et 2021, mais le projet a été arrêté en 2022 faute d'accord sur son financement. La question se posera à nouveau dans le cadre des décisions sur le renouvellement plus global des usines de La Hague.

Les combustibles usés particuliers

Il s'agit de combustibles usés dont les caractéristiques géométriques et physico-chimiques diffèrent de celles du parc actuel : MOX RNR de Phénix et Superphénix (EDF 150 tML), Métalliques de UNGG /eau lourde (CEA 14 tML), UOX de Brennilis (EDF 49 tML) et divers combustibles UOX de réacteurs de recherche (CEA, 6 tML). Il n'y a pas de problème d'entreposage car les stocks sont définitifs.

Les combustibles du CEA seront valorisés, c'est à dire recyclés à la Hague, pour la R&D sur les réacteurs GenIV, ceux d'EDF pour le déploiement de ces réacteurs. Le projet d'Atelier TCP (actuellement arrêté, voir *supra*) pourrait assurer l'interface avec UP2 (tête d'usine pour démanteler les assemblages). Orano ne voit pas de problèmes technologiques pour la suite des procédés de retraitement.

Les rebuts de fabrication du MOX

Les rebuts de fabrication du combustible MOX sont soit des assemblages (entreposés en piscine) soit des pastilles conditionnées en boîtes (entreposées à sec), tous entreposés à la Hague. L'inventaire total atteint environ 350 tML fin 2022, dont 300 tML d'assemblages, et devrait augmenter au total d'un peu plus de 120 tML d'ici 2040. Des capacités supplémentaires sont en cours pour entreposer les futurs rebuts jusqu'à l'horizon 2040.

Le retraitement des pastilles est actuellement réalisé dans l'URP (unité de dissolution du plutonium), qui monte actuellement en puissance mais ne pourra dépasser une cadence de 3.5 tML/an. Le plutonium dissous rejoint ensuite le flux du procédé Purex. Le retraitement de quelques assemblages rebutés a été démontré. Pour cela plusieurs ateliers ont été utilisés dont *in fine* l'URP. Pour traiter de plus grandes quantités, la réalisation d'installations nouvelles serait nécessaire. Des solutions sont à l'étude au stade d'avant-projet sommaire. Encore faut-il que le besoin de plutonium soit immédiat.

Le plutonium séparé

La stratégie française consiste à ne séparer le plutonium des combustibles usés que dans la mesure où il peut être réutilisé rapidement pour produire un nouveau combustible (ce afin de ne pas accumuler du Pu « sur étagère »). L'inventaire de plutonium français séparé, de diverses origines, représentait fin 2022 environ 33 tonnes pour EDF, 20 tonnes pour Orano et 2 tonnes seulement pour le CEA.

EDF, dont le stock reste globalement stable dans le temps (dans l'hypothèse de la poursuite de la stratégie de retraitement des combustibles) prévoit son utilisation pour la fabrication de combustible MOX (900 et 1300 MWe). Orano conditionne la valorisation de son plutonium (dont le stock ne devrait pas augmenter significativement) à l'apparition d'opportunités commerciales pour des ventes de MOX à l'étranger ou pour des AMR à neutrons rapides (combustible solide ou liquide). Le CEA n'envisage d'utiliser son plutonium (qui n'est pas compatible avec les installations actuelles de la Hague) que dans des projets futurs de R&D sur des réacteurs à neutrons rapides.

ANNEXE VIII : RAPPEL SUR LE CYCLE DE L'URANIUM DANS LA PRODUCTION ELECTRONUCLEAIRE

La transformation de l'uranium naturel en combustible

L'uranium est présent dans la nature principalement sous forme d'uraninite (oxydes UO_2 et U_3O_8) et de coffinite (silicate $USiO_4$). Il comporte deux isotopes naturels : ^{235}U , seul isotope fissile avec une concentration massique de 0,7 % et ^{238}U non fissile avec une concentration massique de 99,3 %. ^{238}U est fertile c'est à dire qu'il produit dans un réacteur du Pu (^{238}Pu à ^{242}Pu) dont les isotopes 239 et 241 sont particulièrement fissiles.

