

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°17

Juin 2023

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° 17

JUIN 2023

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ – CONCLUSION	5
INTRODUCTION	9
CHAPITRE I : MATIÈRES NUCLÉAIRES, COMBUSTIBLES POUR LES RÉACTEURS ACTUELS ET FUTURS, USINES DU CYCLE	11
1.1 INTRODUCTION	11
1.2 COMBUSTIBLES INNOVANTS.....	12
1.2.1 Réacteurs de puissance connectés au réseau.....	12
1.2.2 Nouveaux réacteurs de faible puissance.....	13
1.2.3 Cas particulier des RNR.....	15
1.3 LE MULTI-RECYCLAGE EN REP	15
1.3.1 Combustibles pour le MRREP.....	15
1.3.2 Scénarios et flux de matières.....	17
1.3.3 Premières conclusions sur le MRREP	17
1.4 LES INSTALLATIONS INDUSTRIELLES DU MONO ET MULTI-RECYCLAGE EN REP	18
1.4.1 Usines de l'aval du cycle (La Hague).....	18
1.4.2 Usines de l'amont du cycle (Marcoule, Romans sur Isère).....	19
1.5 CONCLUSION	19
CHAPITRE II : LES ENJEUX ACTUELS DE LA GESTION DES DÉCHETS.....	21
2.1 INTRODUCTION	21
2.2 DÉCHETS SANS SOLUTION DE STOCKAGE – LES FAVL.....	21
2.2.1 Les caractéristiques attendues d'un système de stockage FAVL optimisé.....	22
2.2.2 La détermination de la capacité du stockage	22
2.2.3 Le projet de centre de stockage étudié par l'Andra	23
2.3 DÉCHETS DONT LA SOLUTION DE STOCKAGE EST EN PHASE D'EXAMEN PAR LES AUTORITES	24
2.3.1 Instruction de la DAC par la Commission	25
2.3.2 Au-delà de la solution proposée dans la DAC : études et recherches en cours.....	25
2.3.3 Le stockage des fûts d'enrobés bitumés	25
2.4 LE STOCKAGE DES DÉCHETS TFA : UNE FILIÈRE OPERATIONNELLE	27
2.4.1 L'extension des capacités de stockage	27
2.4.2 La valorisation des déchets métalliques	28
2.5 LES ALTERNATIVES AU STOCKAGE DES DÉCHETS MAVL ET HAVL.....	28
CHAPITRE III : LES RÉACTEURS INNOVANTS ET LEURS COMBUSTIBLES	31
3.1 INTRODUCTION	31
3.2 LES TECHNOLOGIES DE REACTEURS INNOVANTS ET LEURS MATURETES.....	32
3.3 LES COMBUSTIBLES DES REACTEURS INNOVANTS.....	33
3.4 LES DÉCHETS PRODUITS PAR LES REACTEURS INNOVANTS	33
3.5 LES PROCESSUS DE CERTIFICATION	35
3.6 CRITERES UTILES POUR L'ÉVALUATION DES PROJETS DE NOUVEAUX REACTEURS.....	35
3.6.1 Critères relevant directement du mandat de la Commission.....	35
3.6.2 Autres critères jugés pertinents.....	36
3.7 CONCLUSION SUR LES REACTEURS INNOVANTS	37
CHAPITRE IV : LES ENJEUX INTERNATIONAUX DU DÉPLOIEMENT DES PETITS RÉACTEURS MODULAIRES	39
4.1 POTENTIEL DE DEPLOIEMENT DES PETITS REACTEURS MODULAIRES (SMR, AMR).....	39
4.2 L'INTEGRATION DES SMR DANS LA POLITIQUE ENERGETIQUE.....	39
4.3 LE CADRE LEGAL INTERNATIONAL ET EUROPEEN	40
4.4 SURETE, SECURITE ET NON-PROLIFERATION	41
4.5 LE CYCLE DU COMBUSTIBLE	41

4.5.1	<i>L'amont du cycle</i>	42
4.5.2	<i>L'aval du cycle</i>	42
4.6	LA CHAÎNE D'APPROVISIONNEMENT	43
4.7	RESSOURCES HUMAINES.....	43
CHAPITRE V : VERS UN SIXIÈME PNGMDR		45
5.1	LE 5 ^{ÈME} PNGMDR : ENTRE INNOVATION ET OBSOLESCENCE	45
5.1.1	<i>La mise en œuvre du 5^{ème} PNGMDR</i>	46
5.1.2	<i>Les études relatives à la résilience du système de gestion des matières et déchets</i>	46
5.1.3	<i>Les analyses multi-acteurs multi-critères (AMAMC)</i>	46
5.1.4	<i>L'obsolescence du 5^{ème} PNGMDR</i>	47
5.2	RECOMMANDATIONS POUR LE SIXIEME PNGMDR – VOLET MATIERES	48
5.2.1	<i>L'impératif de la valorisation des matières radioactives</i>	48
5.2.2	<i>L'uranium appauvri et la souveraineté énergétique</i>	49
5.2.3	<i>Le retraitement à La Hague</i>	49
5.2.4	<i>L'uranium de retraitement URT et URE</i>	50
5.2.5	<i>La valorisation du plutonium</i>	50
5.2.6	<i>Les nouveaux combustibles</i>	51
5.3	RECOMMANDATIONS POUR LE SIXIEME PNGMDR – VOLET GESTION DU COMBUSTIBLE USE	51
5.3.1	<i>L'indispensable traitement des combustibles usés</i>	51
5.3.2	<i>La nécessité d'entreposer les combustibles usés</i>	52
5.3.3	<i>Les questions posées par l'entreposage à sec</i>	52
5.3.4	<i>L'entreposage sous eau</i>	52
5.4	RECOMMANDATIONS POUR LE SIXIEME PNGMDR – VOLET GESTION DES DECHETS RADIOACTIFS.....	53
5.4.1	<i>Les déchets TFA</i>	53
5.4.2	<i>Les déchets FAVL</i>	54
5.4.3	<i>Les déchets HA/MA-VL</i>	54
5.4.4	<i>Les catégories particulières de déchets</i>	56
5.5	CONCLUSION	56
GLOSSAIRE		59
ANNEXE I : COMPOSITION DE LA COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION		63
ANNEXE II : ACTIVITÉ DE LA COMMISSION		65
ANNEXE III : AUDITIONS RÉALISÉES PAR LA COMMISSION		67
ANNEXE IV : LISTE DES PERSONNES AUDITIONNÉES PAR LA COMMISSION.....		69
ANNEXE V : LISTE DES DOCUMENTS TRANSMIS À LA COMMISSION EN 2022-2023		71
ANNEXE VI : LES ÉTUDES ET RECHERCHE MENÉES EN PARALLÈLE À L'INSTRUCTION DE LA DAC DE CIGEO		73
ANNEXE VII : DESCRIPTION SYNTHÉTIQUE DES PROJETS DE NOUVEAUX RÉACTEURS EXAMINÉS PAR LA COMMISSION		75

RÉSUMÉ – CONCLUSION

MATIÈRES NUCLÉAIRES, COMBUSTIBLES POUR LES RÉACTEURS ACTUELS ET FUTURS, USINES DU CYCLE

La Commission porte une attention particulière aux questions relatives aux matières radioactives car l'évolution géopolitique (pour la disponibilité des ressources) et celle de la politique nationale (orientations du Conseil de politique nucléaire (CPN) sur la relance du nucléaire) appellent des décisions à court terme mais qui engagent sur le long terme.

Dans les études présentées à la Commission, les acteurs de la loi se sont limités à des scénarios cohérents avec la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) en vigueur mais qui sont aujourd'hui obsolètes. La Commission recommande qu'une nouvelle PPE définisse rapidement des scénarios de puissance électrique installée en accord avec les nouvelles orientations stratégiques (augmentation de la durée de vie des réacteurs actuels et construction de nouveaux réacteurs) et prenant en compte la fermeture du cycle.

Pour répondre aux enjeux de souveraineté, la Commission recommande de porter en priorité les efforts de R&D sur le déploiement de réacteurs à spectre rapide, seuls à même de permettre la fermeture du cycle. Le développement de petits réacteurs avancés à spectre rapide peut contribuer à progresser sur cette technologie, et paraît à la Commission une voie plus pertinente que le multi-recyclage en réacteurs à eau pressurisée sur la route du cycle fermé.

Pour les mêmes raisons de souveraineté, la Commission recommande également de réaffirmer le statut de matière énergétique stratégique pour les stocks d'uranium appauvri et d'uranium de retraitement au même titre que le plutonium.

Quelles que soient les orientations de politique électronucléaire qui seront choisies, les usines du cycle auront besoin d'être rénovées ou remplacées vers 2040, ce qui nécessitera une prise de décision vers 2025. Des études préliminaires ont été présentées. Cependant la Commission observe que les acteurs de la loi ne disposent pas à ce jour des directives de la nouvelle PPE nécessaires pour instruire la décision gouvernementale.

5

LES ENJEUX ACTUELS DE LA GESTION DES DÉCHETS

La Commission considère que les stockages, quels que soient les types de déchets qu'ils recevront, sont des ressources rares qu'il convient d'utiliser de façon optimale.

La Commission insiste depuis plus de quatre ans sur la nécessité de progresser sur l'identification et la qualification de filières de gestion pour les déchets de faible activité à vie longue (FAVL) dont l'immense majorité est déjà produite. L'Andra étudie actuellement un projet de site de stockage à Vendeuve-Soulaines. La Commission souligne que la qualification d'un premier site, même limité à certains types de déchets FAVL, serait déjà un progrès significatif.

L'Andra a déposé en 2023 sa demande d'autorisation de création (DAC) pour le centre de stockage de déchets de haute et moyenne activité à vie longue (HAVL/MAVL) Cigéo. La commission souligne que ce dossier repose sur plus de 30 ans d'études et recherches, en laboratoire de surface, dans le laboratoire souterrain implanté dans la couche géologique identifiée pour le stockage, et en liaison avec des collaborations internationales.

Conformément à la loi de 2006, la Commission produira un avis sur les fondements scientifiques qui ont permis à l'Andra de concevoir le stockage, de le dimensionner, d'en démontrer la sûreté en exploitation et à long terme et enfin d'en évaluer l'impact sur l'environnement.

Le programme France Relance consacre un volet à l'étude des alternatives au stockage géologique. La Commission a examiné les projets proposés, qui reposent tous sur la transmutation.

Ils ne s'appliquent donc ni aux produits de fission, ni aux déchets HAVL déjà vitrifiés, ni aux MAVL, et ne constituent donc pas une alternative réelle au stockage profond. Néanmoins, si les travaux aboutissent, ils présenteraient l'intérêt de diminuer l'emprise des déchets HAVL dans le stockage géologique.

LES RÉACTEURS INNOVANTS ET LEURS COMBUSTIBLES

Un foisonnement de projets de réacteurs nouveaux de faible puissance est observé depuis quelques années à l'étranger et en France. Répondant à une demande de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST), la Commission a examiné 13 projets français ou étrangers de réacteurs innovants, dont 5 sont candidats à un financement dans le cadre du plan d'investissement France 2030. Pour ne pas interférer avec le processus de sélection des projets, la Commission a émis ses recommandations en termes généraux.

La Commission recommande d'envisager l'intégration de réacteurs innovants dans le parc français de manière holistique, incluant notamment l'approvisionnement en matières fissiles nécessaires, la production du combustible, la gestion du combustible usé, le démantèlement des réacteurs, la gestion des déchets d'exploitation et de démantèlement. En particulier, la Commission recommande que les projets de réacteurs qui bénéficieront d'un financement public de France 2030 comprennent obligatoirement une étude précise sur tous ces enjeux.

PANORAMA INTERNATIONAL SUR LES ENJEUX DU DÉPLOIEMENT DES PETITS RÉACTEURS MODULAIRES

En complément de l'examen de projets de réacteurs innovants, la Commission a consacré cette année son panorama international aux enjeux mondiaux de déploiement des petits réacteurs modulaires (SMR).

La Commission observe que le modèle économique des SMR repose sur l'effet de série résultant de la fabrication en usine d'importantes portions du réacteur, y compris éventuellement le cœur, sur la rapidité du montage sur site et enfin sur une conception qui peut s'intégrer facilement à des environnements divers. La multiplication des usages (électricité, hydrogène, chaleur ...) et éventuellement la diffusion à l'export sont des opportunités permettant de tirer pleinement parti de l'effet de série.

Pour atteindre ces objectifs, les produits seront fortement standardisés, y compris le combustible. Il est dès lors probable que seuls quelques-uns des multiples projets en cours d'étude à ce jour seront effectivement déployés et que les premiers réacteurs imposeront de fait les standards et les règles, en matière de combustible comme de sûreté.

Une large diffusion à l'export suppose également que les référentiels de sûreté, d'acceptation, de protection physique et de non-prolifération soient harmonisés dans l'ensemble des pays clients. Ces aspects exigent des collaborations internationales. Certaines ont été amorcées par les autorités de sûreté.

Le développement des SMR repose sur la constitution d'un tissu industriel adapté au besoin, pour la construction des réacteurs et la fabrication des combustibles. De plus, de nombreux projets envisagent l'utilisation de combustible contenant du HALEU¹, ce qui posera rapidement un problème d'approvisionnement de la matière aujourd'hui essentiellement importée de Russie ou obtenue aux États-Unis par dilution à partir d'un stock gouvernemental limité d'uranium hautement enrichi.

¹ *High-Assay Low-Enriched Uranium* : uranium enrichi à un taux d'²³⁵U compris entre 5 et 20%, supérieur au taux employé dans les réacteurs à eau pressurisée.

VERS UN SIXIÈME PNGMDR

La Commission observe que le 5^{ème} Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR) en vigueur repose sur une PPE rendue obsolète par les nouvelles orientations du CPN. Il devra donc laisser la place à un nouveau plan, qu'il convient de préparer sans délai. La Commission a analysé le contenu du PNGMDR actuel pour émettre ses recommandations en vue de la rédaction du suivant.

La Commission estime qu'il est d'une importance stratégique de poursuivre et d'accélérer les études sur la valorisation des matières radioactives entreposées sur le sol national pour contribuer à la souveraineté énergétique de la France. La Commission recommande donc que le 6^{ème} PNGMDR concentre ses études sur les moyens de renforcer en France ou en Europe les capacités industrielles nécessaires.

Le 6^{ème} PNGMDR devra examiner la question des nouveaux combustibles ainsi que leur impact sur le cycle des matières et les déchets, dans le contexte de l'exploitation d'un parc constitué des réacteurs actuels, des futurs EPR2 et de réacteurs innovants.

Les tensions sur les capacités d'entreposage d'attente des combustibles usés en piscine ont conduit à envisager l'option d'un entreposage à sec ; la Commission observe que la possibilité de manipuler et donc de retraiter des combustibles entreposés à sec n'a pas été démontrée à ce jour. La Commission estime que le 6^{ème} PNGMDR devrait demander l'étude de l'évolution des assemblages combustibles dans ces conditions, en vue d'établir la durée maximale au-delà de laquelle le combustible UOX usé ne serait plus retraitable. La Commission conseille également de ne pas mettre en œuvre l'entreposage à sec du MOX usé avant d'avoir démontré que cette technique ne s'oppose pas à son retraitement ultérieur.

Pour relancer la dynamique sur le stockage des FAVL, la Commission juge nécessaire que le 6^{ème} PNGMDR demande de préciser en premier lieu la méthode de qualification des sites de stockage des déchets FAVL, en fonction des différents types de déchets concernés. Cette démarche s'appliquerait notamment au pré-projet de Vendeuve-Soulaines, et à la recherche de sites pour les déchets qui ne pourraient y être déposés.

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 de suivre et 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, qui en saisit l'OPECST, 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 Commission a été renouvelée le 16 mars 2023 et Vincent Lagneau en est le nouveau président.

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, le stockage réversible des déchets et l'entreposage.

La Commission évalue les 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).

De nouvelles directions stratégiques se dessinent peu à peu au travers des impulsions données par la puissance publique (plan France relance, plan d'investissement France 2030, soutien au projet NUWARD) et des décisions du Conseil de politique nucléaire (CPN). Ces choix 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.

Dans le premier chapitre, la Commission s'attache à préciser les enjeux associés à la gestion des matières nucléaires et aux usines du cycle du combustible.

Le deuxième chapitre analyse les options de gestion des déchets radioactifs, en distinguant les déchets sans filière à ce jour (FAVL), ceux pour lesquels une solution proposée est en cours d'examen (HA-MAVL), et enfin les déchets disposant d'une filière existante. Ce chapitre rappelle également les initiatives engagées concernant les « alternatives au stockage géologique des déchets », sujet sur lequel la Commission s'est largement exprimée dans son précédent rapport, notamment pour en préciser la définition.

Le troisième chapitre vise à présenter les principales caractéristiques des projets de réacteurs innovants présentés à la Commission, en soulignant les aspects liés à la gestion des matières et déchets, sujet dont l'importance ne devrait pas être négligée.

Le quatrième chapitre présente les enjeux associés au déploiement des petits réacteurs (SMR et AMR) dans le monde : intégration dans un mix énergétique, cadre réglementaire, sûreté, sécurité et garanties, cycle du combustible, tissu industriel, ...

L'évolution du paysage nucléaire français a rendu obsolète le 5^{ème} PNGMDR. Dans le chapitre 5, la Commission propose une analyse de ce plan et formule des recommandations pour la préparation du plan suivant.

Pour ce 17^{ème} rapport, la Commission a tenu compte des documents qui lui ont été transmis jusqu'à la date du 30 mars 2023.

CHAPITRE I : MATIÈRES NUCLÉAIRES, COMBUSTIBLES POUR LES RÉACTEURS ACTUELS ET FUTURS, USINES DU CYCLE

1.1 INTRODUCTION

La Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) publiée par décret le 21 avril 2020 et couvrant la période 2019-2028 prévoyait l'arrêt de 14 réacteurs et l'industrie nucléaire s'était organisée dans ce sens. L'annonce d'un redéploiement ambitieux de l'utilisation de l'énergie nucléaire par le Gouvernement lors de la réunion du Conseil de politique nucléaire (CPN) du 3 février 2023 change la donne : il s'agit de prolonger les REP du parc jusqu'à 60 ans (voire au-delà), de construire 6 EPR2 et de mettre à l'étude 8 unités supplémentaires, de développer des petits réacteurs (SMR et AMR) et de mettre en conformité le cycle du combustible accompagnant chacune de ces initiatives. En conséquence la PPE devrait être complètement revue.

La puissance totale du parc, le choix des types de réacteurs le constituant, ainsi que l'option de retraiter ou non le combustible usé vont déterminer à très long terme les flux de matières et de déchets ainsi que leur composition isotopique. Cela aura un fort impact sur l'ensemble des installations nécessaires au traitement du minerai, à la conversion et à l'enrichissement, à la fabrication du combustible, puis au traitement du combustible usé et au recyclage de l'uranium et du plutonium, et enfin au traitement et au conditionnement des déchets, ainsi qu'à leurs entreposage et stockage.

La centrale de Fessenheim a été construite en 8 ans. Pour une durée de construction similaire et une cadence d'une paire d'EPR2 par an à partir de 2035, le dernier réacteur serait mis en service vers 2050. Cela supposerait de retrouver les performances industrielles de l'époque du déploiement des réacteurs de 900 MWe. Les nombreuses études qui traitent des besoins en électricité, dans l'hypothèse de l'électrification du parc automobile et de l'abandon des combustibles fossiles pour l'industrie lourde et pour le chauffage domestique, situent le besoin global entre 20 et 90 GWe selon le scénario de développement retenu : électrification des usages, structure du mix énergétique, relance industrielle, changement des modes de vie et de l'organisation sociétale, degré de sobriété. Pour mémoire, un parc de 15 EPR apporterait une puissance d'environ 25 GWe. Une anticipation des besoins devient urgente car la gestion des matières fissiles et des déchets dépend en premier lieu de la puissance du parc envisagé.

La Commission recommande que les objectifs de puissance installée et les échéances de la stratégie électronucléaire après 2040 au sein du mix énergétique soient fixés afin de permettre de planifier la R&D, les développements technologiques et industriels ainsi que les ressources humaines indispensables à la gestion des matières et déchets radioactifs.

Les scénarios de gestion des matières et déchets dépendent aussi des choix de recyclage. Le mono-recyclage de l'uranium et du plutonium n'est assuré que jusque vers 2040, date à laquelle les usines actuelles arriveront au terme réglementaire de leur exploitation. D'autre part, une disposition de la PPE de 2020 envisage le multi-recyclage de l'uranium et du plutonium en REP (MRREP) dans l'hypothèse où la date de démarrage d'un parc de RNR au début du prochain siècle reste inchangée. Les usines actuelles, conçues pour mono-recycler, ne sont pas adaptées au MRREP.

Les résultats des recherches en cours présentés à la CNE devraient permettre d'éclairer les choix majeurs à venir. Ainsi, dans ce qui suit, sont envisagés ceux visant 1) les futurs combustibles pour les réacteurs de puissance et les réacteurs innovants de faible puissance, 2) les combustibles pour le MRREP et 3) les installations industrielles pour préparer les combustibles et les recycler une fois usés.

1.2 COMBUSTIBLES INNOVANTS

1.2.1 Réacteurs de puissance connectés au réseau

Après Fukushima, une campagne mondiale d'amélioration de la sûreté des REP Gen2 a été lancée. En France, les réacteurs du parc sont soumis à des visites décennales (VD) qui conditionnent la poursuite de leur fonctionnement. Ces visites sont des opérations lourdes qui permettent de changer des équipements et d'appliquer des renforcements des normes de sûreté (par exemple dans le contexte post-Fukushima). Globalement l'ensemble du parc évolue vers un niveau de sûreté comparable à celui de la Gen3. Les exploitants et l'ASN se préparent aux études nécessaires pour prolonger la durée de vie des réacteurs jusqu'à 60 ans.

L'Union européenne restreint l'accès à des financements à faibles taux pour la construction de nouveaux réacteurs nucléaires dans l'espace européen au respect de conditions sur la robustesse du combustible et sur la démonstration de la capacité de stockage. En particulier, le règlement délégué à la taxonomie verte, en place depuis 2022, indique que tout projet de nouveau réacteur devra utiliser un combustible dit ATF (*Accident Tolerant Fuel*, combustible dont les performances sont améliorées notamment dans des conditions d'accidents conduisant à une élévation de leur température) à partir de 2025, la technologie étant certifiée et approuvée par les autorités de sûreté nationales, donc en France par l'ASN.

Alors qu'aujourd'hui Framatome et EDF considèrent que leurs combustibles déployés actuellement (exemple : gaines M5, gaines *Optimized Zirlo*) sont déjà des ATF, il conviendrait d'anticiper des décisions qui pourraient conduire à considérer que seuls les EATF (*Enhanced Accident Tolerant Fuel*) répondraient aux exigences de sûreté, avec les conséquences sur le design détaillé des EPR2 que cela pourrait impliquer.

12

Depuis 2014, l'industrie nucléaire française (CEA, EDF et Framatome - programme PROtect Cr) a repris des recherches de laboratoire antérieures pour mettre au point des assemblages de combustible plus résistants. Cela passe par des modifications de la gaine des crayons, de la composition du combustible et des dispositifs limitant les interactions gaine-combustible.

En effet au-delà de 1200°C, le zirconium (Zr) des gaines des crayons de combustible s'oxyde rapidement au contact de la vapeur d'eau (H_2O_{vap}), ce qui conduit à la production massive d'hydrogène (H_2) et libère suffisamment de chaleur pour provoquer la fusion du combustible en donnant le corium, composé essentiellement d'oxydes de zirconium, d'uranium et de fer. Ces phénomènes sont précédés d'une perte de tenue mécanique de la gaine (fluage dû à la déformation et au gonflement des pastilles) dès que la température augmente au-delà de la valeur d'utilisation (350°C). L'interaction pastille/gaine (IPG) qui en résulte favorise les phénomènes thermiques, chimiques et mécaniques à l'origine de la détérioration de la gaine. Or, pour renforcer la sûreté, il faut préserver la tenue de la gaine des crayons de combustible, qui constitue la première barrière de confinement.