L'uranium est mondialement commercialisé sous la forme de *Yellow Cake* (YC) un mélange de diuranates (par exemple $U_2O_7(NH_4)_2$) et de divers hydroxydes et sels hydratés renfermant 70 % d'uranium. La France importe la totalité du YC dont elle a besoin de sorte que le cycle du combustible nucléaire sur le territoire français commence par le traitement du YC et non par celui des minerais. Trois étapes sont nécessaires pour passer du YC au combustible nucléaire UOX (UO_2) : conversion, enrichissement, déconversion, comprenant chacune de nombreuses opérations.

La conversion consiste à purifier le YC et à le transformer en UF_4 . Les opérations sont réalisées par Orano à Malvesi. La purification conduit à du $U_2O_7(NH_4)_2$, qui est transformé en UO_3 par calcination ($T = 350\text{ °C}$) puis UO_3 est transformé en UO_2 par réduction par H_2 obtenu par décomposition de NH_3 ($T = 800\text{ °C}$) et enfin UO_2 est transformé en UF_4 par fluoration avec HF anhydre ($T = 400\text{ °C}$).

La conversion se poursuit par la transformation de l' UF_4 en UF_6 qui a la particularité d'exister sous forme gazeuse à basse température. Cette opération est réalisée à Pierrelatte dans l'usine Philippe Coste d'Orano. UF_4 solide est transformé en UF_6 gazeux par fluoration avec F_2 ($T > 300\text{ °C}$) puis condensé sous forme liquide, forme sous laquelle il est transporté.

L'enrichissement est effectué dans l'usine Georges Besse sur le site du Tricastin. Le procédé d'ultracentrifugation de l' UF_6 gazeux permet d'augmenter la proportion en ^{235}U pour atteindre un taux approprié (3 % à 5 % pour les combustibles des REP).

La déconversion consiste à transformer UF_6 enrichi en U_3O_8 puis en UO_2 . Ces opérations sont réalisées à Romans. Il y a deux procédés, un par voie sèche et un par voie humide qui conduisent à des morphologies différentes de UO_2 . La voie sèche consiste à traiter UF_6 par la vapeur d'eau ($T = 800\text{ °C}$) puis à réduire UO_2F_2 obtenu par H_2 ($T = 750\text{ °C}$.) La voie humide consiste à traiter UF_6 par l'eau liquide, à précipiter $U_2O_7(NH_4)_2$, à le pyro-hydrolyser en présence d'eau vapeur pour obtenir U_3O_8 lequel est réduit à par H_2 à 500 °C .

L'oxyde UO_2 naturel enrichi est conditionné en pastilles qui sont alors encapsulées dans des gaines métalliques étanches pour constituer des crayons, lesquels sont assemblés en assemblages de combustible appelé UNE ou UOX. Les assemblages de combustible (AC-UNE ou AC-UOX) sont les objets manipulables pour alimenter les REP.

Le sous-produit de l'enrichissement est l'uranium appauvri, dont la teneur en ^{235}U est de l'ordre de 0,2 à 0,4 %. Cet uranium appauvri est entreposé sous forme d' U_3O_8 . Il constitue une matière recyclable de deux façons :

- directement (avec ajout de Pu issu du retraitement) dans le combustible MOX dont il représente 90 % de la masse totale,
- ou sous forme de combustible UOX après son réenrichissement (laissant un uranium doublement appauvri).

Le cycle ouvert du combustible

La plupart des pays qui utilisent des réacteurs à eau (pressurisée REP ou bouillante REB) mettent en œuvre le cycle du combustible dit « ouvert ». Lorsque les AC-UNE ont été utilisés et déchargés des REP/REB, on parle d'assemblages de combustible usé (ACU-UNE). Ils sont considérés comme des déchets HAVL et entreposés dans l'attente de la disponibilité d'une installation de stockage définitif. L'avantage du cycle ouvert est sa simplicité, mais il correspond à une utilisation très partielle de l'énergie contenue dans l'uranium puisque le combustible usé contient des matières fissiles (reliquat d' ^{235}U et Pu produit) et fertiles (^{238}U) qui pourraient être valorisées. De plus, la quantité de déchets à stocker est très importante : il s'agit de la totalité des ACU.

Le monorecyclage du combustible usé : première étape vers la fermeture du cycle

L'utilisation du combustible UOX en réacteur consomme une partie de l' ^{235}U ; par ailleurs, la capture neutronique par l' ^{238}U produit du Pu (et des actinides mineurs). La composition du combustible usé après passage en réacteur est la suivante :

- environ 94 % d' ^{238}U , soit la plus grande partie de l' ^{238}U présent dans le combustible neuf ;
- environ 1 % d' ^{235}U et d'autres isotopes de l'uranium en faibles quantités ;
- environ 1 % de plutonium, majoritairement sous forme de ^{239}Pu
- des produits de fission dont certains à vie longue (technétium, iode, césium...) ;
- des actinides mineurs (neptunium, américium, curium).

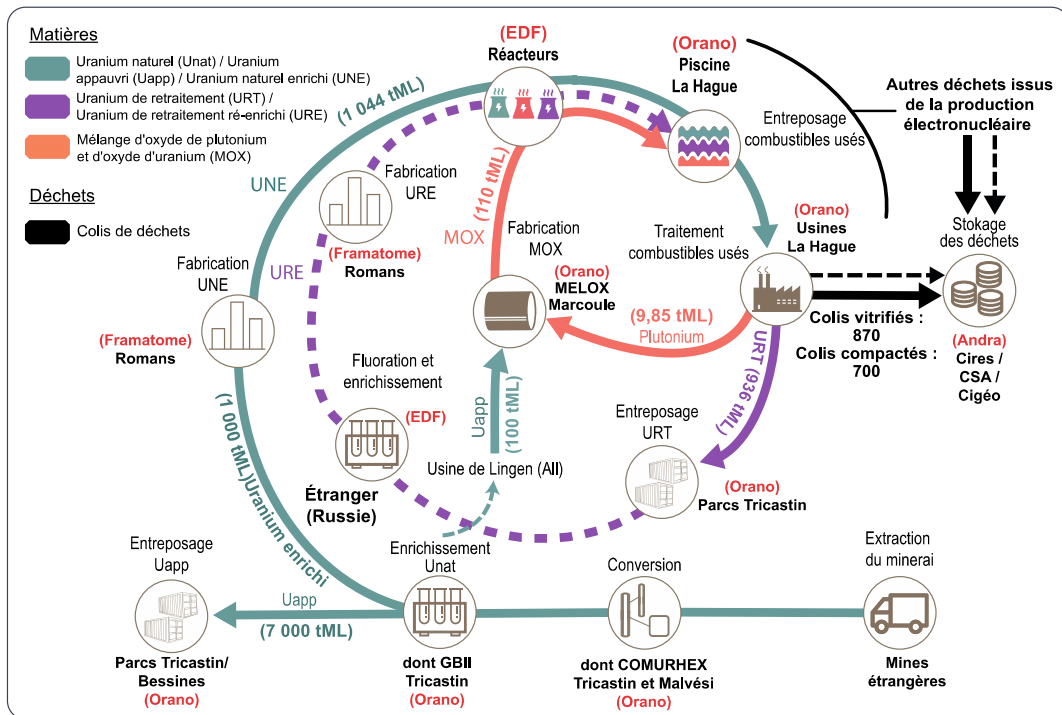
Le recyclage des ACU-UOX, réalisé après plusieurs années de refroidissement en piscine, consiste à dissoudre les pastilles puis à séparer les différents éléments pour isoler d'une part ceux qui sont des déchets radioactifs sans utilisation ultérieure possible et d'autre part ceux qui constituent des matières radioactives ayant un potentiel énergétique réutilisable.