Celle-ci peut être rendue fortement résistante à l'oxydation par l'eau par divers traitements. Le traitement le plus avancé consiste en un revêtement extérieur au chrome (Cr) (10 à 30 μm), qui protège les pastilles de combustible pendant environ 60 h (contre quelques heures pour les gaines en Zircaloy) car le Cr est beaucoup moins sensible à l'oxydation par H_2O_{vap} que le Zr. Ainsi entre 1000 et 1300°C, la production de H_2 est environ 10 à 20 fois inférieure en masse et en vitesse. Un revêtement intérieur en Cr protège quant à lui les gaines en Zircaloy de la formation interne d'hydrure de zirconium d'un facteur 10 (par l'action de H_2) et diminue la corrosion interne par certains produits de fission provenant du combustible. Après une quinzaine d'années de R&D menées par Framatome et EDF, des assemblages EATF reposant sur ces traitements sont prêts à être certifiés aux États-Unis. Leur mise en œuvre à l'échelle industrielle est prévue pour 2035. Les REP du parc actuel pourraient en bénéficier.

Deux autres approches peuvent permettre d'améliorer la sûreté d'un combustible innovant : on peut, d'une part, changer la microstructure d' UO_2 pour une structure à gros grains qui accroît la rétention des gaz de fission lors d'un transitoire, d'autre part, augmenter sa conductivité thermique

pour évacuer la chaleur et diminuer la température interne des pastilles. L'augmentation de la réactivité chimique des gaines due à la hausse de la température et à la corrosion interne par les produits de fission (PF) est ainsi freinée. Le combustible supporte mieux les contraintes mécaniques engendrées par les changements de puissance en fonctionnement qui augmentent la fréquence des IPG.

Ces modifications peuvent être atteintes en incorporant dans UO_2 divers oxydes d'éléments à différents degrés d'oxydation (Cr, Al, Mo, Nb, ...). Ces éléments, en s'oxydant, diminuent la pression partielle en O_2 et limitent ainsi la libération des formes chimiques corrosives des PF. De nouveaux oxydes mixtes UO_2/Cr_2O_3 sont en cours de caractérisation et prêts à être industrialisés. Enfin l'utilisation dans des pastilles d'inserts métalliques reliés aux gaines facilite l'évacuation de la chaleur des crayons. Ce domaine se développe grâce à la fabrication additive.

Des gaines en céramique (carbure de silicium, SiC amorphe-SiC cristallisé) sont également à l'étude depuis plus de 15 ans. Elles permettraient d'augmenter la résistance des crayons jusque vers $1500^\circ C$ et constitueraient sans doute le meilleur gainage du point de vue de la sûreté. On est cependant encore loin d'une réalisation industrielle. La R&D se poursuit en France (CEA, EDF, Framatome, programme PROtect SiC) et dans le monde pour aboutir à un combustible SiC/SiC innovant très tolérant aux accidents.

Ces approches pour renforcer les capacités des assemblages de combustible et ainsi gagner du temps en situation pré-accidentelle doivent être analysées par l'ASN et devraient permettre de certifier de nouvelles variantes d'ATF, et même d'EATF, pour les combustibles du futur des réacteurs de puissance. Les travaux concernant la caractérisation des assemblages à gaines-Cr et pastilles-Cr progressent bien.

Il reste cependant un ensemble d'études scientifiques et technologiques à conduire pour évaluer les conséquences de leur emploi sur l'aval du cycle. L'impact des gaines revêtues de Cr, notamment sur le procédé de retraitement, est à l'étude, tant sur l'aspect mécanique que chimique. Le retraitement des assemblages à gaine céramique reste quant à lui à développer.

La Commission constate que de nombreux progrès ont été réalisés sur les ATF/EATF. Elle recommande d'achever ces recherches afin de qualifier les gaines, les crayons et les pastilles en vue de leur certification comme EATF.

La Commission recommande de porter une attention particulière à la retraitabilité de ces nouveaux combustibles, aux caractéristiques des déchets produits et à l'impact sur les performances du stockage.

1.2.2 Nouveaux réacteurs de faible puissance

Le SMR NUWARD devrait être alimenté avec un combustible oxyde légèrement plus enrichi en ^{235}U que celui des REP actuels. La fabrication et le retraitement de son combustible devraient bénéficier de l'expertise acquise avec les UOX des réacteurs de puissance. Des études spécifiques resteront à réaliser pour tenir compte de la taille du cœur, du faible taux de combustion et donc d'un rechargement fréquent.

D'autres petits réacteurs (SMR), les réacteurs avancés (AMR) et les microréacteurs (MMR), utiliseront d'autres combustibles, solides ou liquides, pour lesquels de nombreuses études de caractérisation doivent être réalisées. En effet, la recherche d'une faible puissance combinée à celle d'une grande autonomie conduit à aller vers des petits cœurs et ainsi à faire appel à des combustibles très riches en isotopes fissiles, en particulier très fortement enrichis en uranium (HALEU, 5 à 20 % en ^{235}U), et éventuellement plus denses que les oxydes : nitrures, carbures, métaux.

a) Matières fissiles nécessaires

Le développement de nouveaux réacteurs de type SMR ou AMR pourrait augmenter significativement la demande en combustible HALEU, actuellement très rare sur le marché de l'enrichissement de l'uranium. Le HALEU apparaît comme un combustible stratégique pour de nombreux projets développés à l'international. Sa disponibilité revêt ainsi une importance considérable sur le plan mondial. L'administration américaine a lancé des actions visant à produire l'HALEU pour éviter une dépendance aux importations de Russie et conserver l'avance des start-up américaines dans la compétition internationale pour la mise sur le marché de SMR.

La majorité des projets français s'appuient sur des combustibles de type MOX en raison de la disponibilité en Pu ; seul le projet français Jimmy (voir chapitre 3) repose sur l'utilisation de HALEU. Si l'essentiel des projets en France s'appuient sur d'autres types de combustibles, le savoir-faire français en matière d'enrichissement de l'uranium pourrait également trouver des débouchés sur le marché du HALEU. En particulier, la demande américaine pourrait intéresser Orano et lui apporter un soutien financier dans le développement de ses installations de fabrication d'UF₆ et d'enrichissement (en France ou aux États-Unis).

b) Combustibles nécessaires

Dans un cœur de petite taille, les neutrons générés par fission sont moins efficacement engagés dans la réaction en chaîne. Cette baisse d'efficacité peut être compensée par l'utilisation d'un combustible innovant plus dense.

Ainsi, les combustibles métalliques bénéficient d'un regain d'intérêt. Ils ont surtout été utilisés aux États-Unis comme combustibles pour des RNR de faible puissance sous la forme d'alliages d'uranium-plutonium-zirconium (par exemple U-20Pu-10Zr, 14 g/cm³ contre 9 g/cm³ pour les oxydes). En France, quelques échantillons de combustibles métalliques ont été irradiés dans Phénix et sont encore en cours d'analyse (expériences Métaphix et Futurix). Les performances des réacteurs sont améliorées mais le retraitement du combustible usé doit être réalisé par voie pyrochimique. Aujourd'hui, cette technique n'est pas industrielle.

Dans le cadre d'études internationales, auxquelles le CEA a pu participer, des combustibles nitrures d'uranium et carbures d'uranium ont été étudiés. Ils sont presque aussi denses que les métaux, avec des densités entre 12 et 13 g/cm³. Notons que les combustibles nitrures doivent être enrichis en isotope ¹⁵N pour limiter la formation de ¹⁴C. Seules quelques études de R&D ont été consacrées au traitement de ces combustibles carbures ou nitrures usés.

La Commission encourage les acteurs de la filière nucléaire à maintenir une veille technologique active sur les combustibles denses qui présentent une densité de noyaux fissiles plus élevée que les combustibles oxyde par exemple et sont donc bien adaptés aux cœurs de petites dimensions et à une durée d'utilisation entre rechargements plus grande.

Pour les réacteurs à gaz à haute température (HTR) de Gen2 et 3 (600°C), ou à très haute température (VHTR) de Gen4 (900°C) à neutrons thermiques, le combustible traditionnel est le TRISO. Il est constitué de petites sphères de composés d'uranium enrobés de trois couches superposées faisant office de première barrière : du carbure de silicium (SiC) entouré de deux couches en pyrocarbone. Ces sphères sont ensuite noyées dans du graphite de différentes formes. Le combustible TRISO a été conçu pour intégrer sa propre barrière de confinement ; sa nature chimique le rend difficile à déstructurer. Son retraitement est encore à l'étude : une approche consisterait à déstructurer le graphite en créant des composés d'insertion, pour donner accès à l'uranium du cœur de la sphère. Le graphite récupéré contaminé au ¹⁴C serait un déchet FAVL.

Les projets de SMR, AMR et MMR ont ouvert une nouvelle page sur l'utilisation de combustibles variés allant du combustible oxyde UOX, jusqu'aux combustibles liquides à sels fondus, en passant par des combustibles métalliques ou encore des nitrures ou carbures d'uranium et d'actinides. Il est clair que la maîtrise du cycle du combustible sera un élément essentiel pour l'aboutissement des projets.

La Commission recommande d'établir un inventaire de l'état des connaissances sur les innovations en matière de combustible mettant en exergue l'état de l'art concernant l'amont (conception et fabrication) et l'aval du cycle (composition du combustible usé, retraitabilité, stockage des déchets).

Concernant les réacteurs innovants amenés à être déployés en France, la Commission recommande également d'intensifier les études sur le retraitement des combustibles envisagés, leur intégration dans le cycle et leurs filières de gestion.

1.2.3 Cas particulier des RNR

Pour le long terme, le CEA poursuit ses recherches sur les combustibles pour les réacteurs à neutrons rapides (RNR) de puissance de Gen4. Une expérience très importante a été acquise avec Phenix, Superphénix et Astrid. Aujourd'hui, il s'agit essentiellement de qualifier l'outil de calcul scientifique Germinal visant à prédire le comportement des aiguilles combustibles RNR très riches en Pu (jusqu'à 45%). Dans ce but, le CEA participe à l'ambitieux programme expérimental européen PUMMA allant de la caractérisation de MOX à très fortes teneurs en Pu jusqu'au retraitement. Les projets français d'AMR à neutrons rapides utilisant des combustibles solides (cf. chapitre 3) pourront eux aussi bénéficier du retour d'expérience français et européen sur les combustibles RNR.

Le traitement de combustible RNR usé a déjà fait l'objet de travaux à La Hague en diluant ce combustible avec du combustible UOX usé. Néanmoins il reste, pour un développement de la filière, à industrialiser un procédé de traitement direct de MOX-RNR usés.

Le cycle des combustibles liquides de types sels fondus et, en particulier, le traitement du combustible usé, requiert encore une R&D importante.

1.3 LE MULTI-RECYCLAGE EN REP

Le CEA, EDF et Orano étudient la mise en œuvre éventuelle d'un MRREP dans des EPR2 après 2050. Ce MRREP est présenté comme une étape vers la maîtrise du cycle du combustible d'un futur parc de RNR nécessitant des combustibles riches en plutonium (20 %), et un moyen de limiter la quantité de combustible usé en entreposage. La caractérisation de combustibles MOX issus du multi-recyclage, et les études de scénarios simulant les flux de matières et déchets, sont des aspects essentiels de ces études.

1.3.1 Combustibles pour le MRREP

a) Combustibles MOX2 envisagés : MOX-MR et MIX

Les études des combustibles pour le multi-recyclage bénéficient d'un faible retour d'expérience expérimental contrairement à celui concernant les MOX pour le mono-recyclage. Le calcul de leur composition est optimisé de façon à toujours extraire autant d'énergie que celle d'un combustible UOX ou d'un MOX pour mono-recyclage.

La composition isotopique d'U et Pu évolue à chaque recyclage, ce qui dégrade la qualité énergétique des matières. Pour compenser l'appauvrissement de la qualité fissile du Pu issu du MOX usé, deux options sont envisagées. Le MOX-MR (MOX pour Multi-Recyclage) est un oxyde mixte d'U appauvri et de Pu de différentes compositions isotopiques définissant sa qualité fissile ; il utilise du Pu issu de combustible UOX usé. Le MIX (avec support UOX enrichi) est un oxyde mixte de Pu d'isotopie constante et d'uranium ayant un enrichissement en ^{235}U approprié : il utilise de l'uranium enrichi. Les études concernent l'impact de leurs caractéristiques intrinsèques sur la tenue des crayons et sur la conduite des réacteurs. Les taux de chargement des EPR2 seraient de 50% pour le MOX-MR, 60% pour le MIX, contre 30% pour le mono-recyclage du MOX dans les REP actuels.

Le MOX-MR, dérivé du MOX classique, est compatible avec la technologie existante et accepte du Pu (de qualité fissile) jusqu'à 52,5%. Les objectifs de sûreté des EPR2 imposeront cependant d'enrichir les grappes d'arrêt jusqu'à 50% en bore ^{10}B . La qualification du MOX-MR commencera par l'irradiation de crayons expérimentaux dans un réacteur 1300 MWe dont les caractéristiques sont pertinentes pour la qualification des EPR2. Le MOX-MR pourrait être qualifié en 2045.

Le MIX peut utiliser du Pu (de qualité fissile) à hauteur de 50%. Sa qualification nécessitera des efforts de R&D conséquents car son utilisation peut jouer sur des paramètres importants pour le pilotage et la conception des barres d'arrêt. Sa qualification n'est envisagée qu'après 2045.

b) Procédé de retraitement des combustibles

La Commission a abordé les problèmes de retraitement des MOX très chargés en Pu dans son dernier rapport. Le CEA étudie depuis longtemps un nouveau procédé dont les étapes sont la découpe des assemblages par jet de fluide hyperbare, la séparation oxyde/gaine par voloxydation (oxydation de UO_2 en U_3O_8), la dissolution de la poudre d'oxyde d'uranium ainsi obtenue et enfin la séparation innovante d'U et Pu sans étape redox. Ce procédé doit traiter tous les combustibles envisagés pour le MRREP et doit donc prendre en compte la gestion des isotopies de Pu et de l'augmentation des débits de dose associée tout en augmentant les cadences par rapport aux procédés actuels, et ce, sans dégradation de la sûreté. Les assemblages de combustibles dopés au Cr (EATF) qui seront probablement utilisés à l'époque du MRREP sont inclus dans les recherches.

Les points durs du procédé de découpe par jet de fluide hyperbare (eau ou azote) sont le choix de l'abrasif, l'obtention des cadences visées, la réduction des quantités d'effluents et d'abrasifs et l'interface avec la voloxydation. Orano n'a pas relevé de point rédhitoire vis-à-vis de la sûreté ou de la criticité.

La voloxydation est le seul procédé continu testé à ce jour permettant de s'affranchir de l'influence de la microstructure du combustible UOX sur sa dissolution. Un prototype de four à voloxydation a été conçu, dans lequel des essais sont prévus sur un combustible MOX MIMAS (dopé au Cr) à microstructure à gros grains et un combustible MOX irradié.

Des premiers essais de dissolution d'UOX voloxydé (U_3O_8) ont été réalisés et le développement du modèle numérique associé est en cours. La prochaine étape décisive concerne des essais de dissolution en continu à partir de poudres U_3O_8 produites dans le prototype de four de voloxydation sous agitation, couplé à une unité de séparation coques/oxydes.

S'agissant du procédé de séparation sans étape redox, un schéma de procédé a été proposé pour un des actinides mineurs, le neptunium, et les produits de dégradation du solvant par radiolyse ont été identifiés. Ces résultats doivent être confirmés par des qualifications, notamment par un essai de démonstration en moyenne et haute activité.

Les prochains jalons décisionnels relatifs à ces travaux se situent aux environs de 2025. Pour les quatre étapes majeures du procédé innovant de retraitement des MOX, l'objectif calendaire est de monter la maturité à TRL5 avant 2030.

c) Fabrication des combustibles

Pour les MOX-MR et MIX, une taille de grain homogène de 10 micromètres est visée. En effet, la microstructure du combustible est un paramètre clé de la tenue à l'IPG et de la retraitabilité du combustible usé à l'étape de dissolution, même si dans ce dernier cas on pourrait s'en affranchir grâce à la voloxydation.

Deux voies sont actuellement à l'étude : la première, dans la continuité de Melox, est basée sur le procédé MIMAS existant, en intégrant le dopage chrome ; la seconde est basée sur un procédé de co-broyage total des oxydes UO_2 et PuO_2 intégrant aussi un dopage chrome. Ce procédé comprend des briques en rupture : broyage dans l'azote liquide et frittage des pastilles combustibles en atmosphère légèrement oxydante. L'objectif affiché pour cette seconde voie est l'obtention directe d'une poudre à la composition finale recherchée et avec la meilleure homogénéité U/Pu possible. Le cryobroyage dans l'azote liquide vise à réduire l'empoussièrément et à accélérer les étapes suivantes du nouveau procédé. Les expériences donnent de bons résultats, qui restent à consolider.

La Commission observe que la mise en œuvre du MRREP implique des processus très complexes pour la qualification du combustible, son retraitement et sa fabrication. Conscients de cette complexité, les acteurs de la loi ont identifié un ensemble de questions scientifiques et techniques et établi un programme de R&D en conséquence. Des premiers résultats significatifs ont été présentés à la Commission.

1.3.2 Scénarios et flux de matières

Les études de scénarios permettent de simuler les ordres de grandeurs des flux de matières et de déchets d'un parc futur. Dans le cas du MRREP, le cycle du combustible est complexe. En particulier, pour permettre l'ajustement nécessaire de l'isotopie du Pu au cours du multi-recyclage, le mono-recyclage du Pu à partir d'UOX usés devra être poursuivi.

Concernant les flux de matières, les différents scénarios de recyclage présentés à la Commission montrent que le MRREP permet de stabiliser l'inventaire de Pu, mais conduit à une augmentation de la concentration en actinides mineurs par rapport au mono-recyclage, et ce, quel que soit le type de combustible utilisé. Le scénario consistant à utiliser le MOX-MR uniquement jusqu'au déploiement des RNR permet néanmoins de diminuer de manière significative la consommation d'uranium naturel. Par ailleurs, il mobilise des quantités beaucoup plus importantes de combustibles UOX usés pour redresser le vecteur isotopique du Pu.

Notons qu'un scénario utilisant du MOX-MR uniquement, basé sur une puissance du parc supérieure à 30 GWe, conduirait à l'épuisement des réserves de Pu issu du retraitement des UOX et destinées au lancement des premiers RNR du futur. Un passage par le MIX apportant de la matière fissile sous forme de ^{235}U serait alors nécessaire dans l'attente du déploiement des RNR à la fin du siècle.

Aussi convient-il de prendre les scénarios comme des premières approches, pour tester les possibilités du MRREP. À ce stade les comparaisons de production de déchets sont peu pertinentes, puisque reposant sur une PPE obsolète (voir chapitre 5) ; leur mise à jour pourra mettre en évidence d'autres difficultés.

1.3.3 Premières conclusions sur le MRREP

Le MRREP est présenté comme une étape intermédiaire en attente de la mise en place du cycle fermé utilisant des RNR.

Des études en cours, il ressort que la mise en œuvre industrielle du MRREP sera très complexe : intégration de très nombreux procédés, exigences de protection liée à l'accumulation d'actinides mineurs, gestion en parallèle de plusieurs variétés de combustibles (UOX, divers MOX). En outre, selon les options retenues, le MRREP pourrait menacer l'existence du stock de Pu nécessaire pour démarrer un parc de RNR.

1.4 LES INSTALLATIONS INDUSTRIELLES DU MONO ET MULTI-RECYCLAGE EN REP

1.4.1 Usines de l'aval du cycle (La Hague)

Depuis 1976, le site de La Hague a traité 43 000 tonnes de combustibles usés. Aujourd'hui une démarche « pérennité » est mise en œuvre pour sécuriser la capacité des usines jusqu'en 2040. Il s'agit de se conformer aux nouvelles exigences réglementaires, d'améliorer le fonctionnement du procédé chimique, ou encore de sécuriser les approvisionnements en tenant compte des mutations du tissu industriel. Cette approche comporte des rénovations avec remplacement de composants en zone active et la construction de nouveaux ateliers. Elle fait une large part à l'innovation pour le contrôle à distance du vieillissement grâce à l'utilisation de drones ou d'équipements robotisés.

Au-delà de 2040, Orano envisage, dans l'hypothèse de la confirmation d'une politique énergétique impliquant le retraitement, voire la fermeture du cycle du combustible, la prolongation et/ou le renouvellement des installations de traitement du combustible usé. Plusieurs modes de déploiement sont envisagés : progressif, modulaire ou intégral.

Le déploiement progressif s'appuierait sur les installations existantes, avec une jouvence partielle qui permettrait l'exploitation au-delà de 2040. L'avantage de cette solution est un déploiement des moyens de retraitement au plus près du procédé utilisé pour le mono-recyclage. Il reste que ces installations ne permettent pas le traitement des MOX à l'échelle industrielle ni, bien sûr, la mise en œuvre de nouvelles technologies. Le multi-recyclage industriel du plutonium resterait limité puisqu'il ne pourrait être mis en œuvre que par dilution du MOX dans de l'UOX lors du traitement. Par ailleurs, les risques de défaillance en raison du vieillissement des installations deviendraient très élevés.

Le déploiement modulaire consisterait à ajouter des petits modules pour s'adapter à un parc dont le dimensionnement n'est pas arrêté. Ce dispositif permettrait le traitement de MOX usés en quantité limitée. On peut envisager 5 modules de 200 tonnes/an de combustibles recyclés et donc bénéficier d'un effet de série dans la construction. Les impacts financiers et fonciers seraient déjà très significatifs pour un parc de l'ordre de 30 GWe.

Le déploiement intégral d'une nouvelle usine, dont les besoins financiers sont immédiats mais probablement moindres que dans le cas de modules pour lesquels un étalement est possible, serait la solution permettant la mise en œuvre des technologies les plus récentes et le retraitement industriel des MOX usés. Le déploiement intégral permet seul d'intégrer tous les nouveaux procédés de traitement indispensables afin de poursuivre la politique de fermeture du cycle au-delà de 2040. Il serait alors très urgent de les porter au niveau industriel.

Quelles que soient les orientations de politique électronucléaire qui seront choisies, les usines du cycle auront besoin d'être rénovées ou remplacées vers 2040, ce qui nécessitera une prise de décision vers 2025. Des études préliminaires ont été présentées. Cependant la Commission observe que les acteurs de la loi ne disposent pas à ce jour des directives de la nouvelle PPE nécessaires pour instruire la décision.

La Commission attire l'attention sur le fait que les installations spécifiques pour le traitement du MRREP ne sont pas totalement transférables aux besoins d'un cycle fermé par des RNR. Sous l'impulsion du développement des AMR à neutrons rapides, et dans une logique de renforcement de la souveraineté énergétique, le développement des RNR pourrait être accéléré. Cela limiterait l'intérêt des investissements spécifiques au MRREP.

Dans tous les cas, il faudra assurer une capacité d'entreposage d'attente compatible avec la chaîne de retraitement (voir chapitre 5).

1.4.2 Usines de l'amont du cycle (Marcoule, Romans sur Isère)

À ce jour, Melox à Marcoule a fabriqué 3 000 tonnes de combustible MOX depuis 1995 en recyclant 250 tonnes de plutonium considéré comme une matière énergétique valorisable. Pour obtenir une capacité de production de l'ordre de 145 tonnes par an à l'horizon 2030, plusieurs actions, dont le programme GOMOX, ont été entreprises : investir dans de nouveaux équipements pour contrer le vieillissement des installations, améliorer la maintenance et diminuer les temps de diagnostic, résoudre les problèmes d'empoussièrement avec récupération de la matière, réduire les fuites et les débits de dose, remettre en œuvre le procédé par voie humide qui permet de limiter les rebuts et l'accumulation de poussières.