Seuls sont traités comme déchets les produits de fission et les actinides mineurs qui représentent moins de 4 % en masse du combustible usé. Ces déchets sont vitrifiés en vue de leur stockage géologique. L'uranium, dit uranium de retraitement (URT), contient encore 1 % d' ^{235}U . Il est donc plus riche que l'uranium naturel. Il peut être réenrichi pour fabriquer un nouveau combustible UOX (dit URE pour uranium de retraitement enrichi). Le plutonium, pour sa part, peut être utilisé pour fabriquer le combustible MOX, qui en contient de 3 à 12 %, l'autre composante étant l'uranium appauvri issu de l'enrichissement.

Le cycle du combustible est ainsi partiellement fermé en France, grâce au combustible MOX qui permet une économie d'uranium naturel de l'ordre de 10 %. L'utilisation de l'uranium de retraitement permet de porter cette économie à plus de 20 %.

Le schéma détaillé ci-dessous synthétise le fonctionnement du cycle du combustible tel que pratiqué en France aujourd'hui. Un point important n'est pas mentionné sur le schéma : les durées des différentes opérations. Dans le meilleur des cas il faut 2 ans pour l'élaboration du combustible UNE, 2 ans d'entreposage en piscines (réacteurs et la Hague) des ACU REP, 2 ans pour le retraitement des ACU REP. Les AC restent 3 ans en réacteur. Il faut donc 7 ans pour pouvoir disposer du Pu pour recyclage dans le MOX REP. Le retour d'expérience montre que le temps d'entreposage en piscines est largement supérieur à 2 ans.

Le cycle français du combustible



Note : les flux indiqués correspondent aux flux de l'année 2017. Les flèches en pointillés correspondent à des étapes non-opérationnelles en 2017.

Source : Cour des comptes d'après documents de l'ASN et de l'IRSN

La fermeture du cycle dans des réacteurs à neutrons rapides

Le combustible des réacteurs à neutrons rapides (RNR) est un combustible de type MOX essentiellement du plutonium et de l'uranium appauvri, constitué pour l'essentiel d' ^{238}U . La proportion de plutonium dans un MOX RNR (20 %) est plus élevée que celle d'un MOX REP (8 %).

Une fission par un neutron rapide produit légèrement plus de neutrons qu'une fission par un neutron thermique. Les neutrons rapides produisent comme les neutrons thermiques du Pu à partir de ^{238}U . Ils fissionnent tous les isotopes d'uranium et de plutonium. Il est donc possible de produire dans un RNR autant de plutonium qu'il en consomme. C'est ce qu'on appelle un fonctionnement en mode iso-générateur. Pour un tel réacteur, le retraitement du combustible usé fournit donc le plutonium pour préparer un nouveau combustible neuf. On peut multi-recycler le plutonium et l'uranium avec du MOX RNR. La seule matière consommée est l'uranium appauvri, utilisé pour la fabrication du MOX afin d'ajuster la quantité de ^{238}U disparu, dont la France détient un stock considérable issu des opérations d'enrichissement de l'uranium naturel.

L'utilisation de réacteurs à neutrons rapides est la seule technologie connue permettant de fermer complètement le cycle du combustible, c'est-à-dire de supprimer le recours à des matières premières naturelles.

Une étape intermédiaire : le multirecyclage en REP (MRREP)

Le multirecyclage en REP qui est à l'étude actuellement vise à multi-recycler le plutonium d'un combustible appelé MOX MR lorsque celui-ci est usé. Il consiste d'abord à retraiter les MOX REP qui sont actuellement en entreposage pour fabriquer les premiers AC MOX MR puis à retraiter ceux-ci pour faire de nouveaux AC MOX MR, et ainsi de suite durant la vie du réacteur. Le combustible MOX MR est très proche du MOX REP mais, contrairement au MOX RNR, la composition isotopique du Pu doit être ajustée à chaque cycle. En effet celle-ci se dégrade lors du

passage en réacteur, c'est à dire que la proportion des isotopes fissiles du Pu diminue. Elle doit donc être ramenée à une teneur suffisante. On utilise pour cela du Pu provenant du MOX REP usé.

Le MRREP vise à porter à plus de 30 % l'économie d'uranium naturel. Les avantages et les contraintes du MRREP sont discutés aux chapitres 2 et 3 du présent rapport.

ANNEXE IX : LES COMBUSTIBLES ENVISAGES POUR LE MRREP

Le recyclage du plutonium en REP est une opération complexe qui nécessite de mettre au point un combustible MOX approprié. En effet il ne faut pas impacter la sûreté du réacteur.

Pour cela il faut assurer en permanence le maintien de la réaction de fission en chaîne pour maintenir constante la puissance thermique P_0 du réacteur en utilisant les barres de contrôle qui absorbent les neutrons. Un neutron de fission doit en produire exactement un autre pour produire à son tour une fission. Autrement dit, le facteur de multiplication des neutrons, k_{eff} , doit rester égal à l'unité, $k_{\text{eff}} = 1$. Le paramètre k_{eff} dépend de nombreux facteurs définissant le design du réacteur. Pour $k_{\text{eff}} = 1$, la puissance du réacteur P_0 dépend de la composition massique et isotopique de l'uranium et du plutonium ainsi que du flux de neutrons. Tout écart à $k_{\text{eff}} = 1$ entraîne une variation de puissance du réacteur dans le temps selon $P = P_0 e^{(k_{\text{eff}} - 1)t/\alpha}$. Plus le paramètre α est grand, plus la puissance varie lentement, plus le réacteur est pilotable. Or α est d'autant plus grand que le temps entre deux générations de neutron est élevé. Pour les neutrons thermiques ce temps n'excède pas quelques millisecondes. Une petite proportion β de neutrons est cependant émise, de manière retardée, par des noyaux précurseurs produits suite à la fission. Le temps au bout duquel ces neutrons retardés sont émis est grand par rapport à celui des neutrons instantanés (quelques secondes à quelques dizaines de secondes) et permet d'augmenter suffisamment le paramètre α pour permettre le contrôle du réacteur. Le taux de neutrons retardés est spécifique de la composition isotopique du combustible. Pour ^{238}U , $\beta = 0,80\%$, pour ^{235}U , $\beta = 0,65\%$, alors que pour ^{239}Pu , $\beta = 0,20\%$ est beaucoup plus faible. La présence de plutonium dans le combustible complique donc le pilotage du réacteur. Il y a des limites à ne pas dépasser tant pour la teneur en plutonium du combustible que pour son isotopie. C'est ce qui explique les évolutions de combustibles pour le MRREP pour rechercher un optimum. D'autres phénomènes physiques doivent être considérés qui modifient k_{eff} dont le plus important est la température. Pour ^{238}U elle diminue k_{eff} pour ^{239}Pu elle augmente k_{eff} .

Par ailleurs, à ces contraintes scientifiques s'ajoutent d'autres contraintes de sûreté pour le réacteur (arrêt) et pour les usines de fabrication et de retraitement du combustible voire des contraintes économiques.

Au démarrage du programme MRREP, deux types de combustibles étaient envisagés : le combustible dit Corail, que l'industrie estimait pouvoir qualifier puis produire à relativement court terme et le combustible MIX de performances théoriquement supérieures, mais dont la faisabilité technique et industrielle restait à démontrer. Par la suite, l'abandon du concept Corail a conduit à définir un troisième type de combustible dit MOX MR, proche du MOX REP déjà utilisé, dont la faisabilité est par conséquent plus assurée mais dont les performances sont plus médiocres. En 2024, le combustible nominal pour le programme MRREP est le MOX MR. Le combustible MIX reste une option possible à plus long terme, à la faisabilité toujours incertaine.

Le combustible Corail A

Plusieurs variantes de combustibles de type Corail ont été étudiées. Seule est décrite ci-dessous la variante Corail A (la dernière en date).