Les fabrications de MOX, MOX2 ou encore MOX-MR, nécessitent de nouvelles approches ; de nouvelles installations, respectant les exigences en matière de criticité et de radioprotection, seront donc nécessaires après 2040. Ces installations dépendront des procédés choisis pour la fabrication des combustibles. L'intensité des efforts fournis en R&D dépend d'une définition claire du parc de réacteurs et de la stratégie appliquée au cycle du combustible.

Le recyclage de l'uranium de retraitement (URT) sous forme de combustible URE dans les REP nécessite qu'il soit d'abord converti puis enrichi. Ce ré-enrichissement était réalisé en Russie ; Orano étudie un projet d'extension de l'usine GB2 au Tricastin qui permettrait de le réaliser en France. Le combustible URE a été utilisé de 1994 à 2013 dans quatre REP 900 MWe de Cruas ; il est prévu que son utilisation reprenne en 2023. Plus tard, il devrait être chargé dans quatre réacteurs de 1300 MWe. Pour la fabrication du combustible à Romans, l'usine devra être autorisée à manipuler l'URT enrichi contenant des traces de ^{232}U qui génèrent l'isotope du thallium ^{208}Tl , émetteur gamma de haute énergie.

1.5 CONCLUSION

Les impératifs de souveraineté imposent de tirer le meilleur parti des matières. Cela est en partie réalisé par le mono-recyclage en REP opérationnel aujourd'hui. Il est indispensable de le poursuivre.

Le MRREP a été présenté comme une stratégie pour augmenter la valorisation des matières, limiter l'augmentation du stock de combustible usé, tout en maintenant une compétence technique dans l'attente de la fermeture du cycle avec les RNR. Les travaux présentés à la commission démontrent que le MRREP nécessiterait une très importante R&D et une industrialisation spécifique complexe et coûteuse dont seule une fraction serait réutilisable pour la fermeture du cycle. Ces efforts retarderaient d'autant la R&D requise pour le développement d'un parc de RNR de forte puissance. En outre, selon certains scénarios, le MRREP fragilise la disponibilité du Pu nécessaire pour démarrer un parc de RNR.

La Commission rappelle que seule la filière RNR est capable de fermer le cycle. La nouvelle impulsion lancée par les projets d'AMR à spectre rapide donne l'opportunité d'accélérer fortement la mise au point de la technologie RNR.

Il est indispensable de définir rapidement la stratégie électronucléaire pour que les décisions sur les installations industrielles du cycle et d'entreposage des combustibles usés puissent être prises au plus tard en 2025, afin d'en assurer la disponibilité en 2040.

La Commission recommande de choisir la voie directe des RNR sans passer par le MRREP.

CHAPITRE II : LES ENJEUX ACTUELS DE LA GESTION DES DÉCHETS

2.1 INTRODUCTION

Le stockage des déchets radioactifs issus de la filière électronucléaire ou des diverses activités générant des éléments radioactifs, par exemple en recherche ou en médecine, fait partie intégrante d'une politique de gestion et de développement des activités nucléaires. S'il est d'usage de considérer ces déchets par catégorie, ce chapitre propose une organisation différente, liée à l'état de maturité des modalités de prise en charge de ces déchets par un type de stockage approprié. Nous commençons par examiner le cas des déchets pour lesquels il n'existe pas à ce jour de stockage et progressons vers les cas où des filières de gestion sont identifiées et opérationnelles. Enfin, l'existence de solutions alternatives à la gestion envisagée à ce jour pour ces déchets est évoquée à la fin de ce chapitre.

La Commission considère que les stockages, quel que soit le type de déchets qu'ils recevront, sont des ressources rares qu'il convient d'utiliser de façon optimale.

Dans ce chapitre, seul le stockage des déchets à vie longue est abordé. Les déchets de faible et moyenne activité à vie courte ont des filières de gestion opérationnelles. Ils n'ont pas fait l'objet de présentation à la Commission.

2.2 DÉCHETS SANS SOLUTION DE STOCKAGE – LES FAVL

21

Les déchets de faible activité à vie longue (FAVL) ne disposent pas à ce jour d'une solution de stockage identifiée. Ils comprennent :

- des déchets radifères issus de l'exploitation de minerais et de l'assainissement d'anciens sites industriels,
- des déchets graphite en provenance du démantèlement des premières centrales électronucléaires,
- certains déchets uranifères issus du traitement et de la conversion de l'uranium,
- certains fûts d'enrobés bitumineux,
- et enfin des déchets technologiques et des sources scellées.

L'inventaire total actuellement prévu représenterait environ 250 000 m³ (ASN 2020) mais pourrait croître en volume du fait de la requalification de certains déchets MAVL en déchets FAVL. L'Andra estime que cet inventaire pourrait atteindre à terme entre 270 000 m³ et 300 000 m³.

La Commission insiste depuis plus de quatre ans sur la nécessité de progresser sur l'identification et la qualification de filières de gestion concernant les déchets FAVL dont beaucoup sont déjà produits. Force est de constater que les progrès restent modestes.

Dans le cas des déchets graphite par exemple, l'absence de filière de gestion est un frein à la progression des opérations de démantèlement de réacteurs (UNGG) dont l'exploitation a été arrêtée depuis plus de trente ans. Elle nécessite la construction d'entrepôts d'attente qui, eu égard aux quantités en jeu, ont une incidence économique supplémentaire à la mise sous cocon de ces installations.

La commission souligne que ces entreposages d'attente relèvent d'une logique de nécessité mais ne sont pas une bonne pratique en matière de gestion de long terme des déchets radioactifs.

Comme leur nom l'indique, les déchets FAVL ont une activité longue qui nécessite de les isoler de l'homme et de l'environnement tant qu'ils représentent un risque radiologique, c'est-à-dire sur de très longues périodes. Cependant, cette activité est faible et donc les barrières à mettre en place ne sont pas du même niveau que celles requises pour des déchets de haute ou moyenne activité. Ainsi, il est nécessaire de mettre le degré d'isolement et la capacité de confinement du système de stockage en adéquation avec le niveau de risque résiduel à long terme, une fois que le site n'est plus sous surveillance. À cette adéquation vient s'ajouter la recherche d'un optimum consistant à utiliser au mieux la capacité d'un stockage de subsurface dédié et sûr, afin d'éviter d'utiliser un stockage géologique profond pour des déchets qui ne requièrent pas un niveau de protection aussi élevé.

2.2.1 Les caractéristiques attendues d'un système de stockage FAVL optimisé

Les déchets FAVL n'ayant pas à ce jour de filière de gestion identifiée, la Commission souhaite tout d'abord rappeler les exigences auxquelles doit répondre un système de stockage pour ces déchets et les optimisations possibles.

La capacité d'isolement : celle-ci dépend de la profondeur de stockage et, en cas d'intrusion humaine, de la difficulté à pénétrer dans les structures. Il convient d'établir quelle est la profondeur suffisante à atteindre pour le stockage en subsurface de ces déchets.

La capacité de confinement : il s'agit ici de la capacité du système de stockage à retarder la migration des radionucléides. Dans un stockage de subsurface, on ne peut pas compter uniquement sur l'environnement géologique proche pour retarder cette migration. L'ensemble du système de stockage doit être pris en compte pour évaluer la capacité de confinement.

Les performances du système de stockage résultent de la combinaison des performances de chaque composant.

- Le colis est la première barrière de confinement. Le colisage le plus approprié pour un type de déchets donné est déterminé en fonction de son environnement dans le stockage et des modalités de mise en place des déchets dans celui-ci. La nature chimique des déchets est essentielle, elle impose le type et la quantité de radionucléides par colis en fonction de leur activité (terme source).
- Les barrières ouvragées forment la deuxième barrière de confinement. Elles contribuent à retarder la migration des radionucléides. La composition d'une telle barrière tient compte des risques spécifiques aux déchets (émanations gazeuses notamment ou réactivité avec les fluides). La couverture du stockage, s'il s'agit d'une couverture remaniée, doit prendre en compte la nécessaire isolation des déchets.
- La géométrie en grand de la couche dans laquelle sera implanté le stockage et l'hydrogéologie du site sont le troisième composant du stockage.

La recherche d'une solution optimale doit combiner l'efficacité de l'isolement et du confinement en tenant compte des incertitudes sur l'évolution géomorphologique du site. Il convient d'atteindre les performances requises à long terme et à très long terme, avec des marges de sécurité suffisantes, mais sans redondance excessive. L'optimisation à long terme reste toutefois limitée par l'accroissement des incertitudes avec la durée du stockage.

2.2.2 La détermination de la capacité du stockage

Les capacités d'isolement et de confinement pour les déchets FAVL sont recherchées par l'Andra en plaçant le stockage en subsurface. Comme la Commission l'avait souligné dans son rapport précédent, la démonstration de sûreté à long terme devient alors plus délicate du fait même de la

localisation en subsurface. En effet, et contrairement à un stockage géologique profond, un stockage de subsurface peut être assujéti à des variations géoclimatiques susceptibles d'altérer sa capacité d'isolement.

Avant 50 000 ans, la vérification des fonctions de sûreté repose sur une approche classique : scénario d'évolution naturelle, scénario d'évolution altérée, scénario d'intrusion humaine involontaire.

Au-delà de 50 000 ans, les incertitudes liées à l'évolution du site de stockage sont trop grandes pour que l'approche classique puisse être employée, en raison de l'incertitude sur l'évolution climatique et son impact sur la géomorphologie sur le territoire français. L'approche retenue par l'Andra repose alors sur l'utilisation de scénarios conventionnels, prenant en compte les évolutions du climat et l'utilisation du territoire, au regard des caractéristiques géologiques du site.

Ces divers scénarios jouent un rôle central pour la démonstration de sûreté, et donc sur la détermination de la capacité radiologique maximale du stockage. La communauté internationale a mené une réflexion sur les enjeux liés à l'élaboration de scénarios destinés à la démonstration de sûreté, s'agissant des stockages en surface et en subsurface. L'utilisation de scénarios, qu'ils soient déterministes ou probabilistes, est une pratique reconnue internationalement. Les scénarios déterministes tiennent compte des incertitudes essentiellement liées aux évolutions attendues et potentielles à long terme. Certains pays assignent une probabilité aux conséquences induites par les événements représentés dans les scénarios déterministes, ce qui permet une approche par risque. Il devient alors possible d'exclure *a priori* certains scénarios dont l'occurrence est très faible ou l'impact sur la sûreté négligeable.

La Commission considère qu'un degré d'approche probabiliste intégré à la démarche déterministe permettrait de relativiser les conséquences de certains scénarios extrêmes.

Dès lors que les incertitudes sont trop grandes, l'approche probabiliste permet d'établir des probabilités d'occurrence d'événements critiques pour la sûreté. Cela permet d'en apprécier les conséquences et en particulier de s'assurer du respect d'un niveau de dose calculé selon un scénario conventionnel auquel se rattache un risque d'exposition accepté. Une telle démarche n'est possible que si la probabilité d'occurrence d'un événement peut être raisonnablement estimée ou bornée. Sa pertinence repose donc sur la capacité à calculer de façon robuste des probabilités d'occurrence très faibles.

La Commission rappelle que les approches probabilistes, permettant de déterminer la sécurité et la sûreté de fonctionnement de systèmes ou d'ouvrages, sont largement employées dans divers secteurs industriels (ouvrages d'art, domaine spatial, transports, ...) et dans le domaine du nucléaire dans plusieurs autres pays. La capacité à calculer de façon rigoureuse des probabilités, et en particulier de très faibles probabilités, est un enjeu scientifique d'importance. Dans le contexte des FAVL, la Commission encourage les acteurs de la recherche à investir ce sujet.

2.2.3 Le projet de centre de stockage étudié par l'Andra

L'Andra étudie depuis 2013 la possibilité de réaliser un stockage pour des déchets FAVL sur un site localisé dans la communauté de communes de Vendevre-Soulaines, choisi à la suite d'une consultation avec les localisations possibles présentant des conditions géologiques favorables. À la suite d'un premier échange avec l'ASN en 2015, les travaux menés par l'Andra dans les quatre

années qui suivirent ont retenu une profondeur de 30 m au toit du stockage, laquelle devra être justifiée vis-à-vis de l'aléa érosif et de scénarios d'intrusion humaine involontaire.

Les études en cours concernent les enjeux environnementaux, les contraintes réglementaires et les techniques de construction du stockage. Leurs résultats visent à :

- définir les principales options techniques et de sûreté du stockage sur le site de Vendeuve-Soulaines ;
- proposer une démarche de sûreté spécifique aux enjeux associés à un stockage de déchets FAVL à faible profondeur ;
- apporter des éléments de démonstration concernant la sûreté d'un tel stockage de déchets FAVL à faible profondeur ;
- évaluer les déchets candidats à ce stockage, pour permettre ultérieurement de définir un inventaire pour le site de Vendeuve-Soulaines en articulation avec une stratégie globale de gestion des déchets FAVL.

La Commission note qu'il est probable que tous les déchets FAVL ne pourront pas être admis sur le site pressenti. La Commission souligne que la qualification d'un premier site, même limité à certains types de déchets FAVL, serait déjà un progrès significatif.

Dans une feuille de route stratégique transmise à la DGEC en octobre 2022, l'Andra indique que les résultats issus de ces études seront collectés dans un dossier qu'elle transmettra à l'ASN d'ici la fin de l'année 2023. Ce dossier permettra de conclure sur les types de déchets que le site est susceptible d'accueillir en se fondant sur l'évaluation de sûreté à long terme du stockage, et d'analyser les options d'implantation du stockage sur le site choisi.

24

La Commission demande à l'Andra de lui présenter le contenu du dossier 2023 et les suites qu'elle entend lui donner en vue d'aboutir à un dossier d'options de sûreté (DOS).

Au vu des travaux présentés par l'Andra à ce jour, la Commission a d'ores et déjà identifié trois points de vigilance. Le premier est lié à la proximité de l'aquifère par rapport au site choisi. Il requiert un argumentaire détaillé quant à l'absence de migration du chlore ³⁶Cl présent dans les graphites et du technétium ⁹⁹Tc présent dans les enrobés bitumés. Le deuxième est lié au gonflement éventuel des colis d'enrobés bitumés, qui pourrait poser des problèmes spécifiques dans le cas d'un stockage de subsurface. Le troisième est lié à la définition de scénarios conventionnels permettant de conduire l'étude de sûreté à très long terme (au-delà de 50 000 ans).

2.3 DÉCHETS DONT LA SOLUTION DE STOCKAGE EST EN PHASE D'EXAMEN PAR LES AUTORITÉS

Les études et recherches concernant le stockage géologique des déchets HAVL et MAVL ont été conduites depuis plus de 30 ans. Ces travaux ont débouché en janvier 2023 sur le dépôt de la demande d'autorisation de construction (DAC) de Cigéo, un stockage géologique localisé à la frontière de la Meuse et de la Haute Marne à proximité du laboratoire souterrain et dans la même couche argileuse du Callovo-Oxfordien (Cox). Ce laboratoire a permis d'acquérir les données sur les matériaux et la migration *in situ* dans le Cox et de vérifier l'emploi de certaines méthodes constructives pour les ouvrages souterrains dans des conditions identiques à celles prévues pour Cigéo.

La demande d'autorisation de création présente la conception de référence d'un stockage qui devrait posséder toutes les propriétés requises pour accueillir un inventaire de déchets qui est bien

défini : il s'agit de l'inventaire de référence constitué des déchets HAVL et MAVL déjà produits et à venir provenant de l'ensemble des installations construites actuellement. Sont également prévus dans cet inventaire les déchets provenant de l'EPR de Flamanville, du réacteur expérimental Jules Horowitz et du réacteur de fusion ITER. S'agissant du parc électronucléaire actuel, les déchets à stocker correspondent à 50 années de fonctionnement.

2.3.1 Instruction de la DAC par la Commission

La demande d'autorisation de création est un corpus de documents de plus de 10 000 pages. Son instruction durera entre trois et cinq ans. Conformément aux dispositions du code de l'environnement, la Commission devra rendre un rapport sur cette demande. Son rapport, accompagné de l'avis de l'ASN et des avis des collectivités territoriales concernées, sera transmis au Parlement. Ces documents figureront dans le dossier de l'enquête publique préalable à un éventuel décret d'autorisation de création.

La Commission produira un avis sur les fondements scientifiques qui ont permis à l'Andra de concevoir le stockage, de le dimensionner, d'en démontrer la sûreté en exploitation et à long terme, et enfin d'en évaluer l'impact sur l'environnement.

Pour cela, la Commission s'appuiera notamment sur les résultats présentés au cours de ses auditions passées, en tant que de besoin lors d'auditions à venir, et sur tous les documents produits par l'Andra au cours de cette instruction. Ainsi, des auditions spécifiques et thématiques de l'Andra pourront débuter dès cette fin d'année.

2.3.2 Au-delà de la solution proposée dans la DAC : études et recherches en cours

L'Andra poursuit des études qui n'ont pas pour objectif d'apporter de nouveaux éléments à la démonstration de la sûreté du stockage. Les principaux travaux menés par l'Andra sont décrits en annexe 6. La Commission retient deux sujets particuliers. Le premier concerne l'utilisation de nouveaux outils pour la surveillance du stockage en exploitation. Le second concerne l'emploi de l'intelligence artificielle pour la simulation numérique, la robotique, et le traitement des grandes masses de données qui proviendront de la surveillance comme de la construction de l'ouvrage.

La Commission s'interroge sur la manière dont les nombreux résultats de mesure seront exploités sur une durée séculaire. Cependant, une doctrine précise d'exploitation de ce cumul de données ne lui a pas été présentée.

L'appel à projets « solutions innovantes pour la gestion des matières et déchets radioactifs, et la recherche d'alternatives au stockage géologique profond » a été lancé dans le cadre de France Relance avec l'appui technique de l'Andra (voir annexe 6). Ces projets ont démarré cette année et la Commission examinera les résultats de ces études dès que l'Andra le jugera possible.

2.3.3 Le stockage des fûts d'enrobés bitumés

Selon l'inventaire 2023, il y aurait un peu plus de 30 000 fûts d'enrobés bitumés (FEB) MAVL à stocker. Les enjeux majeurs pour le stockage des enrobés bitumés sont le risque incendie, le risque d'explosion (Atex) lié à la radiolyse du bitume qui dégage de l'hydrogène, et la reprise en eau des bitumes provoquant un gonflement qui pourrait induire à très long terme une action mécanique sur le Cox.

Les fûts entreposés au CEA à Marcoule sont anciens et nécessitent d'être reconditionnés dans des fûts en acier afin d'être placés dans de nouvelles installations d'entreposage. Cette opération, en

cours, est l'occasion de procéder à leur caractérisation par échantillonnage. Les calendriers de reprise permettent de procéder à cette caractérisation de façon optimale, en supposant une uniformité de la composition des fûts par cycle mensuel de production, hypothèse que confirment les mesures réalisées jusqu'ici.

Le programme Babylone (associant le CEA, EDF, Orano et l'Andra) a été lancé il y a deux ans et vise à répondre à l'ensemble des questions sur le stockage des FEB posées par l'ASN, l'ASND et la revue internationale effectuée en 2019. L'objectif reste le stockage en l'état des FEB dans un alvéole aussi standard que possible. Babylone, dont l'achèvement est prévu fin 2026, comporte trois volets :

- volet 1 : maîtrise du domaine de composition et robustesse des analyses de réactivité ;
- volet 2 : maîtrise des effets d'échelle et des effets du vieillissement (irradiation) ;
- volet 3 : comportement à long terme en situation de stockage, gonflement sous reprise d'eau.

L'examen du calendrier global du projet Babylone montre que les courbes enveloppes de réactivité du bitume devraient être obtenues fin 2023. La synthèse du comportement thermique des enrobés est attendue un an après environ pour la grande majorité des déchets, et enfin la synthèse générale sur le comportement thermique des enrobés, y compris à l'échelle 1, serait disponible à la fin du projet ou en début 2027.

La Commission souhaite que les résultats de ce programme lui soient présentés à chacun de ces jalons.

Selon la DAC, il n'est pas envisagé de stocker des fûts de déchets bitumés avant 2050, après la fin de la phase industrielle pilote. L'Andra retient deux modes de stockage possible dans le dossier de DAC sans proposer de choix à ce stade.

Le premier mode est un stockage sans traitement préalable des déchets dans 8 alvéoles. Les FEB seraient placés dans des conteneurs renforcés vis à vis de l'incendie, agencés selon deux niveaux dans un alvéole (au lieu de trois pour les autres types de déchets). Les alvéoles seraient aménagées afin de faciliter la reprise des colis en cas d'incendie et seraient équipées de dispositifs renforcés de détection et de lutte contre l'incendie. Les simulations des deux agressions thermiques dimensionnantes (incendie interne d'un colis et incendie externe) ont été réalisées et les résultats sont satisfaisants. Selon l'Andra, en cas d'incendie externe, la température des fûts bitumés reste inférieure à 50°C et en cas d'incendie interne d'un colis, la température du colis placé au-dessus, le plus critique, n'excède pas 100°C.

La Commission constate que les spécifications utilisées pour vérifier la résistance à l'incendie sont très prudentes. Les résultats du programme Babylone devraient permettre de mieux apprécier les marges de sécurité.

Le second mode de stockage serait appliqué si une neutralisation préalable des déchets bitumés était décidée. Dans ce cas, 4 alvéoles au plus seraient requis pour stocker les déchets ultimes.

La poursuite des travaux relatifs à la neutralisation des fûts d'enrobés bitumés fait partie des recommandations de la revue internationale et de l'ASN. Ces études constituent le quatrième volet du programme de recherche Babylone. La Commission s'étonne que ce volet n'apparaisse pas dans les travaux qui lui ont été présentés. Elle demande qu'un point d'étape lui soit communiqué.

Par ailleurs, l'Andra poursuit ses développements sur les conteneurs de déchets MAVL fabriqués en béton. Ils sont destinés à préparer leur industrialisation et à optimiser les coûts de production. Ces essais sont directement en relation avec le stockage des FEB. Les formulations du béton sont améliorées pour accroître la résistance au feu en incorporant des fibres de polypropylène. Ces conteneurs font l'objet de divers essais, dont des essais de résistance à un feu externe et à une explosion interne. Des essais d'évacuation des gaz produits par les déchets (hydrogène dû à la radiolyse dans le cas des bitumes) sont aussi menés. Ces travaux vont se poursuivre pendant l'instruction de la DAC.

Enfin, les travaux présentés à la Commission ont concerné le volet 3 du projet Babylone ainsi que des études sur le comportement des conteneurs MAVL en situations complexes qui auront une utilité pour le stockage de ces déchets. Après fermeture du stockage, les bitumes, au contact de l'eau présente naturellement dans les argiles, vont gonfler, ce qui pourrait induire à long terme une surpression à l'intérieur des alvéoles de nature à endommager la roche autour du stockage. Les calculs de l'Andra ont pour l'instant été effectués avec des hypothèses très conservatives sur le gonflement des bitumes : ils montrent un endommagement limité du Cox. En collaboration avec EDF, l'Andra développe des modèles et des expérimentations visant à évaluer avec plus de précision ce gonflement et ainsi à mieux connaître les marges de sécurité à long terme.

2.4 LE STOCKAGE DES DÉCHETS TFA : UNE FILIÈRE OPÉRATIONNELLE

Les déchets TFA représentent environ 2 300 000 m³ à l'horizon 2100 et proviennent pour la majorité d'entre eux des opérations d'assainissement et de démantèlement des installations nucléaires. Ces dernières sont ralenties actuellement du fait de l'absence de filière de gestion pour les déchets FAVL qu'il convient d'évacuer avant de procéder au démantèlement. Par ailleurs, la prolongation de la durée de vie des réacteurs électronucléaires en fonctionnement et le report des opérations d'assainissement et de démantèlement associées différeront les besoins de stockage de déchets TFA.