Le concept Corail présentait la caractéristique d'être composé d'assemblages hétérogènes contenant des crayons chargés en MOX et des crayons chargés en UOX. Dans la dernière version Corail A, chaque assemblage contenait :

- 141 crayons MOX (plutonium + uranium appauvri). Le taux de plutonium était limité dans un premier temps à 11,5 % en raison des limitations actuelles de l'usine Melox, mais l'obtention d'une équivalence énergétique par rapport à l'UOX aurait nécessité à terme d'augmenter la teneur en plutonium ;
- 124 crayons UOX avec un enrichissement en ^{235}U de 4,95 %.

Un assemblage Corail A contenait donc seulement 53 % de crayons MOX.

Les intérêts principaux du concept Corail étaient sa qualification relativement plus accessible que celle du concept MIX et la faisabilité de sa fabrication avec les procédés actuels.

Les études ultérieures sur les cœurs pour MRREP ont montré qu'une gestion à 100 % de MOX 2 (Corail ou MIX) présentait des inconvénients majeurs pour la sûreté : dégradation sensible des marges d'arrêt du réacteur, nécessité d'augmenter la concentration en bore ce qui entraîne des risques de rejet de tritium, augmentation de la puissance résiduelle à évacuer dans les cœurs et dans les piscines.

Ces inconvénients ont conduit l'industrie à s'orienter vers des gestions partielles à 50 ou 60 % de MOX (le reste étant des assemblages UOX) en abandonnant l'équivalence énergétique entre MOX et UOX. Dans ces conditions, le combustible Corail n'est pas consommateur de plutonium (le taux de crayons MOX n'est plus en effet pour une gestion à 50 % que $0.5 \times 0.53 = 27\%$ environ) ce qui supprime un des intérêts majeurs du MRREP. Le concept Corail a donc été abandonné.

Le combustible MIX

Le concept MIX correspond à des assemblages où tous les crayons sont identiques. Chaque pastille est un mélange d'oxyde de plutonium recyclé et d'oxyde d'uranium enrichi, qui compense la dégradation isotopique du plutonium. Le taux de plutonium varie selon les pastilles avec un maximum de 12 % dans une pastille et de 8 % en moyenne. Le taux d'uranium enrichi est ajusté à chaque recyclage (jusqu'à un taux maximum de 4 %) pour obtenir l'équivalence énergétique avec un combustible UOX malgré la dégradation à chaque tour de la qualité fissile du plutonium. Il est donc nécessaire à chaque cycle d'adapter la composition du combustible et donc les installations de fabrication.

90

Ce concept permet en principe d'utiliser du plutonium de faible qualité fissile. Il reste consommateur de plutonium avec une gestion à 50 ou 60 %. En revanche, la faisabilité du MIX n'est pas prouvée à ce jour et nécessiterait des travaux de R&D approfondis pour y parvenir. Il serait notamment nécessaire d'étudier le comportement sous irradiation du mélange de plutonium et d'uranium enrichi, en particulier en conditions accidentelles.

Le chargement d'assemblages précurseurs en réacteur était annoncé en 2050 au plus tôt avant l'abandon du concept Corail. En 2024, le combustible étudié en priorité est le MOX MR, et le scénario privilégié est le passage au multirecyclage en RNR après le MRREP avec MOX MR. Le MIX n'est plus présenté que comme un concept de long terme dont la mise au point ne serait poursuivie que si la transition REP-RNR prévue était remise en cause.

Le combustible MOX MR

Le concept MOX MR a été imaginé à la suite de l'abandon du Corail, pour fournir un combustible permettant de démarrer le MRREP plus tôt qu'avec le concept MIX. Ce combustible est un MOX « classique » à base d'oxyde de plutonium et d'oxyde d'uranium appauvri, proche du combustible MOX actuellement utilisé dans les réacteurs de 900 MWe. D'après les résultats des études préliminaires, il respecte les critères de sûreté et de performances des réacteurs actuels. Les travaux nécessaires à sa qualification seront donc considérablement plus limités que ceux nécessaires à la qualification du MIX. Toutefois, il nécessite une réserve de sous-criticité en cas d'accident. Les grappes d'arrêt devront donc être enrichies en bore 10. La gestion aujourd'hui retenue est à 50 % de MOX MR avec un niveau de sûreté équivalent à celui de la gestion 30 % MOX (MOX actuel).