Ces déchets sont constitués de métaux, de gravats et d'effluents liquides. Actuellement, 38 000 m³ de déchets TFA sont produits annuellement. Une partie est incinérée (effluents liquides) et 24 000 m³ de déchets solides sont stockés au CIREs chaque année. La filière de stockage des déchets TFA est donc opérationnelle. Les enjeux actuels portent sur les capacités de stockage disponibles, avec la nécessité de prévoir des extensions, et sur la valorisation éventuelle des déchets métalliques.

2.4.1 L'extension des capacités de stockage

Le CIREs dont la capacité actuelle est d'environ 644 000 m³ devrait être saturé d'ici moins de dix ans. Une première étape est donc d'accroître ses capacités et d'augmenter la densité des déchets stockés (compaction, fragmentation, ...). C'est l'objet du projet ACACI qui devrait permettre de prolonger de 10 à 15 ans l'exploitation du CIREs en faisant passer sa capacité à 950 000 m³. Le CIREs étant une ICPE, l'Andra a déposé une demande d'autorisation environnementale pour son extension en avril 2023, étape préalable à une autorisation décidée par arrêté préfectoral. Selon l'Andra, cette extension devrait entrer en exploitation d'ici 2029.

L'augmentation de la capacité du CIREs donne une dizaine d'années de plus pour planifier de nouvelles capacités de stockage. En effet, le CIREs ne pourra accueillir qu'un peu moins de la moitié des déchets TFA figurant à l'inventaire national. Si certains déchets pourraient être valorisés, il n'en reste pas moins que de nouvelles capacités seront nécessaires. Cet objectif peut être atteint de diverses façons : en créant un nouveau centre de stockage centralisé ou en créant plusieurs centres de stockage décentralisés sur les sites de production des déchets. Ces derniers éviteraient le transport de grandes quantités de déchets. L'Andra étudie une solution équilibrée entre gestion des capacités de stockage des déchets et limitation des transports.

L'étude du stockage décentralisé des blocs sodés de Creys-Malville a été prise comme exemple dans le cadre du PNGMDR : ces blocs sont issus de la transformation des 5 500 tonnes de sodium utilisées comme fluide caloporteur dans le RNR Superphénix. Il s'agit de 38 000 blocs de béton

d'un mètre cube chacun. L'activité spécifique des blocs est inférieure à 100 Bq/g. Pour réaliser le stockage sur le site de Creys-Malville, la réglementation impose une couche de terrain imperméable d'une épaisseur de 5 m, qui n'existe pas sur site. Il serait donc nécessaire d'excaver 250 000 m³ et d'importer 100 000 m³ de matériau pour éviter le transport des 38 000 m³ de blocs de béton vers un stockage centralisé. Le bilan est donc défavorable sur le plan des transports. Il démontre la nécessité d'envisager une plus grande diversité de solutions, sans se limiter à l'alternative entre un stockage centralisé et un stockage sur place.

L'Andra devait présenter des scénarios de gestion de ces déchets pour la fin de l'année 2022 (5^{ème} PNGMDR). Après une analyse multi-critères multi-acteurs qui serait conduite en 2023, et avis de l'ASN, un scénario global devrait être disponible en 2024.

La Commission observe que les incertitudes sur la durée de vie des réacteurs actuels et sur la valorisation des déchets sont importantes. Elles doivent être intégrées dans un scénario global de gestion des déchets TFA afin d'éviter tout blocage dans les démantèlements à venir.

2.4.2 La valorisation des déchets métalliques

Les textes réglementaires permettant une valorisation éventuelle de substances faiblement radioactives ont été publiés en février 2022. Leur mise en pratique est aujourd'hui limitée à la valorisation des métaux : aciers, plomb, cuivre. Seul le cas de la valorisation des aciers fait l'objet à ce jour d'études à un niveau industriel ; il s'agit du projet de technocentre sur un site proche de la centrale de Fessenheim.

Le technocentre devrait être une usine de 30 000 m² construite sur un site de 15 ha. Il s'agit d'une ICPE dont l'autorisation est espérée en 2027 pour une mise en service après 2031. L'installation est destinée à produire des lingots d'aciers utilisables par l'industrie conventionnelle, après décontamination, découpage et fusion dans un four à arc de gros éléments utilisés principalement dans les réacteurs électronucléaires. L'étape finale de fusion permet de séparer l'acier valorisable des radionucléides, ceux-ci étant piégés dans les laitiers et les filtres. L'enjeu principal est de vérifier le niveau de radioactivité de l'acier décontaminé. Pour cela, il faut identifier les radionucléides à mesurer, mettre au point les appareils permettant de mesurer leur activité et intégrer cette mesure dans un processus industriel traitant de grandes quantités de matière. Les travaux actuels prévoient une qualification de l'ensemble de cette chaîne en laboratoire, puis sur un prototype à l'échelle 1/10.

Les difficultés relatives à la mise au point à l'échelle industrielle de la chaîne de mesure de la radioactivité ont déjà fait l'objet de plusieurs recommandations. La Commission recommande en outre de procéder à un bilan radiologique quantitatif entrée-sortie de la chaîne de décontamination au titre du contrôle qualité.

2.5 LES ALTERNATIVES AU STOCKAGE DES DÉCHETS MAVL ET HAVL

La Commission considère qu'il n'y a pas lieu de remettre en cause le consensus scientifique international et qu'aucune solution d'entreposage ne peut constituer une alternative au stockage profond.

La transmutation ne permet pas de s'affranchir d'une installation de stockage géologique : celle-ci restera nécessaire pour gérer les déchets HAVL déjà vitrifiés, les déchets MAVL et enfin les déchets ultimes issus d'éventuelles opérations de séparation et de transmutation.

L'appel à projets du programme d'investissement France Relance porte sur des « solutions innovantes pour la gestion des matières et déchets radioactifs, et la recherche d'alternatives au stockage géologique profond ». Les projets présentés proposent en réalité des innovations permettant de diminuer le volume de déchets ou de changer leur type.

Par exemple, le projet REGAIN (REcyclage des GAInes Nucléaires) propose l'étude d'une solution alternative au stockage des coques et embouts des combustibles usés qui sont des déchets MAVL. Leur décontamination permettrait d'en stocker une partie dans des centres de stockage à vie courte (CSA, CSTFA) et le reste dans un centre de stockage FAVL.

Dans le cadre de cet appel à projets, quatre propositions lauréates ont trait aux « solutions alternatives au stockage géologique profond ». Elles s'intéressent à la transmutation des actinides mineurs selon deux approches : le développement de réacteurs à sels fondus brûleurs d'actinides (2 projets) et les réacteurs sous critiques pilotés par des accélérateurs de particules (2 projets).

Ces projets ne constituent pas de véritables alternatives au stockage géologique profond des déchets HAVL : ils ne traitent ni les produits de fission, ni la totalité des actinides. En tout état de cause les déchets déjà vitrifiés ne pourront pas être repris.

Toutefois, en ciblant la réduction de l'inventaire en actinides mineurs, ces projets visent à diminuer la charge thermique des déchets ce qui permettrait de densifier le stockage.

Le stockage géologique étant une ressource rare, la Commission estime que toute recherche pouvant ouvrir des voies vers une diminution de l'emprise des déchets HAVL dans un stockage géologique est pertinente.

Le projet ISAC est l'un des deux projets liés au développement de réacteurs à sels fondus. Il rassemble le CEA, Orano, EDF, FRAMATOME et le CNRS. ISAC, dans un contexte international, vise à étudier la faisabilité de la transmutation d'actinides dans des réacteurs à sels fondus à neutrons rapides (MSFR), à caractériser les verrous de cette filière de réacteurs. Il doit renforcer la R&D, y compris expérimentale, sur deux principaux sujets : la chimie des actinides dans le sel et la corrosion des matériaux. Le projet comprend notamment la réalisation de nouvelles installations expérimentales au CEA et au CNRS.

La Commission observe que ce projet fait progresser la recherche fondamentale sur la chimie des actinides en milieu sels fondus. Le soutien à la recherche fondamentale dans le domaine nucléaire et à la formation par la recherche répond à des demandes récurrentes de la Commission.

CHAPITRE III : LES RÉACTEURS INNOVANTS ET LEURS COMBUSTIBLES

3.1 INTRODUCTION

Par la lettre datée du 3 mars 2022, l'OPECST a souhaité que la Commission « évalue dans le cadre de ses prochains travaux l'impact des réacteurs innovants [...] sur le cycle des matières et des déchets radioactifs ». La Commission a abordé cette question dès son voyage d'étude en Amérique du Nord de juin 2022 (le compte-rendu de cette mission est accessible via le lien <https://www.cne2.fr/rapport-de-mission-en-amerique-du-nord/>). Ce voyage d'étude lui a permis de rencontrer des représentants de la société Terrapower qui développe deux projets de petits réacteurs avancés à neutrons rapides, l'un refroidi au sodium (Natrium) et l'autre à sels fondus (MCFR). Elle a également entendu des représentants de la société Terrestrial qui développe également un réacteur à sels fondus, mais à spectre thermique (IMSR). La Commission a conduit ensuite des auditions consacrées à l'examen de plusieurs projets français de réacteurs innovants :

- le projet de petit réacteur modulaire à eau pressurisée et neutrons thermiques NUWARD ;
- le projet de réacteur à gaz haute température et neutrons thermiques proposé par Jimmy Energy ;
- le projet de réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium HEXANA ;
- le projet de réacteur à neutrons rapides refroidi au plomb proposé par Newcleo ;
- le projet de réacteurs à sels fondus et à neutrons rapides proposé par NAAREA ;
- le projet de réacteur Chartreuse P utilisant la fusion nucléaire proposé par Renaissance Fusion ;
- le projet de système hybride sous critique piloté par accélérateur START proposé par Transmutex.

Enfin la Commission a eu des entretiens avec trois sociétés étrangères qui ont présenté leurs projets :

- le réacteur à gaz haute température à neutrons thermiques Xe-100 de la société X-energy (États-Unis) ;
- le réacteur à neutrons rapides SEALER-55 S refroidi au plomb de la société Leadcold (Suède) ;
- le microréacteur eVinci à neutrons thermiques refroidi par caloconducteurs de la société Westinghouse (États-Unis).

Ces projets concernent tous des réacteurs de puissance réduite à très réduite par rapport aux réacteurs du parc électronucléaire français actuel. Certains sont destinés à produire de l'électricité en particulier dans des situations mal adaptées à des réacteurs de forte puissance : remplacement de centrales au charbon de puissance modérée, alimentation de sites industriels ou de zones d'habitation éloignées d'un réseau électrique par exemple. D'autres ont pour objet la fourniture de chaleur en particulier pour l'industrie ou encore la production d'hydrogène. D'autres enfin visent principalement la transmutation des actinides produits par l'exploitation de centrales électrogènes. Les différents usages peuvent éventuellement être combinés.

L'annexe 7 récapitule les caractéristiques principales de ces projets telles qu'elles ont été communiquées à la Commission par les entreprises qui les portent. Il est à noter que certains sont candidats dans le cadre du plan de financement France 2030. La Commission ne participe pas à leur évaluation. Pour autant, on trouvera au paragraphe 2.6 ci-dessous une liste de critères qu'il lui paraît utile de prendre en considération dans le cadre de cette évaluation.

La Commission recommande d'envisager l'intégration de réacteurs innovants dans le parc français de manière holistique, incluant notamment l'approvisionnement en matières fissiles nécessaires, la production du combustible, la gestion du combustible usé, le démantèlement des réacteurs, la gestion des déchets d'exploitation et de démantèlement. En particulier, la Commission recommande que les projets de réacteurs qui bénéficieront d'un financement public de France 2030 comprennent obligatoirement une étude précise sur tous ces enjeux.

3.2 LES TECHNOLOGIES DE RÉACTEURS INNOVANTS ET LEURS MATURITÉS

Les projets que la Commission a examinés exploitent une gamme assez large de technologies de réacteurs, dont les niveaux de maturité sont variés. Ces projets sont présentés ci-dessous, dans l'ordre décroissant de maturité technologique selon l'appréciation de la Commission. Les conclusions de son rapport n°16 de juin 2022 restent valables sur ce point.

- La technologie des réacteurs pressurisés à eau légère, qui est utilisée pour plusieurs projets de petits réacteurs modulaires (dont NUWARD), est la plus mature. Pour ces projets, l'enjeu principal est de réduire les délais et les coûts de construction grâce à une fabrication modulaire, le plus possible en usine, réalisée en série.
- Les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium ou au plomb s'appuient sur un acquis technologique solide, en particulier en France et en Russie pour les réacteurs refroidis au sodium et en Russie uniquement pour les réacteurs refroidis au plomb. Ces projets visent principalement la fourniture d'électricité. Ils peuvent utiliser du plutonium et transmuter les actinides mineurs.
- La technologie des réacteurs à gaz à haute température est envisagée pour différents projets qui visent principalement à la fourniture de chaleur pour l'industrie. Elle s'appuie sur un retour d'expérience limité, issu essentiellement des pays anglo-saxons, de l'Afrique du Sud, de la Chine et du Japon.
- Les réacteurs à sels fondus utilisant, soit des fluorures en spectre thermique, soit des chlorures en spectre rapide, ont pour objectif la fourniture d'électricité. Les seconds peuvent aussi utiliser du plutonium et transmuter les actinides mineurs. Même si cette technologie a fait l'objet de quelques réalisations anciennes principalement aux États-Unis, et d'assez nombreuses études dans le cadre du forum international génération IV, son niveau de maturité est jugé par la Commission encore modeste.
- Enfin, les systèmes hybrides sous-critiques pilotés par des accélérateurs de particules, qui ont pour objectif de brûler du plutonium et des actinides mineurs, sont encore au stade d'expérimentation de sous-systèmes.
- Quant aux réacteurs visant à utiliser la fusion nucléaire pour la production industrielle d'électricité, ils sont au stade du concept.

La Commission note qu'un nombre significatif de projets de réacteurs à neutrons rapides sont conduits dans plusieurs pays, ce qui laisse envisager la mise en service de tels réacteurs bien avant la fin du siècle.

La Commission observe que les promoteurs des différents projets annoncent des calendriers assez voisins (mise en service au début des années 2030 voire avant 2030), malgré des niveaux de maturité technologique significativement différents entre les projets. Pour autant, la maturité d'une technologie peut être augmentée rapidement, à condition d'y consacrer des moyens humains et financiers suffisants.

La Commission recommande que l'analyse détaillée des difficultés scientifiques et technologiques à surmonter soit bien intégrée dans l'évaluation des projets qui bénéficieront d'un financement public. Cette analyse devra prendre en compte la crédibilité du calendrier des travaux de R&D envisagés vis-à-vis des moyens humains et financiers prévus.

3.3 LES COMBUSTIBLES DES RÉACTEURS INNOVANTS

Les projets de réacteurs à l'étude nécessitent des combustibles différents, qui présentent des enjeux différents en termes de R&D.

Les SMR de type REP utilisent un combustible très proche de celui des réacteurs actuels (UOX). Les différences sont un enrichissement légèrement plus élevé et les dimensions des éléments combustibles.

Les réacteurs à neutrons rapides (Na ou Pb) sont susceptibles d'utiliser plusieurs types de combustible : en France, on privilégie le MOX-RNR (issu du retour d'expérience de Superphénix en particulier). Dans d'autres pays, on recherche des combustibles présentant une densité de matière fissile plus élevée. Par exemple, aux États-Unis, on envisage un combustible métallique ; en Suède, un combustible nitrure est en développement.

Les réacteurs HTGR utilisent un combustible TRISO dont la fabrication nécessite de l'uranium enrichi à près de 20% (HALEU). C'est aussi le cas pour le MMR refroidi par caloports. Cette matière plus fortement enrichie que le combustible traditionnel était jusqu'à une époque récente principalement importée de Russie. Sa disponibilité est un enjeu majeur pour ces projets.

Les réacteurs à sels fondus utilisent le fluide à la fois comme combustible et comme caloporteur. Les réacteurs à neutrons thermiques utilisent des fluorures associés au HALEU. Les réacteurs à neutrons rapides utilisent des chlorures associés au HALEU ou au Pu. Ces combustibles sont encore au stade des études exploratoires.

Les questions scientifiques et technologiques associées à la fabrication des différents combustibles ont été abordées au chapitre 1.

La Commission recommande que les projets de réacteurs qui bénéficieront d'un financement public comprennent obligatoirement une étude précise de l'approvisionnement du combustible nécessaire. Les choix qui seront faits en matière de réacteurs innovants devront en effet tenir compte de la disponibilité du combustible. Il est souhaitable de considérer cette question à l'échelle du parc complet de réacteurs nucléaires français et de préserver la souveraineté tant de l'approvisionnement des matières nucléaires que des capacités industrielles de fabrication des combustibles. En effet, la dépendance d'une partie du parc à un combustible importé constituerait un risque qui ne doit pas être sous-estimé.

3.4 LES DÉCHETS PRODUITS PAR LES RÉACTEURS INNOVANTS

Globalement, la question des déchets n'est pas (ou très peu) traitée par les projets de réacteurs portés à la connaissance de la Commission. Aux États-Unis, la loi dispose que la gestion des déchets relève du *Department of Energy* (DOE) et les entreprises se préoccupent uniquement du développement du réacteur en vue de le mettre sur le marché le plus vite possible. Au mieux les combustibles usés sont parfois évoqués, les projets se limitant à prévoir un entreposage en

attendant que l'administration dispose d'un stockage pérenne. En Europe, la directive 2011/70/EURATOM du 19 juillet 2011, transposée dans l'article L 542-1 du Code de l'environnement, dispose que les producteurs de combustibles usés et de déchets radioactifs sont responsables de ces substances. Pourtant, les questions posées par la Commission ont montré que la nature et la destination des déchets ne sont pas vraiment étudiés dans les projets de SMR européens.

La question des déchets comporte trois volets principaux :

- les combustibles usés ou les déchets ultimes issus de leur retraitement,
- les déchets d'exploitation (effluents, résines, etc.),
- et les déchets produits par le démantèlement du réacteur en fin de vie et l'assainissement du site.

La stratégie de la France consiste à traiter les combustibles usés pour réduire la quantité et la nocivité des déchets ultimes à stocker, ce qui permet de valoriser le plus possible les matières nucléaires. Les combustibles des réacteurs innovants étant souvent significativement différents de ceux des réacteurs du parc électronucléaire français actuel, la mise en service en France de tels réacteurs nécessitera de définir les modalités de leur prise en compte dans le système global de gestion des combustibles usés incluant les installations industrielles du cycle : entreposage, traitement et stockage.

La Commission recommande que tout projet de réacteur bénéficiant de fonds publics produise obligatoirement une étude sur les besoins d'entreposage intérimaire et une étude sur l'aptitude au retraitement du combustible usé, incluant l'impact sur les usines du cycle. En l'absence de retraitement, l'impact de la prise en compte du combustible usé dans les installations de stockage devra être évalué.

Par ailleurs, la loi impose à l'exploitant de provisionner la charge financière du démantèlement. Il est donc indispensable, dès la demande d'autorisation de création, de recenser les déchets produits, d'évaluer leur quantité, et d'identifier leur filière de gestion. Or, à ce stade, aucun projet de réacteur examiné par la Commission ne comporte d'étude sérieuse sur les déchets produits par leur démantèlement.

La Commission s'est intéressée à la controverse apparue il y a un an entre scientifiques américains sur la quantité de déchets nucléaires qui seraient produits par des petits réacteurs modulaires, comparée à celle des réacteurs de puissance. En mai 2022, un article est paru dans *Proceedings of National Academy of Sciences*, sous le titre « *Nuclear waste of small modular reactors* », selon lequel de petits réacteurs modulaires produiraient une quantité de déchets considérablement supérieure à celle produite par les réacteurs électrogènes de plus grande taille actuels. Cette conclusion est démentie par un rapport publié par Argonne National Laboratory en novembre 2022 sous le titre « *Nuclear Waste attributes of SMR Scheduled for Near Term Deployment* » qui, après avoir examiné trois SMR en projet, de technologies différentes, conclut « qu'il ne semble pas y avoir de défi majeur pour la gestion des déchets de SMR par rapport à ceux des REP ». Une prise de position sur le sujet de la *National Academy of Sciences* est attendue.

Constatant l'absence d'unanimité sur cette question, comme de données objectives sur les projets qu'elle a examinés, la Commission recommande que tout projet de réacteur comporte obligatoirement une étude précise des déchets qui seront produits au cours de son exploitation et lors de son démantèlement, ainsi que des filières de gestion associées.

3.5 LES PROCESSUS DE CERTIFICATION

Les différents porteurs de projets auditionnés par la Commission ont pour la plupart engagé des démarches de certification, à des stades généralement préliminaires, avec les autorités de sûreté de leurs pays d'origine et parfois de clients export potentiels. L'autorité de sûreté canadienne, en particulier, met en œuvre un processus dit *Vendor Design Review* dans le but d'aider les concepteurs à construire leur démarche de sûreté. Ce processus, facultatif, est distinct de la démarche de certification officielle. De même la NRC américaine se présente explicitement comme un facilitateur des projets conduits aux États-Unis. L'autorité française de sûreté nucléaire, de son côté, a une démarche assez proche de celle de son homologue canadien avec les dossiers d'options de sûreté.

Pour beaucoup de technologies avancées, l'approche de sûreté est à construire. En effet les référentiels actuellement utilisés concernent principalement les réacteurs à eau légère.

La Commission recommande que l'État veille à ce que l'Autorité de sûreté nucléaire dispose des moyens nécessaires pour exercer sa mission sur les réacteurs innovants dont le déploiement sera envisagé en France.

3.6 CRITÈRES UTILES POUR L'ÉVALUATION DES PROJETS DE NOUVEAUX RÉACTEURS

La Commission n'a pas vocation à intervenir dans la sélection des projets de réacteurs innovants candidats à l'appel à projets France 2030. Pour autant, à la lumière des présentations qui lui ont été faites depuis un an sur près d'une quinzaine de projets de nouveaux réacteurs français et étrangers, elle a identifié plusieurs points qu'il lui paraît utile de ne pas négliger dans ce travail d'évaluation. Le premier paragraphe ci-dessous s'intéresse aux aspects relevant de la compétence de la Commission. Le second paragraphe indique d'autres critères que la Commission estime utile de considérer, même s'ils ne relèvent pas explicitement de son mandat.

35

3.6.1 Critères relevant directement du mandat de la Commission

Combustibles nucléaires

- Besoins en matières nucléaires (volume, taux d'enrichissement) pour la fabrication des combustibles et disponibilité de ces matières ;
- Utilisation ou non pour la fabrication du combustible de matières nucléaires issues du retraitement de combustibles usés ;
- Disponibilité du combustible :
 - o en cas d'utilisation de combustible déjà qualifié : existence d'une filière de fabrication du combustible à l'échelle industrielle en France ou, à défaut, existence d'une filière à l'étranger et évaluation de la sécurité de l'approvisionnement ;
 - o en cas d'utilisation d'un combustible non encore qualifié, maturité de la conception du combustible, identification des verrous technologiques éventuels et plan de qualification (dont accès aux installations nécessaires), identification d'une filière de fabrication.
- Cas spécifique des combustibles porteurs d'actinides mineurs : maturité de la qualification de l'ensemble de la chaîne de production (dont séparation des matières nucléaires dans le combustible usé contenant les actinides mineurs, et fabrication du combustible) ;
- Caractère proliférant ou non du combustible.

Aval du cycle du combustible

- Inventaire des radionucléides contenus dans le combustible utilisé (en particulier pour les combustibles présentant un taux de combustion élevé) ;
- Caractère retraitable ou non du combustible utilisé :
 - o si le combustible utilisé est retraitable, intégration dans les usines de retraitement françaises et besoin ou non de développer des procédés spécifiques ;
 - o si le combustible n'est pas retraitable, exutoires envisagés.

Déchets nucléaires produits

- Déchets d'exploitation : type et quantité de déchets produits, existence de filières adaptées ;
- Déchets de démantèlement (cuves, internes de cuve, matériaux de structure...) :
 - o type (dont inventaire des radionucléides) et quantité de déchets produits ;
 - o prise en compte dès la conception de la maîtrise des déchets de démantèlement (type de matériaux, quantité, maintenance) ;
 - o existence de filières adaptées pour la gestion des déchets.

3.6.2 Autres critères jugés pertinents

Réacteurs

- Maturité technologique (TRL) des principaux composants et identification des verrous technologiques restant à lever :
 - o inventaire des composants de TRL faible ;
 - o inventaire des verrous technologiques et, pour chacun d'eux, description des moyens envisagés (techniques, humains, financiers) envisagés pour les surmonter.
- Cœur du réacteur :
 - o fonctionnement du cœur (à neutrons thermiques ou rapides). Dans le cas d'un réacteur à neutrons rapides, fonctionnement en mode brûleur, iso-générateur, ou surgénérateur.

36

Référentiels de sûreté

- Existence de référentiels de sûreté adaptés au type de réacteur proposé ;
- Existence de démarches de *prelicensing* auprès de l'autorité de sûreté en France ou dans d'autres pays.

Calendriers des projets

- Crédibilité du calendrier de levée des verrous technologiques compte tenu des moyens prévus ;
- Jalon de dépôt du dossier d'autorisation (équivalent DAC) auprès de l'autorité de sûreté ;
- Jalon de mise en service du premier de série.

Financement et rentabilité économique

- Coûts d'investissement :
 - o coût d'investissement total.
- Coûts d'exploitation :
 - o durée d'exploitation ;
 - o sensibilité du coût d'exploitation au coût des combustibles ;
 - o coût du MWh produit (si le réacteur est utilisé pour produire de l'électricité) ;
 - o coût de démantèlement.
- Retour sur investissement pour l'industrie française :
 - o localisation prévue pour les moyens de production des produits vendus en France ;

- localisation prévue pour les moyens de production des produits vendus à l'exportation.

Souveraineté

- Répartition de la propriété intellectuelle relative au réacteur ;
- Disponibilité du combustible (matière et fabrication) ;
- Contribution au renforcement de la filière nationale.

3.7 CONCLUSION SUR LES RÉACTEURS INNOVANTS

La Commission constate le foisonnement des projets de réacteurs innovants et des technologies à l'étude. Il est très probable que cet éventail se réduira à relativement court terme, par la disparition de projets qui n'auront pas réussi à atteindre leurs objectifs techniques, à lever les fonds nécessaires pour les étapes concrètes de conception et qualification des réacteurs, ou à trouver leur place sur un marché concurrentiel et fortement influencé par des considérations de nature géopolitique.

En France, l'appel à projets en cours dans le cadre du programme France 2030 va contribuer à modeler le paysage industriel des nouveaux réacteurs. La Commission n'est pas partie prenante du processus de sélection des projets mais elle sera conduite à évaluer les projets retenus sous l'angle de la gestion des matières et des déchets radioactifs.

En tout état de cause, l'introduction de réacteurs de puissance réduite dans le parc français comporte des opportunités mais impose également que la prise en compte de leurs spécificités dans la gestion globale des matières et des déchets radioactifs à l'échelle du pays soit instruite sans tarder.

CHAPITRE IV : LES ENJEUX INTERNATIONAUX DU DÉPLOIEMENT DES PETITS RÉACTEURS MODULAIRES

La nécessité d'atteindre la neutralité carbone en 2060 est la conclusion principale du rapport spécial du GIEC publié en 2018 sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5°C. Cette conclusion est reprise par l'Union européenne qui s'est fixé un objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050.

La contrainte d'une limitation des émissions est donc structurante pour tous les scénarios prospectifs de production d'énergie. Quel que soit le scénario envisagé, l'électricité joue un rôle central dans la décarbonation. Ainsi les besoins mondiaux en électricité devraient augmenter rapidement, avec un recours massif aux renouvelables et au nucléaire ; la part du nucléaire se situe dans tous les scénarios autour de 10% de la production électrique mondiale en 2050.

Cette contribution de l'énergie nucléaire peut paraître modeste mais elle correspond à un doublement de la capacité de production nucléaire d'aujourd'hui. Les moyens à mettre en œuvre sont l'allongement de la durée opérationnelle des réacteurs existants, la construction de nouveaux réacteurs de grande puissance, le déploiement de petits réacteurs modulaires aussi connus sous l'acronyme anglais SMR (*small modular reactors*) ou AMR (*advanced modular reactors*) et le développement des applications non-électriques de l'énergie nucléaire (par exemple, production de chaleur, d'hydrogène, ...). Cela impose de maintenir un haut niveau de sûreté et de fiabilité les flottes actuelles et futures de réacteurs nucléaires.

Dans une vision à plus long terme, assurer la durabilité de l'énergie nucléaire et limiter la dépendance à l'uranium naturel, passe par le développement de réacteurs à neutrons rapides (RNR) et la fermeture du cycle du combustible, conduisant à la valorisation complète de la matière fissile.

4.1 POTENTIEL DE DÉPLOIEMENT DES PETITS RÉACTEURS MODULAIRES (SMR, AMR)

La transition énergétique implique une transformation rapide des systèmes énergétiques. Les SMR y ont un rôle à jouer car ils disposent de caractéristiques (puissance limitée, flexibilité, modularité de fabrication et de couplage de sous-ensembles, sûreté passive...) qui leur permettent de répondre à des besoins spécifiques.

Les SMR de 300 MWe peuvent remplacer aisément les centrales à charbon en fin de vie, étant donné le niveau de puissance souvent similaire, et participer ainsi à l'objectif de décarbonation du secteur électrique.

Les SMR peuvent également apporter la flexibilité nécessaire pour gérer le réseau électrique en compensant la variabilité des énergies solaire et éolienne, soit en faisant du suivi de charge, soit en offrant une capacité de stockage thermique. Ce faisant, ils évitent le recours à des centrales à gaz pour gérer l'intermittence, et contribuent à nouveau à l'objectif de décarbonation.

La modularité et la sûreté passive des SMR les positionnent favorablement pour des utilisations non-électrogènes : production d'hydrogène, source de chaleur pour l'industrie, chauffage urbain... Leur taille les rend aussi intéressants pour introduire l'énergie nucléaire décarbonée là où la demande est limitée ou dans des endroits isolés (îles, mines, petits réseaux...).

4.2 L'INTÉGRATION DES SMR DANS LA POLITIQUE ÉNERGÉTIQUE

Une maturité technologique démontrée et la conformité aux exigences de sûreté sont des prérequis à l'introduction de nouveaux réacteurs dans un mix énergétique. En plus de ces prérequis, l'introduction des SMR doit prendre en compte un environnement économique, sociologique et

technologique complexe et souvent évolutif². Une vision stable et à long terme du mix énergétique intégrant le nucléaire est également un point fondamental.

La logique de choix de site pour les SMR est différente de celle des grands réacteurs de puissance pour lesquels la disponibilité d'une source froide importante et l'éloignement des grandes agglomérations sont des critères essentiels. Le remplacement de centrales à charbon sur des sites existants, la production de chaleur pour l'industrie ou le chauffage urbain par exemple, ne s'inscrivent pas complètement dans cette logique, voire lui sont même opposés. Une interaction forte avec les communautés locales sera nécessaire lors des choix d'implantation des SMR, sans masquer les enjeux de colocalisation. L'expérience acquise dans les choix de sites pour les stockages de déchets radioactifs pourrait être valorisée.

Les applications non-électriques mettent en relation des acteurs aux cultures et visions industrielles différentes. Ces applications mettent l'accent sur la production de biens par l'industrie ou de services aux collectivités, qui ont une dynamique propre à laquelle les réacteurs devront pouvoir répondre. Il y a donc un enjeu de gestion d'interface que les acteurs devront résoudre. Les cultures de sûreté et de sécurité sont aussi différentes et devront être rendues compatibles aux niveaux réglementaire et de l'exploitation industrielle.

Actuellement, au moins 72 concepts de SMR sont à des stades divers de développement (AIEA 2020). La moitié de ces concepts sont basés sur la technologie actuelle (combustible oxyde et eau légère) avec un très grand retour d'expérience. Les autres concepts utilisent d'autres combustibles et caloporteurs (métaux liquides, gaz ou sels fondus). Ils bénéficient des recherches et développements passés mais ne possèdent pas le même niveau d'expérience réglementaire et opérationnelle, à l'exception de la filière RNR-Na qui dispose d'un REX d'environ 400 années cumulées. Ces 72 concepts sont soit portés par des industries possédant une longue expérience nucléaire, en Asie, en Russie et en Amérique du Nord, soit par des start-up essentiellement en Amérique du Nord et en Europe.

40

Les start-up sont pour la plupart créées par des acteurs nouveaux qui ne semblent pas encore familiers avec les procédures d'autorisation et les contraintes d'exploitation spécifiques au secteur nucléaire.

D'autre part, le modèle économique des SMR, dont la validité est à démontrer, repose sur l'effet de série et la modularité qui permettent de réaliser la fabrication en usine et facilitent l'assemblage sur site, réduisant ainsi la durée des chantiers et permettant un retour sur investissement plus rapide. Dans les conditions du marché, seul un petit nombre de concepts pourront donc émerger du foisonnement actuel. L'accès à un marché large des capitaux, non limité aux investisseurs institutionnels, implique une vision claire quant aux risques financiers encourus, la durée associée à la certification du concept en étant un à ne pas sous-estimer.

4.3 LE CADRE LÉGAL INTERNATIONAL ET EUROPÉEN

Le déploiement des SMR devra s'inscrire dans le cadre des instruments juridiques internationaux d'application relatifs à la sûreté et la sécurité, au système des garanties (non-prolifération), et à la responsabilité civile nucléaire (en cas d'accident grave) et des conventions internationales en matière d'environnement (convention d'Espoo) et de participation du public (convention d'Aarhus). La plupart de ces conventions ont été reprises dans le droit communautaire européen.

Ces conventions ont été élaborées dans un cadre général sans aborder les spécificités des SMR qui n'étaient pas développés industriellement à l'époque, ce qui ne les exclut néanmoins pas de leur champ d'application. L'applicabilité de ces conventions aux SMR doit donc être examinée au

² Pour plus d'informations, consulter *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments - A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) 2022 Edition*.

cas par cas. Ce travail a commencé dans les pays où le processus d'autorisation des SMR a été initié (États-Unis, Royaume-Uni...) car les autorités réglementaires et les développeurs ont besoin de sécurité juridique pour concrétiser leurs projets. Le sujet est également abordé au niveau international par l'AIEA, l'AEN et la Commission européenne (JRC 2022). Les premières analyses montrent que les instruments internationaux ne couvrent pas les SMR de façon cohérente et peuvent s'appliquer à tous les SMR mais parfois de façon partielle. Le cadre légal international applicable devra être revu et harmonisé pour être adapté aux SMR : le temps nécessaire pour adapter ce cadre international pourrait gêner le déploiement rapide des SMR.

4.4 SÛRETÉ, SÉCURITÉ ET NON-PROLIFÉRATION

Un déploiement de réacteurs nucléaires ne peut s'envisager que pour des concepts sûrs, sécurisés et non-proliférants : les nouveaux projets de réacteurs donnent l'opportunité d'intégrer ces trois aspects simultanément dès la conception.

Les risques inhérents aux SMR sont liés aux technologies mises en œuvre et au degré d'innovation qu'elles présentent : lorsque le degré d'innovation est élevé, les incertitudes liées aux connaissances des phénomènes physiques et chimiques en jeu et le retour d'expérience opérationnelle limité demandent une approche de sûreté adaptée sur laquelle les différentes autorités de sûreté compétentes devront s'accorder.

Le modèle économique des SMR repose sur leur haut degré de standardisation et l'effet de série résultant de la fabrication en usine d'importantes portions du réacteur y compris éventuellement le cœur. Il y a un découplage entre la fabrication des composants d'une part et leur assemblage sur site d'autre part. Cela implique que les concepts autorisés puissent être déployés sur site sans modification, sauf adaptation aux particularités de celui-ci, et que les différents composants soient acceptés tels que sortis d'usine, puis acheminés dans le respect des réglementations de transport, notamment en matière de sécurité et de non-prolifération.

Cette vision pose la question de l'organisation des procédures d'autorisation, de fabrication et de montage qui peuvent dépasser le périmètre légal de la compétence nationale. Chaque pays est responsable de la sûreté des installations nucléaires sur son territoire, il s'agit d'une responsabilité souveraine. Néanmoins les approches coopératives entre autorités de sûreté dès les étapes de conception permettent d'assurer une base de marché plus large à un concept donné. Ce type de coopération a été initié entre le Canada, les États-Unis et le Royaume-Uni d'une part, la France, la République Tchèque et la Finlande d'autre part. Cela nécessite une harmonisation des approches réglementaires et de leur application (codes et normes). Les agences internationales (AIEA, AEN) peuvent offrir un cadre neutre pour établir les bases d'une telle harmonisation.

En particulier, il est important de développer une approche commune pour intégrer la sûreté, la sécurité et la non-prolifération dès le stade de la conception si l'on veut éviter par la suite des mises à niveau coûteuses qui mettraient en péril l'intérêt économique des SMR ou simplement leur utilisation. De même, la prise en compte dès la conception du démantèlement des installations et des déchets produits peut être facilité par la modularité, la standardisation facilitant par ailleurs la mise au point des techniques de démantèlement.

4.5 LE CYCLE DU COMBUSTIBLE

Le déploiement des SMR se fera en concordance avec les cycles du combustible qui leur seront associés. La diversité des concepts de SMR actuellement en développement a conduit à envisager diverses options pour le combustible à utiliser ; les premiers réacteurs qui apparaîtront en série sur le marché imposeront de fait leurs concepts de combustible.

4.5.1 L'amont du cycle

a) Les ressources en uranium

Les besoins en uranium pour les SMR seront couverts selon les conditions du marché, qui sera piloté durablement par les réacteurs de puissance.

Selon les agences internationales (AIEA, AEN 2022), les ressources en uranium au niveau mondial accessibles à un coût de production inférieur à 260 USD/kg (à comparer au prix de 78 USD/kg début 2021) sont suffisantes pour garantir l'approvisionnement des réacteurs pendant 130 ans, selon les besoins actuels. Les besoins à l'horizon 2040 peuvent être couverts pour un coût moindre, inférieur à 130 USD/kg. Pour l'Europe, les principales sources d'approvisionnement sont par ordre décroissant le Niger (24%), le Kazakhstan (23%), la Russie (20%), l'Australie (16%), et le Canada (14%) (ESA, 2021).

Il faut souligner que les coûts de production ne se reflètent pas nécessairement dans les prix du marché ni surtout dans l'accessibilité de l'uranium, qui peuvent être contraints par des anticipations du marché ou des événements géopolitiques.

La demande mondiale d'uranium, de 60 kt en 2021, sera en augmentation dans les prochaines années à la suite de la croissance de la production d'électricité nucléaire notamment en Asie. Elle pourrait augmenter de 5 à 80% d'ici 2040 en fonction des scénarios. L'industrie minière aura besoin d'une vision du marché à long terme pour engager à l'avance les investissements en prospection et exploitation indispensables pour répondre à une demande en expansion.

b) Le combustible

La disponibilité des combustibles est conditionnée pour certains combustibles innovants à la montée en maturité des procédés de fabrication.

Les SMR à eau légère utilisent des combustibles à l'uranium compatibles avec les installations de production actuelles notamment en termes d'enrichissement et de géométrie moyennant quelques adaptations. Les taux de combustion envisagés permettront probablement leur retraitement dans les pays qui ont choisi cette politique. C'est un avantage pour le déploiement à court terme de ce type de réacteurs.

Les autres concepts prévoient d'utiliser une grande diversité de combustibles (voir chapitre 3), pour lesquels l'uranium pourra être enrichi jusqu'à 19,75 %, dans des combustibles dits HALEU (*High Assay Low Enriched Uranium*). Pour le démarrage des réacteurs utilisant le HALEU, les ressources en uranium utilisées proviennent de la dilution d'uranium hautement enrichi (HEU) américain ou russe. Les stocks disponibles aux États-Unis seront épuisés entre 2030 et 2040 (DOE) et ne devraient couvrir essentiellement que les besoins domestiques. À l'heure actuelle, peu de projets envisagent l'utilisation de combustible au plutonium.

L'absence d'installation industrielle de production de ces types de combustibles est actuellement un obstacle au déploiement des réacteurs qui prévoient de les utiliser. Ici aussi, le nombre de variantes sera limité pour permettre à l'effet de série de jouer et garantir aux fabricants de combustibles un marché suffisant pour assurer leur propre rentabilité. Le transport des nouveaux combustibles (neufs et usés) rendra nécessaire des emballages de transport agréés par les différentes autorités.

4.5.2 L'aval du cycle

Les combustibles usés provenant des SMR à eau légère suivront en principe les voies de gestion en place pour les combustibles actuels moyennant quelques adaptations.

Il n'en est pas de même pour les combustibles HALEU pour lesquels les informations sont peu ou pas disponibles. Les combustibles HALEU se caractérisent par un taux d'enrichissement élevé, de

hauts taux de combustion et de nouveaux composés (nitrure, alliages métalliques, ...). Ces caractéristiques vont augmenter la charge thermique, le risque de criticité et les inventaires radiologiques, et modifier les différentes étapes de la gestion des combustibles irradiés que le cycle soit ouvert ou fermé. Les installations dédiées à la gestion de ces combustibles, y compris les stockages, devront être conçues, dimensionnées ou modifiées en conséquence. Certaines technologies envisagées peuvent être la source de flux de déchets complètement nouveaux pour lesquels des solutions de gestion devront être développées. Étant donné le développement multinational possible du déploiement des SMR, des solutions de gestion multinationales, y compris pour les stockages, seront probablement avancées, y compris par la mise en place des instruments juridiques nécessaires au niveau des états.

4.6 LA CHAÎNE D'APPROVISIONNEMENT

L'existence d'une chaîne d'approvisionnement fonctionnelle est un élément clé d'un déploiement large des SMR. La chaîne d'approvisionnement doit se voir dans son ensemble ; elle comprend bien entendu la construction en usine, l'assemblage *in situ* et les services d'architecte-ingénieur associés, mais aussi les services de maintenance et d'inspection et la fourniture du combustible. Elle ne peut se mettre en place que dans un environnement stable et durable indispensable pour garantir la viabilité économique des SMR et la rentabilité pour les fournisseurs.

En Amérique du Nord et en Europe, l'absence de projet dans l'énergie nucléaire pendant les dernières décennies a érodé le potentiel de l'industrie nucléaire et conduit à des pertes de compétences sur certains métiers clés. La construction de SMR constitue une opportunité de reconstituer une base industrielle solide, par exemple en s'inspirant des méthodes en usage dans l'industrie aéronautique, à la fois pour la démarche d'amélioration continue, la formation et la transmission de l'expertise du personnel et la sécurisation de la base de fournisseurs.

La proportion de composants fabriqués en usine atteindra 60 à 80% (AEN 2020), en tirant parti de la réduction de taille des composants et de leur intégration. Dans certains concepts, c'est le réacteur dans son entièreté qui serait fabriqué en usine. L'effet de série implique quant à lui que seul un petit nombre de concepts soient industrialisés. Un haut degré d'harmonisation est indispensable au niveau des règles de conception et de sûreté ainsi que dans leur application. L'exemple de l'aéronautique montre que l'assemblage de composants transnationaux est possible.

Les exigences de fabrication des composants d'une installation nucléaire sont de très haut niveau et leur qualification fait l'objet de contrôles stricts. Ils nécessitent parfois de disposer d'infrastructures lourdes pour la qualification sous irradiation de tout composant ou matériau innovant. Il s'ensuit que les fabricants sont peu nombreux et se sont adaptés à un marché captif où l'innovation est limitée. La base de fournisseurs pourrait être élargie à d'autres industries qui pratiquent déjà de hauts standards de sûreté.

4.7 RESSOURCES HUMAINES

Le développement et le déploiement des SMR implique que l'on dispose de la capacité en ressources humaines au niveau requis par les différents acteurs : constructeurs, opérateurs, autorités réglementaires. Les ressources humaines nécessaires doivent dans certains cas être constituées quasi *ab nihilo*, et ce d'autant plus rapidement que le rythme envisagé pour le déploiement des SMR est soutenu. L'expérience des réacteurs de puissance a montré que plusieurs années sont nécessaires pour mettre en place une capacité en ressources humaines qui réponde à l'ensemble des besoins, d'où un besoin de programmes de formation adéquats.

Le caractère innovant des SMR nécessite également des compétences spécifiques dans les organismes réglementaires, ainsi dans les métiers à l'interface entre le réacteur et son utilisation industrielle.

L'innovation, y compris dans les méthodes de conception, ainsi que le rôle identifié du nucléaire pour décarboner l'énergie sont des facteurs d'attractivité pour les jeunes générations d'ingénieurs et techniciens.

CHAPITRE V : VERS UN SIXIÈME PNGMDR

La loi de programme n°2006-739 du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs a institué le plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR). Selon son article 6, codifié à l'article L542-1-2 du code de l'environnement, « *un plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR) dresse le bilan des modes de gestion existants des matières et des déchets radioactifs et des solutions techniques retenues, recense les besoins prévisibles d'installations d'entreposage ou de stockage et précise les capacités nécessaires pour ces installations et les durées d'entreposage.* ». Ce plan est transmis au Parlement qui en saisit l'OPECST pour évaluation, puis il est rendu public.

Le 5^{ème} PNGMDR, en cours, porte sur la période de cinq années 2022-2026. Il est défini par deux textes réglementaires publiés fin 2022. Le décret n°2022-1547 du 9 décembre 2022 établit les prescriptions du plan national de gestion des matières et déchets radioactifs. L'application de ce décret est précisée par l'arrêté du 9 décembre 2022.

Ce plan se distingue de ses quatre prédécesseurs qui portaient chacun sur 3 années seulement³. Il s'en distingue surtout par de nombreuses concertations préalables, dont par exemple le débat public organisé par la CNDP d'avril à septembre 2019 ou les travaux d'une commission d'orientation en 2020-2021.

Le 5^{ème} PNGMDR 2022-2026 est établi sur la base de la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) 2019-2028. Or, les principales directions d'actions de la PPE sont remises en cause par l'évolution géostratégique des marchés de l'énergie ainsi que par une conscience accrue de l'importance de la souveraineté énergétique dans un contexte où l'électrification des usages est jugée indispensable pour la décarbonation de l'économie.

Une future loi d'orientation et de programmation pour l'énergie et le climat devrait être soumise au Parlement en 2023. En tout état de cause, une nouvelle PPE devra définir, selon toute probabilité avant la fin 2024, les nouveaux objectifs de la politique énergétique et en particulier de l'électronucléaire.

Dès lors, la commission considère que le 5^{ème} PNGMDR devra laisser la place à un nouveau plan, qu'il convient de préparer sans délai selon les orientations du Conseil de politique nucléaire.

5.1 LE 5^{ÈME} PNGMDR : ENTRE INNOVATION ET OBSOLESCENCE

Reprenant un grand nombre des recommandations de la commission d'orientation qui a présidé à sa préparation, le 5^{ème} PNGMDR introduit plusieurs innovations organisationnelles et méthodologiques. Ainsi, il est prévu que sa mise en œuvre soit suivie par trois commissions réunissant des représentants des administrations, des producteurs de déchets et d'autres parties prenantes. De même, il ouvre le champ au renforcement des concertations avec le public. Par ailleurs, de nouveaux outils sont appelés à comparer les options de gestion des déchets radioactifs : études de sensibilité, analyses multi-acteurs et multi-critères (AMAMC).

³ 1^{er} PNGMDR : 2007-2009 ; 2^{ème} PNGMDR : 2010-2012 ; 3^{ème} PNGMDR : 2013-2015 ; 4^{ème} PNGMDR : 2016-2018.