Dans le MOX MR, la dégradation de l'isotopie du plutonium est compensée en mélangeant au plutonium issu du recyclage des MOX usés du plutonium issu du recyclage des UOX usés, de qualité fissile meilleure. Un assemblage MOX MR pour EPR2 associe des crayons avec trois teneurs différentes en plutonium (4,04 % - 7,15 % - 10,78 %) sur un support en uranium appauvri (0,25 % ^{235}U). La qualité fissile du plutonium utilisable varie de 55 % à 52.5 %.

Un inconvénient de ce combustible est que l'équivalence énergétique avec le combustible UOX ne peut être obtenue, ce qui doit être compensé soit en augmentant l'enrichissement des assemblages UOX dans une gestion mixte soit en augmentant le format de la recharge ou la teneur en plutonium pour préserver la durée des campagnes. Un autre inconvénient est que la dégradation de l'isotopie du plutonium au fil des utilisations successives doit être compensée par une quantité croissante de plutonium issu du recyclage d'UOX usé. De ce fait, le MRREP utilisant le MOX MR ne peut être prolongé indéfiniment car il se produira à terme une pénurie de plutonium de bonne qualité. La date d'arrêt du MRREP utilisant du MOX MR dépendra de la puissance installée globale du parc et de la nécessité de préserver un stock suffisant de plutonium de bonne qualité fissile pour démarrer un futur parc de RNR. Des travaux sur la transition vers un parc de RNR sont annoncés pour 2024.

Il est prévu que le produit MOX MR fasse l'objet, vers 2030, d'une qualification en usine visant à démontrer formellement la faisabilité de la fabrication des crayons MOX MR et celle de l'utilisation de plutonium dont le vecteur isotopique est dégradé. Le MOX-MR étant un concept dérivé du MOX classique, son irradiation en réacteur de puissance constituera seulement, selon les industriels, une modification notable soumise à simple déclaration puisque les démonstrations apparaissent couvertes par le référentiel de sûreté en vigueur. Une irradiation expérimentale dans un réacteur de 1300 MWe moxé est planifiée lors de la VD4 1300 MOX en 2033. L'irradiation d'assemblages précurseurs complets interviendra au plus tôt en 2042 et la première recharge MOX MR (*a priori* en gestion 50 %) pourrait intervenir au début des années 2050. La fabrication du MOX MR est envisagée dans la nouvelle usine à construire à partir de 2040 pour remplacer l'usine actuelle Melox.

ANNEXE X : ESSAIS ANNEAUX UGE ET INERIS

En partenariat avec des centres techniques et des laboratoires académiques, l'Andra conduit un vaste projet de recherche qui vise à analyser la tenue mécanique des galeries et carrefours du centre de stockage souterrain Cigéo. Ce projet est mené à différentes échelles.

À l'échelle du laboratoire souterrain, des galeries et carrefours tels qu'envisagés pour les alvéoles MA-VL ont été réalisés : carrefours en T, en X, grandes carrures. Les méthodes de creusement traditionnelle et mécanisée ainsi que celle de mise en place des voussoirs ont été validées. Une innovation réside dans l'utilisation de voussoirs compressibles : aux 50 cm de béton armé de type C60/75 sont juxtaposés à l'extrados (côté COx) 20 cm de matériaux compressibles. Ces matériaux compressibles se caractérisent par un long palier plastique. Leur fonction est de limiter la transmission aux galeries de béton des sollicitations résiduelles générées par la convergence rapide du COx lors de la phase de resaturation, et augmenter au final la performance des voussoirs sur le long terme. Des tests systématiques ont été réalisés afin de caractériser le comportement de différents types de matériaux compressibles : béton de mousse, verre cellulaire, éléments de remplissage tubulaires en céramique ou en argilite d'excavation traitée thermiquement, ou encore matériaux alvéolaires à base de ciment ou d'argilite d'excavation traitée thermiquement.

Un autre objectif de cette réalisation est de pouvoir quantifier plus finement le comportement à long terme des ouvrages souterrains à l'échelle de la phase d'exploitation et au-delà. Le dimensionnement repose sur des modélisations robustes et conservatives, pour lesquels les simplifications sont compensées par des surdimensionnements enveloppe. Ces modèles peuvent être affinés dans l'objectif de fournir des représentations plus réalistes, au prix de nécessaires paramètres additionnels, de complexités supplémentaires dans les couplages, et souvent de temps de calcul. Pour cela, le comportement mécanique des ouvrages doit être compris, décrit, modélisé et simulé. Des capteurs ont été intégrés aux galeries et croisements réalisés dans le laboratoire souterrain. Outre les capteurs classiques enregistrant les changements de température et d'humidité et les extensomètres, une nouvelle génération de capteurs à base de corde vibrante a été installée au niveau des soutènements et revêtements dans les différentes directions en privilégiant la direction orthoradiale. Leur fonction est de mesurer les éventuelles variations dimensionnelles des galeries dans le temps. Les données que fournissent l'ensemble de ces capteurs alimentent l'analyse phénoménologique multi-physique des ouvrages et de leur évolution dans le temps. D'autre part, l'instrumentation des galeries et le suivi dans le temps constituent un premier retour d'expérience sur les moyens d'instrumentation, le positionnement des capteurs et l'exploitation des données.

Pour démontrer le fonctionnement à moyen et long terme des galeries, des anneaux de voussoirs compressibles sont testés en laboratoire de surface. Une installation spécifique à l'Université Gustave Eiffel reproduit les effets de la compression de la roche sur des anneaux de voussoirs à l'échelle 1, c'est-à-dire dont les dimensions sont très proches de celles prévues pour les galeries du centre de stockage. Ces anneaux intègrent différents matériaux compressibles afin de comparer leurs effets sur le comportement mécanique du voussoir. Les anneaux sont sollicités mécaniquement en extrados, reproduisant les sollicitations induites par la convergence du COx, lors d'essais de type oedométriques. Plusieurs chargements cycliques sont appliqués à différents taux, de manières isotropes ou anisotropes. La réponse mécanique des différents anneaux est analysée au travers de la pression orthoradiale induite et de leur déformation. Les contraintes acceptables dans la partie en béton peuvent ainsi être déterminées.

Une modélisation numérique est développée pour simuler le comportement des anneaux en intégrant les résultats des essais. Deux approches analytiques sont utilisées. La première considère un chargement radial à l'extrados des voussoirs pour calculer la contrainte et la convergence de l'anneau. La seconde modélise le voussoir comme une somme de barres auxquelles est appliqué un calcul de résistance des matériaux. Concernant la modélisation numérique du matériau compressible, son comportement mécanique est décrit par le couplage d'un modèle élastique et d'un modèle plastique en cisaillement pour rendre compte de l'endommagement.

COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION

Membres de la Commission Nationale d'Évaluation :

Michel DUBOIS
Christophe FOURNIER
Philippe GAILLOCHET
Jean-Paul GLATZ
Robert GUILLAUMONT*
Saïda LAÂROUCHI-ENGSTRÖM
Vincent LAGNEAU
Maurice LEROY*
Virginie MARRY
Jose-Luis MARTINEZ
Jean-Paul MINON
Catherine NOIRIEL
Céline PERLOT-BASCOULES
Aude POMMERET

Président honoraire
Jean-Claude DUPLESSY

Secrétaire général & Conseiller scientifique :

François STORRER

Secrétariat administratif :

Florence LEDOUX

COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION

Président : **Vincent LAGNEAU**

Vice-Présidents : **Christophe FOURNIER & Saïda LAÂROUCHI-ENGSTRÖM**

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

Secrétariat administratif : **Florence LEDOUX**

www.cne2.fr

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

ISSN : 2257-5758