5.1.1 La mise en œuvre du 5^{ème} PNGMDR

Le groupe de travail (GT) pluraliste du 4^{ème} PNGMDR, qui a suivi sa mise en œuvre, est pérennisé pour le 5^{ème} PNGMDR. Pour élargir encore la concertation entre les parties prenantes, le 5^{ème} PNGMDR prévoit, à l'initiative de la direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) du ministère de la transition énergétique, la mise en place de plusieurs commissions additionnelles : une commission de gouvernance, une commission technique et un comité technique de suivi sur les alternatives au stockage géologique. Leurs réunions seront semestrielles pour la gouvernance, tous les quatre mois pour la commission technique, le rythme n'étant pas encore défini pour le comité technique sur les alternatives.

À la demande de l'OPECST, les représentants de la CNE dans ces différentes instances joueront le rôle d'observateurs rappelant, à chaque fois que nécessaire, les enjeux et les acquis scientifiques et technologiques sur chacun des sujets évoqués. La CNE, étant chargée par ailleurs d'évaluer ces travaux, ne participe pas aux délibérations.

La Commission note que l'ouverture à la concertation fait partie des choix de société susceptibles d'ouvrir de nouvelles directions de R&D. Elle recommande toutefois que les discussions respectent les fondements scientifiques et, en particulier, ne remettent pas en cause les acquis de la R&D.

5.1.2 Les études relatives à la résilience du système de gestion des matières et déchets

Selon l'article D. 542-75 du Code de l'environnement, le PNGMDR vise non seulement à éclairer la politique énergétique mais aussi à garantir la résilience de la politique de gestion des matières et des déchets radioactifs face à l'évolution des choix de la politique énergétique ou à des *situations de crise*.

Si les cas de remise en cause de la filière nucléaire actuelle avec retraitement sont exclus de sa mission, le groupe de travail résilience prévu par la DGEC sur l'évaluation de la résilience du système de gestion devra examiner différents cas aux limites. Ces cas correspondent à une « *indisponibilité totale et imprévue, quelle qu'en soit la cause, pour une raison fortuite et pour une durée inconnue* », d'une des composantes du système de gestion – par exemple l'indisponibilité de l'entreposage, centralisé ou dans les piscines des centrales, des combustibles usés, l'arrêt momentané du retraitement, l'interruption de la fabrication du MOX à Melox.

La Commission estime particulièrement pertinente l'évaluation de la capacité de chaque maillon du cycle du combustible à absorber une perturbation significative subie par un ou plusieurs autres maillons du système, de manière à garantir sa robustesse.

5.1.3 Les analyses multi-acteurs multi-critères (AMAMC)

Le 5^{ème} PNGMDR prévoit que « *les approches d'évaluation multi-critères de scénarios de gestion seront systématisées et des méthodologies adaptées seront développées à cette fin* ». Dans le cadre de son action dénommée CHAP.1, le plan a confié à l'IRSN la responsabilité de proposer, avant le 31 décembre 2022, une méthodologie d'évaluation multi-acteurs multi-critères (AMAMC).

La commission reconnaît l'utilité de l'AMAMC pour l'analyse de problèmes complexes. Les résultats de l'AMAMC peuvent ensuite être utilisés pour éclairer la décision, par exemple par l'introduction de pondérations qui doivent être définies en toute transparence.

L'utilisation de ce type de méthode pour l'aide à la décision pose des questions de principe : quelle pondération choisir pour les différents critères ? Quelle est la complétude des données de base sous tendant chacun d'entre eux ? Quelles sont les incertitudes associées aux paramètres dominants ? Quel poids donner aux différents acteurs et paramètres identifiés ? Quelles sont les corrélations entre ces paramètres ?

L'AMAMC est utile pour effectuer des simulations dans le cadre de réflexions du type : « si..., alors... », mais après la réalisation de plusieurs simulations dans lesquelles tel ou tel critère est prédominant, il doit revenir au décideur de choisir ses priorités et d'assumer ses responsabilités.

La Commission estime que l'AMAMC peut éclairer la décision en fournissant un outil de comparaison entre des options techniques mais, en tout état de cause, l'AMAMC ne peut se substituer à la décision politique.

L'action ENV.1 du PNGMDR assigne à l'Andra la mission de remettre avant le 31 décembre 2022 une méthode d'évaluation environnementale. L'application de cette méthode à l'ensemble des filières de gestion devra intervenir d'ici au 30 juin 2023.

L'évaluation des externalités positives ou négatives d'un projet est une question complexe mais d'un grand intérêt. En tout état de cause, l'objectif fixé à l'Andra semble à la Commission démesurément ambitieux, au moins au niveau de son calendrier.

47

5.1.4 L'obsolescence du 5^{ème} PNGMDR

Le 5^{ème} PNGMDR 2022-2026 repose sur la PPE 2019-2028, publiée le 21 avril 2020. Le Conseil de politique nucléaire du 3 février 2023 a pris plusieurs décisions structurantes qui sont en contradiction avec le contenu de cette PPE. Tirant les conséquences de cette évolution, le 5^{ème} PNGMDR doit rapidement laisser place à un nouveau plan.

Ainsi, la PPE en vigueur prévoit l'arrêt de 14 réacteurs nucléaires (incluant les deux réacteurs de Fessenheim déjà arrêtés) d'ici 2035 et la réduction à 50% de la part de l'électricité nucléaire dans le mix à cette date. Les nouvelles orientations vont, à l'inverse, dans le sens d'une croissance significative de la production nucléaire. La construction de 6 nouveaux réacteurs EPR2 avec l'objectif des premières mises en service d'ici 2035 au plus tard est complétée par le lancement d'études permettant de préparer la prolongation de la durée de vie des centrales existantes à 60 ans et au-delà, dans des conditions strictes de sûreté garanties par l'Autorité de sûreté nucléaire.

Par ailleurs, il est envisagé que des réacteurs modulaires de faible puissance (SMR) et des réacteurs avancés (AMR) soient développés afin de disposer d'au moins une tête de série dans les années 2030. Cette nouvelle orientation implique une réflexion sur les conséquences de la relance du programme nucléaire français sur la gestion des déchets ultimes.

Enfin, la nouvelle donne géopolitique impose une réflexion en profondeur sur la question du cycle du combustible afin que la France conserve et renforce son autonomie stratégique dans ce domaine.

La nouvelle PPE pour 2030-2035, tenant compte des décisions du Conseil de politique nucléaire, inclura des dispositions impactant la gestion des matières et déchets radioactifs. En conséquence, la Commission recommande la mise en chantier et la finalisation rapide du 6^{ème} PNGMDR, en intégrant les enseignements de la préparation de l'édition du 5^{ème} PNGMDR qui a été excessivement longue.

5.2 RECOMMANDATIONS POUR LE SIXIÈME PNGMDR – VOLET MATIÈRES

La plus grande partie du 5^{ème} PNGMDR porte sur les déchets radioactifs ; il aborde très peu les matières. L'arrêté du 9 décembre 2022 établissant ses prescriptions consacre en effet seulement trois articles et deux actions aux matières radioactives, contre trente-cinq articles et vingt-et-une actions aux déchets radioactifs.

Or la France a fait le choix du traitement du combustible usé afin de préparer la fermeture du cycle. La pertinence de ce choix dans une optique de souveraineté énergétique est renforcée par la crise géopolitique. Toutes les composantes de ce cycle revêtent donc une grande importance, depuis l'approvisionnement en matières fissiles jusqu'au retraitement des combustibles usés en vue de la réutilisation des matières fissiles.

5.2.1 L'impératif de la valorisation des matières radioactives

Selon l'article D. 542-82 du code de l'environnement, le caractère valorisable des matières radioactives est évalué à chaque édition du PNGMDR après avis de l'ASN. L'arrêté du 9 décembre 2022 déclinant les objectifs du 5^{ème} PNGMDR accorde, s'agissant des matières radioactives, une place prédominante à la question de leur déclassement en déchets.

48

L'action MAT.1 demande aux propriétaires des matières radioactives des plans de valorisation. « *La première édition de ces plans sera élaborée pour mi 2023 par les propriétaires des matières. Un rapport de leur mise en œuvre sera remis un an avant l'échéance de chaque édition du PNGMDR* ».

Le premier objectif à mi 2023 est impossible à atteindre : la nouvelle PPE ne sera pas définie à cette date. Des décisions au plus haut niveau de l'État seront *in fine* nécessaires pour le choix des filières de combustibles et elles devront être suivies d'études de grande ampleur.

La priorité donnée à la requalification de matières en déchets transparait également dans le chapitre II du 5^{ème} PNGMDR. Ainsi son intitulé prescrit la « *poursuite des travaux sur les solutions de gestion des matières en cas de requalification comme déchets* ». En outre, l'action MAT.3 demande des scénarios de stockage et non pas d'entreposage « *de l'uranium appauvri, de l'uranium de retraitement et des matières thorifères, en cohérence avec la stratégie de gestion des déchets de faible activité à vie longue (FAVL)* ».

La commission estime que le cinquième PNGMDR ne traite pas suffisamment la question du potentiel de valorisation des matières radioactives.

Le traitement des combustibles usés est un choix de politique énergétique inscrit dans la loi du 28 juin 2006 en tant que moyen de réduire la quantité et la nocivité des déchets radioactifs. Une grande valeur ajoutée du traitement réside dans la récupération de matières réutilisables. Dans la terminologie contemporaine, il s'agit là d'une démarche d'économie circulaire, favorable en l'espèce à la souveraineté énergétique.

La réutilisation de ces matières fissiles non consommées s'impose donc par tous les moyens techniques, notamment grâce au mono-recyclage en REP et plus efficacement à terme par des réacteurs à neutrons rapides RNR.

Dans la perspective de l'élaboration du 6ème PNGMDR, la Commission estime qu'il est d'une importance stratégique de poursuivre et d'accélérer les études sur la valorisation des matières radioactives entreposées sur le sol national, afin de progresser vers la fermeture du cycle du combustible nucléaire.

Les cas de plusieurs types de ces matières radioactives et les moyens de les valoriser sont examinés ci-après.

5.2.2 L'uranium appauvri et la souveraineté énergétique

Le stock français d'uranium appauvri (Uapp), de 324 000 tML fin 2021, est un atout pour la souveraineté énergétique. Deux voies sont possibles pour la valorisation de cette matière fissile.

La première voie est celle du ré-enrichissement de cet uranium appauvri, qui ne figure pas parmi les études prévues dans le 5^{ème} PNGMDR. Le stock actuel d'Uapp assurerait 8 années de production électronucléaire française, au prix d'un ré-enrichissement qui ne pose pas de problème technique particulier. Le coût de l'U enrichi obtenu serait aujourd'hui comparable à celui de l'U enrichi issu de l'U naturel.

La commission recommande que l'Uranium appauvri soit précieusement conservé (ni déclassé en déchets, ni utilisé à court terme) car il constitue une réserve stratégique dans l'hypothèse d'une rupture d'approvisionnement en U naturel. Le délai de 8 ans constitue une assurance permettant de trouver d'autres capacités d'approvisionnement.

49

La seconde voie utilise l'Uapp dans les RNR : réacteurs refroidis au sodium ou au plomb, réacteurs à sels fondus. Le stock d'Uapp, utilisé comme composant des combustibles avec le plutonium, permettrait de s'affranchir durablement de l'importation d'uranium naturel. Pour cela, la filière RNR-Na est la plus mature à ce jour, en particulier grâce aux travaux du CEA depuis plusieurs décennies ; elle garantirait une autonomie quasi-complète en matières fissiles. Le développement d'AMR à spectre rapide permettrait de réactiver la filière.

La Commission rappelle que le stock d'Uapp peut être utilisé pour alimenter les RNR qui permettront de fermer le cycle, sans nécessiter d'approvisionnement en U naturel.

5.2.3 Le retraitement à La Hague

La PPE 2019-2028 considère que le retraitement des combustibles usés UOX est assuré jusqu'en 2040 compte tenu des usines actuelles du cycle. La décision de prolonger ou non le mono-recyclage du Pu au-delà de cette date est ouverte.

Les installations actuelles de La Hague devront être impérativement renouvelées à cette date si on envisage le multi-recyclage en REP ou en RNR, ou mises à niveau si on se limite au monorecyclage (voir chapitre 1).

Compte tenu des délais de conception des nouvelles installations, d'autorisations administratives et de construction, la Commission recommande qu'une décision sur le retraitement au-delà de 2040 soit prise au plus tard en 2025.

5.2.4 L'uranium de retraitement URT et URE

L'uranium de retraitement (URT) est, comme son nom l'indique, l'uranium récupéré après les opérations de retraitement des combustibles usés. Fin 2021, le stock représentait 34 200 tML.

L'URT, une fois réenrichi en URE en Russie, a été utilisé par EDF, de 1994 à 2013, dans sa centrale de Cruas (4 réacteurs de 900 MWe). Son utilisation a été interrompue le temps de clarifier le devenir des résidus d'enrichissement. Son réemploi est à l'ordre du jour, à Cruas (2 tranches en 2023 et 2 tranches en 2024-2025), puis pour 4 tranches 1300 MWe, entre 2027 et 2030.

L'URT doit, en réalité, subir deux opérations avant d'être réutilisable.

L'uranium URT issu du retraitement, entreposé sous forme d'oxyde U_3O_8 , doit d'abord être converti en hexafluorure d'uranium UF_6 gazeux avant d'être enrichi. Cette opération se faisait principalement en Russie.

Le réenrichissement de l'URT en URE pourra être réalisé grâce au projet d'extension de GB2 (centrifugeuses) au Tricastin qui permettra d'éviter le recours à Tenex (Rosatom - Russie) ou à Urenco (consortium Royaume-Uni, Allemagne, Pays-Bas). L'investissement est évalué à 1,5 milliard d'euros.

La Commission estime que la dépendance vis-à-vis de la Russie, où l'opération de conversion de l'URT était réalisée jusqu'à présent, peut et doit être supprimée grâce à la construction d'une installation analogue en France ou dans l'Union européenne. La Commission recommande d'approfondir les études sur la conversion de l'URT en France en relation avec l'extension en cours d'instruction de GB2.

La Commission rappelle que l'URT n'est pas un déchet mais une matière valorisable dont l'utilisation permet une économie de l'ordre de 10% sur l'importation d'uranium naturel pour le parc français.

5.2.5 La valorisation du plutonium

Le MOX est pour le moment le vecteur unique de réemploi du plutonium. Il permet de réaliser une économie de l'ordre de 10% sur l'utilisation d'uranium naturel.

Le projet de multi-recyclage en REP (MRREP) poursuit plusieurs objectifs. Présenté comme une étape transitoire vers les réacteurs à neutrons rapides, le MRREP souffre de plusieurs handicaps (voir chapitre 1). Le vecteur isotopique du plutonium se dégradera au fur et à mesure des recyclages. Le MRREP conduira également à une production accrue d'actinides mineurs. Les installations industrielles de traitement sont à inventer, à qualifier et à construire. L'exploitant des réacteurs devra enfin mettre en œuvre une gestion complexe de combustibles différents (UOX, MOX1, MOX2, ...).

Les investissements supplémentaires à réaliser en R&D et en installations industrielles spécifiques pour la mise en œuvre du MRREP seront inévitablement coûteux pour une étape intermédiaire. La Commission recommande d'aller directement vers la filière des réacteurs à neutrons rapides pour la valorisation indispensable du plutonium.

5.2.6 Les nouveaux combustibles

Le sujet des combustibles est un sujet central pour l'avenir du nucléaire, tant au niveau des réacteurs en fonctionnement, que pour les futurs réacteurs. Le prochain enjeu de sûreté, à l'initiative de la Commission européenne, est celui de l'utilisation à partir de 2025 de combustibles *accident tolerant fuel* (ATF), puis *enhanced accident tolerant fuel* (EATF) pour les réacteurs de puissance. Un deuxième enjeu est celui de la disponibilité de combustibles qualifiés pour les réacteurs innovants SMR et AMR. Ces questions sont abordées en détails dans le chapitre 3.

La Commission constate que le 5^{ème} PNGMDR ne traite pas des nouveaux combustibles. Le 6^{ème} PNGMDR devra examiner cette question dans le contexte du développement des EPR2 et des réacteurs innovants, ainsi que l'impact des nouveaux combustibles sur le cycle des matières et les déchets.

5.3 RECOMMANDATIONS POUR LE SIXIÈME PNGMDR – VOLET GESTION DU COMBUSTIBLE USÉ

5.3.1 L'indispensable traitement des combustibles usés

51

L'inventaire national des matières et déchets radioactifs classe les combustibles usés dans la catégorie des matières radioactives. Au contraire, le 5^{ème} PNGMDR ne les reconnaît pas comme tels et leur assigne une place particulière.

Le Titre III de l'arrêté du 9 décembre 2022 établissant ses prescriptions, qui les distingue des matières radioactives, comprend six articles et cinq actions relatives à leur entreposage, ce qui laisse ouvertes deux possibilités : d'une part leur reprise en vue de leur retraitement, d'autre part leur stockage définitif dans une installation à définir.

En tout état de cause, les quantités de combustibles usés sont considérables. Les combustibles usés UNE représentent 11 200 tML répartis entre les piscines des centrales et les installations de La Hague. Les combustibles usés URE en attente de retraitement représentent 630 tML. Les MOX et leurs rebuts en attente de retraitement correspondent à des stocks de 2 727 tML.

La Commission considère que, dans une logique de meilleure valorisation de la ressource, la matière fissile contenue dans les divers combustibles usés doit pouvoir être utilisée un jour et ne pas être considérée comme un déchet.

La Commission souligne l'importance de maintenir les capacités de l'aval du cycle opérationnelles, bien au-delà de 2040.

5.3.2 La nécessité d'entreposer les combustibles usés

Le 5^{ème} PNGMDR accorde une grande importance à la question de l'entreposage des combustibles usés. L'action ENT.1 assigne à EDF et à Orano la remise avant le 31 mars 2023 d'un rapport au ministre chargé de l'énergie et à l'ASN, précisant les horizons de saturation des capacités d'entreposage existantes.

Selon l'action ENT.2 du 5^{ème} PNGMDR, les besoins d'entreposage sur 30 ans des divers types de combustibles usés devront être établis avant le 31 mars 2023. Ces besoins doivent prendre en compte les différents scénarios de politique énergétique envisagés.

La Commission considère que ces actions devront être reformulées à la lumière de la prochaine PPE.

5.3.3 Les questions posées par l'entreposage à sec

Il importe de distinguer les différentes solutions d'entreposage, sous eau ou à sec. Les conditions et les conséquences correspondantes sont en effet dimensionnantes en termes de politique nucléaire.

Le comportement des combustibles entreposés à sec est peu ou mal connu, dans la mesure où les pays qui le pratiquent n'envisagent actuellement pas leur reprise pour retraitement.

L'important retour d'expérience sur l'entreposage à sec à l'étranger démontre la capacité des technologies correspondantes à entreposer, avec des contraintes opérationnelles réduites, le combustible usé pour des périodes plus ou moins longues. En revanche, les études actuelles ne permettent pas de caractériser l'état des assemblages de combustible usé après une longue période d'entreposage, ni de garantir la possibilité de leur reprise en vue de leur retraitement. Les données sur le comportement des MOX usés entreposés à sec sont encore plus lacunaires.

S'il s'avérait que la dégradation des combustibles entreposés à sec compromettrait leur reprise et leur retraitement, alors la seule solution de gestion à long terme serait le stockage géologique. Or l'inventaire de référence de Cigéo ne les comprend pas et ne les fait figurer que dans l'inventaire de réserve (études d'adaptabilité).

La Commission estime que le 6^{ème} PNGMDR devrait demander l'étude de l'évolution des assemblages combustibles dans un entreposage à sec, en vue d'établir la durée maximale au-delà de laquelle le combustible UOX usé ne serait plus retraitable.

La Commission conseille également de ne pas mettre en œuvre l'entreposage à sec du MOX usé avant d'avoir démontré que cette technique ne s'oppose pas à son retraitement ultérieur.

5.3.4 L'entreposage sous eau

L'entreposage sous eau est, dans l'état actuel des connaissances, le seul à même de garantir la reprise des combustibles. Du fait de la saturation des piscines des centrales, le projet d'EDF de construire une piscine additionnelle pour un entreposage centralisé des combustibles usés à La Hague revêt une importance critique pour l'ensemble du cycle.

L'action ENT.4 assigne à EDF et à Orano l'objectif de soumettre à l'ASN un dossier d'options de sûreté d'ici au 31 décembre 2023 pour le projet de piscine. Le recours à cette solution dépendra, en tout état de cause, de la future PPE. Le déroulement du projet et ses différentes étapes devraient être suivis pas à pas par la commission de gouvernance du plan, au titre de l'action ENT.5.

La Commission souligne que compte tenu de la stratégie de valorisation des combustibles usés, des capacités suffisantes d'entreposage sous eau sont indispensables.

5.4 RECOMMANDATIONS POUR LE SIXIÈME PNGMDR – VOLET GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS

Le 5^{ème} PNGMDR accorde une place prédominante aux études et aux réalisations relatives aux déchets radioactifs.

La loi de 2006 a créé le PNGMDR dans un double but d'exhaustivité et de cohérence des politiques et stratégies suivies dans ce domaine. Exhaustivité : tous les déchets radioactifs doivent, sans exception, faire l'objet de filières adaptées à leur nature. Cohérence : les dispositions prises doivent se compléter et non pas être redondantes, de manière à atteindre la meilleure efficacité en termes de sûreté et de coûts.

Le 5^{ème} PNGMDR fixe un certain nombre d'objectifs pour la gestion des déchets dont le calendrier ne devrait pas être significativement modifié par la prochaine PPE.

L'appréciation de la CNE sur le sujet des déchets est éclairée par les analyses du chapitre 4.

5.4.1 Les déchets TFA

Le volume de TFA à terminaison, c'est-à-dire après l'arrêt et le démantèlement complets du parc actuel, serait de l'ordre de 2 300 000 m³, pour des capacités de stockages existantes de 650 000 m³. Dans le cadre de la PPE 2019-2028 actuellement en vigueur, prévoyant l'arrêt définitif de 14 réacteurs, l'accroissement des capacités de stockage revêtirait une certaine urgence. Au contraire, l'option de la prolongation de la durée de vie des réacteurs d'EDF dans le cadre de la nouvelle PPE, détendrait significativement le calendrier.

Avec 11 actions, le 5^{ème} PNGMDR prévoit de suivre avec attention les efforts de l'Andra pour stocker les déchets TFA déjà produits, résultant principalement de l'arrêt et du démantèlement des réacteurs UNGG du CEA et d'EDF. L'objectif global est de porter la capacité du Cires à 950 000 m³.

La réutilisation de certains types de déchets (métaux, gravats) est une autre orientation examinée par le 5^{ème} PNGMDR. À ce titre, dans son action TFA.7, il demande à EDF et Orano l'élaboration au 30 décembre 2022 d'une feuille de route pour un projet de libération conditionnelle à titre dérogatoire des matériaux métalliques de très faible activité, en vue de leur valorisation après fusion décontaminante. L'action TFA.9 émet la même demande pour la valorisation des substances de très faible activité autres que métalliques.

La Commission recommande que le sixième PNGMDR inscrive une action de concrétisation à l'échelle industrielle des techniques et méthodes de mesure radiologique, en vue d'aboutir à un dispositif de contrôle exemplaire qui justifie pleinement la pertinence des dérogations qui seront accordées.

5.4.2 Les déchets FAVL

Le volume des déchets FAVL est estimé à 250 000 m³ (ASN 2020), localisés sur les sites des producteurs/détenteurs. Les déchets FAVL comprennent les déchets radifères, les déchets de graphite, certains résidus de traitement de conversion de l'uranium (Orano, Malvesi), certains déchets bitumés (Marcoule).

Les délais de mise au point d'une filière spécifique pour les déchets FAVL ont été régulièrement dépassés. Ainsi, la loi 2006-739 du 28 juin 2006 prescrit la mise en service en 2013 d'un centre de stockage pour les déchets graphite et les déchets radifères, qui n'existe toujours pas.

Le 5^{ème} PNGMDR prévoit d'abord des travaux préliminaires permettant de mieux distinguer les différents types de déchets de cette catégorie. L'action FAVL.1 demande à l'Andra, à EDF et à Orano, d'une part, pour le 31 décembre 2022, des critères objectifs permettant de discriminer les déchets relevant de la filière des déchets de faible activité à vie longue de ceux relevant de la filière des déchets de moyenne activité à vie longue, en particulier pour les déchets bitumés et les déchets de graphite, et d'autre part, pour le 30 juin 2023, les quantités de déchets relevant des deux catégories.

Selon l'action FAVL.2, l'Andra devait, avant le 31 décembre 2022, présenter à la commission de gouvernance du PNGMDR, des scénarios de gestion assortis d'une étude multi-acteurs multi-critères et faisant l'objet d'une concertation sur les territoires pressentis, notamment la communauté de communes de Vendevre-Soulaines. Plus précisément, l'action FAVL.4 demande à l'Andra de déposer au plus tard le 30 juin 2023 un avant-projet sommaire décrivant les options techniques et de sûreté retenues, l'avant-projet détaillé devant être finalisé au plus tard cinq ans après l'avis de l'ASN. Dans les faits, l'Andra s'est vu donner par l'ASN une feuille de route pour lui permettre d'évaluer pour fin 2023 les capacités de stockage du site proposé à Vendevre-Soulaines.

Le 5^{ème} PNGMDR prévoit de suivre avec attention les décisions de l'ASN et les travaux de l'Andra sur ce site et/ou dans la recherche d'autres localisations potentielles. L'action FAVL.3 assigne à l'Andra l'objectif d'élaborer, avant le 30 juin 2025, un schéma global de gestion des déchets FAVL.

La Commission estime qu'il faut d'abord évaluer les caractéristiques des sites de stockage au regard des FAVL afin de déterminer les déchets pouvant y être stockés et les critères pour les accepter.

Elle juge nécessaire que le 6^{ème} PNGMDR demande de préciser en premier lieu la méthode de qualification des sites de stockage des déchets FAVL, en fonction des différentes familles de déchets concernés. Cette démarche s'appliquerait notamment au pré-projet de Vendevre-Soulaines, et à la recherche de sites pour les déchets qui ne pourraient y être déposés.

5.4.3 Les déchets HA/MA-VL

L'article L. 542-1-2 du code de l'environnement dispose que « les déchets radioactifs ultimes ne pouvant pour des raisons de sûreté nucléaire ou de radioprotection être stockés en surface ou en faible profondeur font l'objet d'un stockage en couche géologique profonde ».

Au cours du 5^{ème} PNGMDR va se dérouler la procédure d'instruction par l'ASN de la demande d'autorisation de création de Cigéo, déposée par l'Andra en janvier 2023. Cette procédure s'étale sur 3 ans au minimum et 5 ans au plus, des délais supplémentaires pouvant résulter de compléments d'information demandés à l'Andra. De nombreuses étapes sont dévolues à la

consultation du public. En outre, un examen parlementaire par l'OPECST et les commissions permanentes compétentes interviendra avant la décision proprement dite.

Le 5^{ème} PNGMDR consacre quatre articles à Cigéo, portant sur la concertation, la Phipil, le plan directeur d'exploitation (PDE) et les MAVL.

La concertation

L'action HAMAVL.4 du plan prévoit une concertation renforcée sur le projet Cigéo. Au premier étage de cette concertation figure le groupe de suivi sur la participation du public au projet Cigéo du Haut comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire (HCTISN). Après le débat public de 2013, il a été chargé de veiller à la « *bonne association de la société civile au déploiement du projet* », jusqu'à l'enquête publique suivant le dépôt de la DAC. Au deuxième étage de la concertation, le groupe de suivi rendra compte de ses travaux à la commission de gouvernance du PNGMDR.

Tout en laissant la place à la concertation, la Commission estime indispensable que le 6^{ème} PNGMDR respecte dans ses demandes les responsabilités et prérogatives de maître d'ouvrage et d'exploitant nucléaire de l'Andra.

La question critique de la Phipil

La Phipil comprend la construction d'une partie du stockage, sa qualification, ainsi que le début de l'exploitation industrielle sur des colis actifs.

La Commission estime indispensable que l'Andra, exploitant, propose un calendrier de déploiement et d'achèvement de la Phipil.

55

Selon l'action HAMAVL.6 du plan, l'Andra devra proposer, avant le 31 décembre 2024, les objectifs et les critères de réussite de la Phipil, en définissant en particulier la nature des déchets qu'il est prévu de stocker pendant cette phase et les essais envisagés.

La Commission a considéré dans son rapport n°15 de juin 2021 que « la Phipil aura atteint son objectif quand elle aura répondu aux enjeux suivants : la réalisation technique des composants de Cigéo, la démonstration du bon fonctionnement de l'installation via des essais de qualification, la démonstration du bon déroulement de son exploitation industrielle et la mise en pratique des modalités de gouvernance de la Phipil qui doivent être définies au préalable ».

La définition précise de la Phipil et de ses critères relève de la responsabilité du maître d'ouvrage et exploitant, sous l'autorité de l'État et de l'ASN.

Le plan directeur d'exploitation

La loi du 25 juillet 2016 précisant les modalités de création de Cigéo introduit à l'article L.542-10-1 du Code de l'environnement, la disposition suivante : « *afin de garantir la participation des citoyens tout au long de la vie d'une installation de stockage en couche géologique profonde, l'Andra élabore*

et met à jour tous les cinq ans, en concertation avec l'ensemble des parties prenantes et le public, un plan directeur d'exploitation (PDE) de celle-ci ».

L'action HAMAVL.5 demande à l'Andra de dresser un bilan de la mise en œuvre du PDE en vigueur.

La Commission considère que cette demande doit être conservée dans le 6^{ème} PNGMDR.

Les MAVL

L'action HAMAVL.9 du 5^{ème} PNGMDR précise que les producteurs de déchets radioactifs doivent, avant le 31 décembre 2022, remettre à l'ASN un état des lieux de leurs déchets MAVL produits avant 2015, qu'ils devront conditionner, ainsi qu'un calendrier de ces opérations.

Les travaux de reconnaissance, de caractérisation voire de reclassement de certains déchets MAVL en déchets FAVL étant loin d'être terminés, la Commission considère que cet objectif doit figurer dans le prochain PNGMDR d'une façon générale et plus particulièrement pour les déchets bitumés.

5.4.4 Les catégories particulières de déchets

Ces déchets particuliers comprennent notamment les huiles et liquides organiques, les sources scellées usagées, des déchets tritiés et les déchets de petits producteurs. Deux méthodes de gestion sont possibles dans ce domaine : la création d'une filière spécifique par type de déchets qui peut entraîner des coûts élevés ou l'intégration aux filières existantes, pour laquelle le traitement et le conditionnement jouent un rôle fondamental.

L'article D. 542-95 du code de l'environnement et l'action DECPAR.4 du 5^{ème} PNGMDR prévoient que des travaux soient conduits par les producteurs pour la définition et le déploiement des filières de gestion.

Bien qu'il s'agisse de faibles volumes, la Commission recommande d'accélérer les recherches sur les catégories particulières de déchets sans destination pour le moment.

5.5 CONCLUSION

Le 5^{ème} PNGMDR a pour objectif de définir une série d'études et de réalisations à conduire pour la gestion des matières et déchets radioactifs, sur la période 2022-2026.

Publié avec retard au terme d'une procédure d'élaboration longue et complexe, et reposant sur une programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) aujourd'hui dépassée, le 5^{ème} PNGMDR a néanmoins le mérite d'exister et d'établir certaines priorités. Il est marqué par plusieurs innovations méthodologiques dans sa préparation et sa mise en œuvre.

Il présente néanmoins des lacunes majeures, au regard de la géostratégie actuelle de l'énergie.

L'objectif d'accroître l'indépendance énergétique, dans un contexte de forte croissance de la demande et du prix de l'électricité, renforce l'importance de la valorisation la plus poussée possible

des matières radioactives. Même si les besoins de financement correspondants sont importants, la modernisation ou le renouvellement des installations du cycle du combustible et la fermeture du cycle par le développement de la filière des réacteurs à neutrons rapides doivent devenir des priorités de la politique nationale.

La commission recommande qu'au même titre que la gestion des déchets, la valorisation des matières radioactives devienne un des piliers du sixième PNGMDR.

GLOSSAIRE

A&D : assainissement et démantèlement.

ACACI : projet porté par l'Andra d'augmentation de la capacité autorisée du centre de stockage du CIREs des déchets de très faible activité (ou TFA).

AIEA: agence internationale de l'énergie atomique.

AM : actinides mineurs.

Am : américium.

AMAMC : analyse multi-acteurs et multi-critères.

AMR : réacteur modulaire avancé (*Advanced Modular Reactor* en anglais).

Andra : agence nationale de gestion des déchets radioactifs.

ASN : autorité de sûreté nucléaire.

ASND : autorité de sûreté nucléaire de défense.

ATF : (en anglais :*Accident Tolerant Fuel*) combustible dont les performances sont améliorées notamment dans des conditions d'accidents conduisant à une élévation de leur température.

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).

CIREs : centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage de l'Andra dédié aux déchets de très faible activité.

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

CNE : commission nationale d'évaluation.

CNRS : centre national de la recherche scientifique.

COMOR : commission d'orientations du 5^{ème} PNGMDR installée par la DGEC.

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

CPN : Conseil de politique nucléaire. Présidé par le Président de la République, ce conseil définit les grandes orientations de la politique nucléaire et veille à leur mise en œuvre, notamment en matière d'exportation et de coopération internationale, de politique industrielle, de politique énergétique, de recherche, de sûreté, de sécurité et de protection de l'environnement.

CSA : centre de stockage de l'Aube exploité par l'Andra dédié aux déchets radioactifs de faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC).

CSTFA : centre de stockage des déchets de très faible activité (TFA) de l'Aube exploité par l'Andra.

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

CU MOX : combustible mixte d'oxyde d'uranium et de plutonium 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 du ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation.

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

DUP : déclaration d'utilité publique.

EATF : combustible tolérant aux accidents amélioré (*enhanced accident tolerant fuel* en anglais) voir ATF.

EDF : électricité de France.

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).

ESFR : projet européen dédié aux réacteurs à neutrons rapides.

ETI : entreprise de taille intermédiaire.

60

FAVL : déchets de faible activité à vie longue.

FEB : fûts d'enrobés bitumineux.

FMA-VC : déchets de moyenne activité à vie courte.

GB-2 : usine d'enrichissement d'uranium Georges Besse 2 exploitée par ORANO.

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

HALEU (*high-assay low enriched uranium*) : uranium ayant un enrichissement compris entre 5 et 20%.

HAVL : déchets de haute activité à vie longue.

HTR (*high temperature gas-cooled reactor*) : réacteur à haute température (> 550°C) refroidi par un caloporteur gaz.

ICEDA : installation de conditionnement et d'entreposage de déchets activés exploitée par EDF (sur le site de la centrale de Bugey).

ICPE : installation classée pour la protection de l'environnement.

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.

MAVL : déchets de moyenne activité à vie longue.

MMR : micro réacteur modulaire (*micro modular reactor* en anglais).

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

MOX MR : combustible MOX conçu pour le multirecyclage en REP à support en uranium appauvri (concept proche du MOX actuel).

MOX MIX : combustible MOX conçu pour le multirecyclage en REP à support en uranium enrichi (concept présentant une évolution significative par rapport au MOX actuel).

MELOX : usine de fabrication de combustible MOX exploitée par ORANO.

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

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

MSR-R : réacteur à sels fondus à neutrons rapides (ou MSFR en anglais).

NRC : autorité de sûreté nucléaire américaine (*nuclear regulatory commission* en anglais).

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).

PIA : programme d'investissement d'avenir.

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

PPE : planification pluriannuelle de l'énergie.

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

REP : réacteur à eau pressurisée.

REX : retour d'expérience.

RNR : réacteur à neutrons rapides.

RNR Na : réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium.

RNE Pb : réacteur à neutrons rapides refroidi au plomb.

SMR : petit réacteur modulaire (*small modular reactor* en anglais).

TFA : déchets de très faible activité.

TRL : échelle maturité technologique d'un projet ou d'un système (*technology readiness level* en anglais).

UOX : oxyde d'uranium.

URE : uranium de retraitement enrichi (assemblages combustibles).

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

URE : uranium de retraitement enrichi.

URT : uranium de retraitement.

VHTR (*very high temperature gas-cooled reactor*) : réacteur à très haute température ($T > 900^{\circ}\text{C}$) à caloporteur gaz.

ANNEXE I : COMPOSITION DE LA COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION

Commission en exercice jusqu'au 15 mars 2023 :

Gilles PIJAUDIER-CABOT – Président de la Commission nationale d'évaluation jusqu'au 15 mars 2023 – professeur des universités et vice-président en charge de l'ISITE E2S et des grands projets, Université de Pau et des Pays de l'Adour – membre sénior de l'Institut universitaire de France.

Vincent LAGNEAU – Professeur d'hydrogéologie et géochimie de l'Institut Mines Télécom – directeur du Centre de géosciences à Mines Paris – PSL, membre renouvelé pour un second mandat, président de la CNE à compter du 16 mars.

Jean-Claude DUPLESSY – Expert invité 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, nommé président honoraire le 16 mars 2023.

Christophe FOURNIER – Vice-Président de la Commission nationale d'évaluation - Ingénieur général hors classe de l'armement (2S), mandat toujours en vigueur.

Philippe GAILLOCHET – Directeur de service – Assemblée nationale (1977 – 2015), mandat toujours en vigueur.

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

Saida LAÂROUCHI ENGSTRÖM – Ingénieur – conseillère en charge des affaires publiques – Vatenfall – Suède, mandat toujours en vigueur.

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

Mickaële LE RAVALEC – Chef du département Sciences pour le Sol et Sous-Sol, direction Sciences de la Terre et Technologies de l'Environnement, à IFPEN.

Maurice LEROY – Vice-président de la Commission nationale d'évaluation – membre associé de l'Académie nationale de pharmacie – professeur honoraire - École européenne de chimie, polymères et matériaux de Strasbourg, membre reconduit le 16 mars 2023 comme expert invité.

Virginie MARRY – Professeur des universités, Sorbonne université, mandat toujours en vigueur.

José Luis MARTINEZ – Directeur de recherche au CSIC (institut de science des matériaux, Madrid, Espagne), représentant officiel de l'Espagne au sein du Forum européen sur les infrastructures de recherche (ESFRI, Commission Européenne), responsable du groupe stratégique en physique et ingénierie, membre renouvelé pour un second mandat le 16 mars 2023.

Jean-Paul MINON – Directeur général de l'ONDRAF de 2006 à 2017 – Belgique, mandat toujours en vigueur.

Nouveaux membres (nommés le 16 mars 2023):

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

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

Catherine NOIRIEL – Prof. Assistant, Géosciences & Environnement, Université Paul Sabatier, Toulouse

Michel DUBOIS – Sociologue, Directeur du GEMASS, Sorbonne Université

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

ANNEXE II : ACTIVITÉ DE LA COMMISSION

Le rapport n°16 a été présenté :

- à l'OPECST le 21 juillet 2022 ;
- au Comité local d'information et de suivi (CLIS) du laboratoire de Bure le 17 octobre 2022 ;
- au MESR le 27 octobre 2022 ;
- au collège de l'ASN le 8 novembre 2022.

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

- 9 auditions plénières, dont 4 coordonnées par le CEA et 5 par l'Andra – parmi ces auditions, 2 ont fait l'objet d'une préparation renforcée avec la CNE (réunion préparatoire) ;
- 17 auditions restreintes.

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 et de son appui technique (IRSN), des industriels principalement concernés (ORANO et EDF) ainsi que de l'administration centrale (DGEC et DGRI).

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

- visite du laboratoire souterrain de Bure le 18 octobre 2022 ;
- visite du site Framatome de Romans le 4 avril 2023, CERCA, CRIL (CERCA Research and Innovation Lab), et installations « combustible de puissance ».

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

ANNEXE III : AUDITIONS REALISÉES PAR LA COMMISSION

AUDITIONS PLÉNIÈRES

- 19 octobre 2022 : CEA – Les combustibles innovants.
- 20 octobre 2022 : Andra – Les activités scientifiques et technologiques en support au développement du centre de stockage Cigéo.
- 17 novembre 2022 : Andra et producteurs – La gestion des déchets TFA.
- 07 décembre 2022 : CEA - Premiers résultats du programme quadripartite sur les bitumes.
- 08 décembre 2022 : Andra - Les activités scientifiques et technologiques en support au développement du centre de stockage Cigéo et le post dépôt du dossier de DAC.
- 11 janvier 2023 : CEA - Thème cycle nucléaire français : Moxage des EPR-2 et usines du cycle (audition à préparation renforcée).
- 12 janvier 2023 : Andra – La gestion des déchets FAVL (audition à préparation renforcée).
- 08 février 2023 - matin : CEA - Réacteurs innovants (SMR, AMR, accompagnement des projets portés par les start-up).
- 09 février 2023 - matin : Andra (en lien avec la DGEC) - Thème : volet « réacteurs innovants » de France 2030 et appel à projets de France relance sur la gestion des déchets.

AUDITIONS RESTREINTES

- 19 septembre 2022 – après-midi : Administrateur général du CEA
- 28 septembre 2022 – matin : Orano
- 28 septembre 2022 – après-midi : CNRS
- 29 septembre 2022 – matin : Haut-commissaire à l'énergie atomique
- 29 septembre 2022 – matin : EDF
- 29 septembre 2022 – matin : Andra
- 16 novembre 2023 – matin : EDF
- 08 février 2023 (14h-15h) : start-up Renaissance Fusion
- 08 février 2023 (15h-16h): start-up Newcleo
- 08 février 2023 (16h-17h): start-up NAAERA
- 09 février 2023 (14h- 15h) : start-up Jimmy Energy
- 09 février 2023 (15h-16h) : start-up Transmutex

10 février 2023 :	Leadcold (concept SEALER-55 S)
14 février 2023 :	X-Energy (concept Xe-100)
2 mars 2023 :	Westinghouse (concept eVinci)
15 mars 2023 – matin :	EDF
16 mars 2023 – matin :	Orano

ANNEXE IV : LISTE DES PERSONNES AUDITIONNÉES PAR LA COMMISSION

Andra

ABADIE Pierre-Marie
ALAVOINE Olivier
ARMAND Gilles
BARKATE Claudine
BERTRAND Johan
CALSYN Laurent
CORDIER Bérengère
COTTON Julien
CROMBEZ Sébastien
DEWONCK Sarah
EGO Frédéric
FARIN Sébastien
FRASCA Benjamin
GALY Catherine
LAVILLE Arnaud
LECONTE Marc
MENANTEAU Jean-Michel
MILLAN Thomas
NORTURE Anne
PEPIN Guillaume
PLAS Frédéric
REDON Paul-Olivier
ROBINET Jean-Charles
SCHUMACHER Stephan
THEODON Louise
THIRY Yves
VASSALO François
WASSELIN Virginie
ZGHONDI Jad

Andra (invités)

BAUMONT David (SEISTER)
BULTEL Arnaud (Université de Rouen)
OLIVELLA Sébastien - (Université
Polytechnique de Catalogne)
VERMEIREN Charlotte (Université de
Louvain – KU LEUVEN R&D)

CEA

ARAB-CHAPELET Bénédicte
BECHADE Jean-Luc
BERETTI Christophe
CHABERT KORALEWSKI Christine
CHAPELOT Philippe
CHAMPENOIS Jean-Baptiste
COMTE Jérôme
DELUGE Myriam

FIQUET Olivier
GAUTHE Paul
GARNIER Jean-Claude
GAVOILLE Pierre
HASS Jérémy
JACQ François
LAMONTAGNE Jérôme
LEMERCIER Mickael
LORRETTE Christophe
MAREAU Pierre
MIGNOT Gérard
NIZOU Sylvain
SALUDEN Magali
SARRADE Stéphane
SATURNIN Anne
SOREL Christian
SUDREAU François
TRIBOUT-MAURIZI Anne
VALANCE Stéphane
VIGNERON Pierre

CNRS/IN2P3

DAVID Sylvain
PAIN Raynald

DGEC

LEGENDRE Fabrice

EDF

BILLAT Hervé
BUISSET Richard
CARRASCO Manuel
CLEMENT Régis
COLLIGNON Claire
GIRAUD Olivier
GARREL Julien
GREGOIRE-DAVID Cécile
GUNDOGDU Bénil
LAUGIER Frédéric
LE MONIES DE SAGAZAN Henri
MOATTI Marie
MOUSSET Fabrice
SALVATORES Stefano
SIUTKOWSKI Magali
TAKENOUTI Sylvain
VAAST Guillaume
VARE Christophe

FRAMATOME

LOUF Pierre-Henri
RUGAMA Yolanda
VIOUJARD Nicolas

HC

LANDAIS Patrick

ORANO

BRUT Stéphane
DE BEAUCHAINE Florian
EVANS Cécile
FORBES Pierre
HABLOT Isabelle
HANDSHUH Alan
LIBERGE Renaud
MARIN Jean-Michel
NDIAYE Abibatou
PALOMAR Loïc
POUPINEL-DESCAMBRES Marion
ROMARY Jean-Michel
VIOLAS Céline
ZILBER Marine

Renaissance Fusion

VOLPE Francesco

Newcleo

BUONO Stefano
CINOTTI Luciano
RIZOTTI Elisabeth

NAAREA

ALEXANDRE Jean-Luc
BEHAR Christophe

Jimmy Energy

GUYOT Antoine

Transmutex

SERVAN-SCHREIBER Franklin
CARMINATI Frederico

Leadcold

STEDMAN Jacob
WALLENIOUS Janne

X-Energy

BOWERS Harlan

Westinghouse

FRAGMAN Patrick
SHAQQO Mike

ANNEXE V : LISTE DES DOCUMENTS TRANSMIS À LA COMMISSION EN 2022-2023

Andra

- Newsletter du Mag de l'Andra n°43 – juin 2022.
- Newsletter du Mag de l'Andra n° 44 – juillet-août 2022.
- Newsletter du Mag de l'Andra n°45 – septembre 2022.
- Rapport d'activité 2021 – 1991-2021 – L'Andra, 30 ans d'histoire.
- Bilan des concertations sur la phase industrielle pilote et la gouvernance du projet Cigéo – octobre 2022.
- Inventaire national des matière et déchets radioactifs, les essentiels 2023.
- Dossier de demande d'autorisation de création du centre de stockage Cigéo – janvier 2023.

CEA

- Les défis du CEA – N° 49 – Mai-Juin 2022.
- Clefs CEA – L'économie Circulaire - N° 75 – Février 2023.

ANNEXE VI : LES ÉTUDES ET RECHERCHE MENÉES EN PARALLÈLE À L'INSTRUCTION DE LA DAC DE CIGEO

Les études et recherches menées actuellement en parallèle à l'instruction de la DAC peuvent être rangées en trois catégories : celles destinées à optimiser la solution de référence, tout en préservant les marges de sécurité, celles destinées à parvenir à une appréciation encore meilleure des marges de sécurité et celles destinées à tester de nouvelles solutions innovantes.

Optimiser la solution de référence

Au stade du dossier de DAC, l'Andra a retenu des revêtements-soutènements majoritairement constitués de voussoirs compressibles permettant d'optimiser la redistribution des efforts issus du creusement des galeries sur les soutènements réalisés. Ces soutènements ont été testés en vraie grandeur au laboratoire de surface. Ils seront préfabriqués et descendus dans le stockage au fur et à mesure de la construction. Les études entreprises actuellement consistent à mieux maîtriser les flux de fabrication et de mise en place des voussoirs préfabriqués afin de parvenir à un processus industriel de réalisation de l'ouvrage optimal.

Le dimensionnement des carrefours entre galeries dans le dossier de DAC a été basé sur des hypothèses prudentes, en particulier pour les paramètres du comportement du Callovo-Oxfordien. Les réalisations de ces carrures de grand diamètre sont des opérations complexes. Les retours d'expérience provenant d'autres grands projets d'infrastructures souterraines et les expérimentations réalisées au Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne ont permis de vérifier qu'il n'y avait pas de difficulté technologique rédhibitoire. Il y a plutôt des contraintes liées à la sécurité lors du creusement et au phasage du projet. Compte-tenu du nombre important de carrefours à réaliser, l'objectif est d'en optimiser le dimensionnement et les plannings de réalisation afin de réduire les coûts.

Accroître les marges de sécurité

Au stade du dossier de DAC, deux critères sont retenus pour le dimensionnement thermique des quartiers HA : un critère de température maximale du Callovo-Oxfordien d'une part, un critère d'endommagement mécanique du Callovo-Oxfordien d'autre part. Les études ont montré qu'un modèle simplifié du Callovo-Oxfordien permettait d'aboutir à un comportement enveloppe, à partir duquel un dimensionnement a été réalisé par rapport à ces deux critères avec des marges de sécurité suffisantes. Les objectifs du programme de recherche en cours sont de parvenir à une description plus précise du comportement thermomécanique des quartiers HA qui pourrait donner lieu ultérieurement à des optimisations, tout en conservant les mêmes marges de sécurité. Pour cela, des modèles plus sophistiqués considérant les interactions entre les effets mécaniques et thermiques sont développés (augmentation de température aboutissant à une fracturation de la roche). Ces modèles, validés dans le cadre d'un exercice international de comparaison de modèles, serviront aussi à mieux informer la surveillance du quartier pilote HA du stockage et pourront être utile pour les tranches suivantes des quartiers HA.

Les études sur les interactions entre les radionucléides et les molécules organiques, provenant de la dégradation des déchets MAVL contenant de la matière organique et des bitumes, ont pour objet d'évaluer les effets des composants organiques sur la rétention des radionucléides par le Callovo-Oxfordien. En vue de la DAC, ces travaux engagés depuis 2009 ont été complétés en vérifiant que les perturbations induites par les molécules organiques sont très limitées. Les travaux entrepris actuellement visent à confirmer le rôle de la bioréactivité sur la réduction potentielle de la diffusion des molécules organiques dans le Callovo-Oxfordien, ce qui minimiserait l'effet des interactions avec les radionucléides. Il s'agit aussi de consolider la détermination des paramètres gouvernant la migration et l'interaction entre les molécules organiques et les radionucléides, en particulier s'agissant du sélénium. En considérant enfin des systèmes associant de multiples composés chimiques, ces études pourraient permettre aussi de réduire les exigences en matière de co-stockage des déchets MAVL et donc le nombre d'alvéoles en améliorant leur remplissage.

Tester de nouvelles solutions innovantes

Les dispositifs qui seront utilisés pour la surveillance de Cigéo devront tenir compte des caractéristiques particulières du centre de stockage : un environnement souterrain à 500 m de profondeur, un fonctionnement séculaire, et enfin une grande diversité de composants. La surveillance après fermeture sera très limitée. Les études ne concernent donc que la phase d'exploitation du stockage. Selon l'Andra, la définition précise des mesures à collecter (y compris les tolérances) sera faite au moment de l'autorisation de mise en service.

L'Andra dispose d'un grand nombre de dispositifs de surveillance issus de la R&D conduite au laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne. Les travaux de recherche actuels visent à préparer la mise en œuvre industrielle de ces dispositifs dans Cigéo et à maintenir une veille sur les avancées scientifiques et technologiques sur :

- les dispositifs de mesure, par exemple l'emploi de Lidar-Raman pour le suivi de l'atmosphère dans le stockage ou l'utilisation de fibres optiques ;
- les sources d'énergie, avec par exemple un projet de générateur thermoélectrique utilisant de l'américium, financé par France 2030 ;
- le durcissement des capteurs et la transmission sans fil des données.

Ces travaux se poursuivront au cours de l'exploitation du stockage afin de permettre de maintenir une veille active et d'améliorer la surveillance de celui-ci.

L'intelligence artificielle (IA) est de plus en plus présente, dans notre vie de tous les jours comme dans l'industrie. Il est donc logique que l'Andra s'intéresse à ses applications concernant Cigéo. Celles-ci concerne la simulation numérique, le traitement des grandes masses de données qui proviendront de la surveillance comme de la construction de l'ouvrage, ou la robotique.

Les différents travaux réalisés jusqu'à maintenant permettent déjà de souligner les apports des méthodes d'IA en termes de performances, fiabilité et robustesse, dans des cas d'usage représentatifs du fonctionnement de Cigéo. L'Andra poursuit ces différents travaux en s'appuyant sur un large réseau d'experts (École des Mines de Paris, INRAE, Inria). Les résultats sont prometteurs ; par exemple les temps de calcul en simulation sont diminués. L'IA permet de traiter dans un même processus d'analyse une grande masse de données dites hétérogènes, en provenance de mesures ou de modèles numériques, afin d'améliorer la compréhension d'un système et de son évolution. Elle permet aussi de s'accommoder d'éventuelles défaillances de capteurs en utilisant des techniques d'apprentissage de réseaux neuronaux.

Les projets en réponse à l'AAP « solutions innovantes pour la gestion des matières et déchets radioactifs, et la recherche d'alternatives au stockage géologique profond »

L'appel à projets « solutions innovantes pour la gestion des matières et déchets radioactifs, et la recherche d'alternatives au stockage géologique profond » a été lancé dans le cadre de France relance avec l'appui technique de l'Andra. Dans ce cadre, 26 projets ont été déposés en réponse à l'un des trois axes de cet appel intitulé « optimisation de la gestion des déchets et meilleure structuration des filières de gestion ». Quatre d'entre eux abordent le stockage des déchets HA et MAVL. Sont proposés le développement de nouveaux conteneurs pour les déchets HA, de nouvelles techniques de traitement et de conditionnement des déchets MAVL, un projet de cimentation de ces derniers en continu, et enfin des outils permettant de répondre aux besoins de surveillance des colis (imagerie des rayonnement ionisants) et du stockage (alimentation autonome et sans fil de capteurs).

ANNEXE VII : DESCRIPTION SYNTHÉTIQUE DES PROJETS DE NOUVEAUX RÉACTEURS EXAMINÉS PAR LA COMMISSION

Au cours de l'année écoulée, la Commission a conduit des auditions (plénières ou restreintes) consacrées à l'examen de plusieurs projets français de réacteurs innovants :

- le projet de petit réacteur modulaire à eau pressurisée et neutrons thermiques NUWARD (fiche 1) ;
- le projet de réacteur à gaz haute température et neutrons thermiques proposé par Jimmy Energy (fiche 2) ;
- le projet de réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium HEXANA (fiche 5) ;
- le projet de réacteur à neutrons rapides refroidi au plomb proposé par Newcleo (fiche 6) ;
- le projet de réacteurs à sels fondus et à neutrons rapides proposé par NAAREA (fiche 10) ;
- le projet de réacteur Chartreuse P utilisant la fusion nucléaire proposé par Renaissance Fusion (fiche 11) ;
- le projet de système hybride sous critique piloté par accélérateur START proposé par Transmutex (fiche 12).

Par ailleurs, la Commission a examiné plusieurs projets de nouveaux réacteurs étrangers, soit à l'occasion de son voyage d'étude en Amérique du Nord, soit sous forme d'entretiens en visioconférence avec des sociétés qui l'ont accepté. Les projets examinés sont :

- le projet de réacteur à gaz haute température (neutrons thermiques) Xe100 (X-energy – Fiche 3) ;
- le projet de réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium Natrium (Terrapower - Fiche 4) ;
- le projet de réacteur à neutrons rapides refroidi au plomb SEALER-55S (Leadcold - Fiche 7) ;
- le projet de réacteur à sels fondus et neutrons rapides proposé MCFR (Terrapower - Fiche 8) ;
- le projet de réacteur à sels fondus et neutrons thermiques IMCR (Terrestrial - Fiche 9) ;
- le projet de microréacteur refroidi par caloduc eVinci (Westinghouse - Fiche 13).

75

Chacun de ces projets fait l'objet ci-après d'une fiche synthétique qui présente les informations et données principales communiquées par les porteurs des projets, sans appréciation ou évaluation par la Commission. Les fiches sont classées par technologie de réacteur dans l'ordre suivant :

- réacteur à neutrons thermiques, modéré et refroidi à l'eau pressurisée ;
- réacteurs à neutrons thermiques modérés au graphite et refroidis par gaz haute température ;
- réacteurs à neutrons rapides et combustible solide refroidis au sodium ;
- réacteurs à neutrons rapides et combustible solide refroidis au plomb ;
- réacteurs à combustible sels fondus ;
- réacteur utilisant la fusion nucléaire ;
- système hybride sous critique piloté par accélérateur ;
- microréacteur.

Un tableau synthétique des principales caractéristiques des projets figure à la fin de la présente annexe.

Porteur du projet – partenaires

Le projet est porté par la société NUWARD, filiale à 100% d'EDF.

Principaux partenaires : CEA, TechnicAtome et Naval Group.

Technologie du réacteur

Réacteur à neutrons thermiques et eau pressurisée, type REP.

Utilisations envisagées

Production d'électricité.

Puissance

170 MWe par réacteur.

Une centrale associe deux réacteurs, soit 340 MWe.

Combustible

Combustible UOX proche des combustibles des REP de puissance (enrichissement légèrement supérieur).

Gestion du combustible utilisé

Combustible retraitable.

Date de mise en service visée

Premier de série vers 2035.

Avancement du processus de certification

Revue préliminaire conjointe des options de sûreté de NUWARD en cours par les autorités de sûreté finlandaise (STUK), tchèque (SUJB) et française (ASN).

Dossier d'options de sûreté annoncé en 2023.

Certification (décret d'autorisation de création) visé vers 2030.

Commentaire

Chaque réacteur est dans une enceinte. Les enceintes des deux réacteurs d'une centrale sont immergées dans une piscine. Le cœur est sans bore.

Porteur du projet – partenaires

Société Jimmy.

Technologie du réacteur

Réacteur à neutrons thermiques.

Modérateur : graphite, caloporteur : hélium pressurisé.

Circuit primaire : hélium 480°C – Circuit secondaire : CO₂ pressurisé.

Utilisations envisagées :

Production de chaleur industrielle.

Puissance :

10 MW thermiques.

Combustible

Combustible type TRISO conditionné en blocs de graphite – matière HALEU (enrichi à 19,75%).

Les blocs de graphites sont conditionnés dans des « minicuves » pressurisées.

Gestion du combustible utilisé

Entreposage à sec du combustible utilisé dans les « minicuves », puis vitrification des particules TRISO et stockage géologique du combustible utilisé.

Dans une stratégie à long terme, le retraitement du combustible est envisagé.

Date de mise en service visée

2026.

Avancement du processus de certification

Dépôt de la demande d'autorisation de création annoncé en 2023.

Commentaires

La durée de vie visée est 20 ans avec 700 kg de combustible (sans rechargement).

L'approvisionnement en HALEU est identifié comme un enjeu.

Jimmy envisage de créer un site de production en France de combustible TRISO.

Les filières de déchets envisagées sont MAVL pour les déchets d'activation et FAVL pour le graphite.

Dans une stratégie à long terme, le recyclage du graphite est envisagé.

Porteur du projet – partenaires

Société X-energy (États-Unis).

Technologie du réacteur

Réacteur à neutrons thermiques.

Modérateur : graphite, caloporteur : hélium pressurisé.

Circuit primaire : hélium 750°C à 6 Mpa, Circuit secondaire : vapeur 565°C à 16,5 MPa.

Utilisations envisagées

Production de chaleur industrielle et/ou d'électricité.

Puissance

85 MWe (200 MWth).

Combustible

Combustible TRISO (HALEU enrichi à 15,5%) en boulets en lit fluidisé.

Gestion du combustible utilisé

Entreposage puis stockage géologique.

À long terme, la déstructuration des boulets est envisagée pour réduire l'espace de stockage nécessaire.

Date de mise en service visée

Premier de série en 2029 (sur un site d'industrie chimique de Dow Chemicals à Seadrift, Texas).

Avancement du processus de certification

Prelicencing engagé avec la NRC depuis 2018.

La transmission à la NRC du dossier complet est annoncée en 2023.

Commentaire

Financement du projet à 50% par l'ARDP (*Advanced Reactor Demonstration Program*) du DOE.

X-Energy construit sa propre usine de fabrication du combustible TRISO (Tennessee).

Porteur du projet – partenaires

Société Terrapower (États-Unis).

Partenaire GE-Hitachi.

Technologie du réacteur

Réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium.

Utilisations envisagées

Production d'électricité.

Puissance

345 MWe.

Combustible

Combustible métallique sans joint sodium (HALEU enrichi à 16,5%).

Gestion du combustible usé

Durée de séjour en réacteur du combustible : 15 à 22 mois.

Puis entreposage sous eau pendant 10 ans.

Puis entreposage à sec pendant une durée pouvant atteindre 100 ans.

Puis stockage géologique.

Date de mise en service visée

Démonstrateur vers 2027 (Wyoming).

Réacteur commercial vers 2030.

Avancement du processus de certification

US NRC engagement.

Commentaire

Le système dispose d'un stockage d'énergie dans des sels fondus permettant de porter temporairement la puissance à 500 MWe, ce qui permet du suivi de charge.

Porteur du projet – partenaires

HEXANA est une startup 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

La stratégie précise de gestion du combustible reste à définir mais le combustible est retraitable.

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

Société Newcleo (startup basée à Londres, Lyon et Turin).

Partenaire : ENEA (agence italienne pour les nouvelles technologie et l'énergie).

Technologie du réacteur

Réacteur à neutrons rapides refroidi au plomb liquide.

Utilisations envisagées

Production d'électricité.

Brûleur de plutonium et d'actinides mineurs.

Puissance

Démonstrateur : 30 MWe (90 MWth).

Réacteur commercial : 200 MWe (480 MWth).

Combustible

À court terme, fonctionnement à basse température (440°C) : combustible MOX RNR type Superphénix.

À moyen terme, fonctionnement à haute température (530°C) : nouveau MOX RNR à développer.

Gestion du combustible usé

Combustible retraitable.

Date de mise en service visée

2030 : démonstrateur.

2032 : premier de série.

Avancement du processus de certification

Échanges techniques avec l'IRSN.

La production du rapport préliminaire de sûreté est visée en 2025 en vue de l'obtention d'un décret d'autorisation de création en 2027.

Commentaire

Le réacteur est conçu pour fonctionner soit en mode « brûleur de Pu » soit en mode « presque isogénérateur ».

Une version plus puissante, capable de fonctionner en mode isogénérateur, est possible.

Porteur du projet – partenaires

Société Leadcold (Suède).

Technologie du réacteur

Réacteur à neutrons rapides refroidi au plomb.

Utilisations envisagées

Production d'électricité et de chaleur.

Puissance

55 MWe (140 MWth).

Combustible

Combustible nitrure d'uranium avec HALEU (enrichissement à 12%) développé par Leadcold.

Option de repli : combustible oxyde (mais durée de fonctionnement réduite).

Gestion du combustible usé

Le retraitement du combustible nitrure usé est envisagé (contacts avec la France).

À défaut le combustible usé ira en stockage géologique.

Date de mise en service visée

Prototype SEALER-D (démonstrateur de 80 MWth) : 2027.

Premier de série : 2028.

Avancement du processus de certification

Contacts préliminaires avec l'autorité de sûreté suédoise.

Certification visée en 2027.

Commentaire

Les réacteurs sont conçus pour être associés afin de former une centrale de puissance (exemple cité : 20 réacteurs SEALER-55 S formant une centrale de 1,1 GWe).

Le réacteur est scellé et peut atteindre une durée de fonctionnement de 25 ans sans rechargement.

Coût objectif de l'électricité produite : 57 USD/MWh ou 60 €/MWh

Porteur du projet – partenaires

Société Terrapower (États-Unis).

Technologie du réacteur

Réacteur à neutrons rapides à combustible sels fondus.

Utilisations envisagées

Production d'électricité.

Brûleur de plutonium et d'actinides mineurs.

Puissance

Réacteur expérimental : 200 MWe.

Réacteurs commerciaux : 30 à 300 MWe.

Combustible

Réacteur expérimental : NaCl+UCl₃ (avec uranium hautement enrichi fourni par le DOE).

Démonstrateur : NaCl+UCl₃ (avec HALEU).

Gestion du combustible usé

Études embryonnaires.

Date de mise en service visée

Réacteur expérimental : vers 2030.

Démonstrateur, puis versions commerciales : vers 2035.

Avancement du processus de certification

Non précisé.

Commentaire

Une version plus puissante (300 à 800 MWe) est envisagée ultérieurement.

Porteur du projet – partenaires

Société Terrestrial (Canada).

Technologie du réacteur

Réacteur à neutrons thermiques modéré au graphite.

Réacteur à combustible sels fondus.

Utilisations envisagées

Production de chaleur.

Brûleur de plutonium et d'actinides mineurs.

Puissance

195 MWe.

Combustible

Fluorures de lithium et de béryllium.

HALEU (enrichissement < 5%).

Gestion du combustible utilisé

Le combustible pourrait être partiellement retraité.

Il est envisagé de vitrifier les déchets fluorés (ou de les immobiliser par le procédé australien SYNROC), puis de les entreposer sur le site du réacteur.

Date de mise en service visée

Non précisé.

Avancement du processus de certification

Vendor design review conduite avec la CNSC (autorité de sûreté canadienne).

Commentaire

Refroidissement par mélange de sels fondus non radioactifs.

Rechargement tous les 7 ans.

Porteur du projet – partenaires

Société NAAREA.

Technologie du réacteur

Réacteur à neutrons rapides à combustible sels fondus.

Utilisations envisagées.

Production d'électricité et/ou de chaleur.

Brûleur de plutonium et d'actinides mineurs.

Puissance

40 MWe.

Combustible

Chlorure de sodium et chlorure de plutonium (PuCl_3).

Gestion du combustible utilisé

Le combustible utilisé sera retraité (NAAREA souhaite le faire à La Hague mais le procédé industriel n'existe pas encore).

Date de mise en service visée

Certification d'ici 2030.

Avancement du processus de certification

Discussions engagées avec l'ASN et l'IRSN, mais absence de référentiel de sûreté.

Le dossier d'options de sûreté est annoncé fin 2023.

Commentaire

Température de fonctionnement : 700°C.

Le réacteur peut être intégré dans un conteneur de 40 pieds.

NAAREA vise la construction de 300 réacteurs d'ici 2040.

Porteur du projet – partenaires

Société Renaissance fusion.

Technologie du réacteur

Réacteur produisant la fusion nucléaire par confinement magnétique dans un stellarator.

Utilisations envisagées

Production d'électricité.

Puissance

1 GWe.

Combustible

Mélange deutérium-tritium.

Gestion du combustible utilisé

Non indiqué.

Date de mise en service visée

Décennie 2030.

Avancement du processus de certification

Non indiqué.

Commentaire

Parois de la chambre revêtues de métal liquide (PB-Li) pour absorber les neutrons, transférer la chaleur de la réaction et produire le tritium.

Réalisation du champ magnétique du stellarator par gravure laser et pose d'un ruban supraconducteur appliqué sur un cylindre.

Coût de construction visée entre 2 et 3 Md€.

Coût objectif de l'électricité produite : 40 à 80 €/MWh.

Porteur du projet – partenaires

Transmutex : société Franco-Suisse.

Technologie du réacteur

Réacteur sous critique à neutrons rapides refroidi au plomb fondu piloté par un accélérateur (cyclotron) à protons de 800 MeV et une cible de spallation de 4 MWth.

Utilisations envisagées

Transmutation du plutonium, des actinides mineurs ainsi que du Technetium-99 et l'Iode-129.

Production d'électricité ou de chaleur (500°C).

Puissance

300 MWth (soit 100 MWe après consommation du cyclotron).

Combustible

Combustible métallique (ou oxyde) contenant de l'uranium ou du thorium.

Gestion du combustible utilisé

Retraitement du combustible utilisé par électroraffinage.

Date de mise en service visée

Prototype 300 MWth en 2032.

Avancement du processus de certification

Pas de dossier déposé à l'ASN.

Commentaire

Le principe d'implantation consiste à construire sur le site de la centrale électronucléaire dont on veut brûler le plutonium et les actinides mineurs une ou plusieurs unités START et une usine de retraitement et fabrication du combustible.

Porteur du projet – partenaires

Société Westinghouse.

Partenaires : laboratoire nationaux américains.

Technologie du réacteur

Réacteur à neutrons thermiques, Modérateur graphite, Caloporteur : refroidissement par caloduc.

Utilisations envisagées

Production d'électricité et de chaleur industrielle.

Puissance

15 MWth, 5MWe.

Combustible

Combustible TRISO avec HALEU (enrichissement < 19.75%) conditionné dans des blocs de graphite.

Gestion du combustible usé

Le retraitement du combustible n'est pas envisagé.

Les combustibles usés seront entreposés dans l'attente de leur stockage géologique dans des sites du gouvernement.

Date de mise en service visée

Entre 2027 et 2030 (selon avancement de la certification).

Avancement du processus de certification

Processus de certification en cours avec NSC (autorité de sûreté des États-Unis).

Vendor design review en cours avec la CNSC (autorité de sûreté canadienne).

Commentaire

Microréacteur destiné en particulier aux sites isolés, civils ou militaires (remplacement de générateurs diesel).

Technologie du refroidissement par caloduc (sans pièce mobile) dérivée d'applications spatiales.

Le réacteur peut fonctionner 8 ans sans rechargement de combustible. Le rechargement de combustible se fait en usine.

Le système peut être transporté en camions, barge, ou train et être déployé et mis en service en 30 jours.

Le réacteur peut être associé à un système de stockage d'énergie.

TABLEAU SYNTHETIQUE DES PROJETS DE REACTEURS INNOVANTS EXAMINES PAR LA CNE

Produit	Antériorités scientifiques et technologiques	Utilisation	Puissance	Combustible	Gestion du combustible usé	Avancement certification	Mise en service	Coût de l'énergie visé	Commentaire
SMR à eau pressurisée									
NUWARD (SMR REP) neutrons thermiques	Filière REP	Production d'électricité	Une centrale = 2 réacteurs de 170 MWe associés soit 340 Mwe	UOX	Retraitement	DOS annoncé en 2023 certification (décret de DAC) visée vers 2030	vers 2035 (premier de série)	Non indiqué	Les deux réacteurs d'une centrale sont immergés dans une piscine
SMR à gaz haute température									
Jimmy (HTR) neutrons thermiques	Programmes allemand, anglo-saxons et chinois	Production de chaleur	10 MWth	TRISO - HALEU en blocs de graphite	Entreposage à sec puis stockage géologique retraitement envisagé à long terme	Dépôt de la DAC annoncé en 2023	2026	Non pertinent	Modérateur : graphite Température : 480°C Durée de vie visée de 20 ans sans rechargement
Xe 100 (HTR) neutrons thermiques	Réacteurs HTR (jusqu'aux années 1990)	Production de chaleur et/ou d'électricité	85 MWe (200 MWth)	TRISO - HALEU (15,5 %) en boulets dans un lit fluidisé	Entreposage puis stockage géologique	Le dossier complet devrait être fourni à la NRC fin 2023.	Premier de série en 2029 (Texas)	Non indiqué	Financement du projet à 50% par l'ARDP (Advanced Reactor Demonstration Program) du DOE
Réacteurs à neutrons rapides et combustible solide									
Terrapower Natrium (RNR Na)	Filière RNR Na américaine	Production d'électricité avec suivi de charge	345 MWe	Métallique - HALEU (annulaire sans joint sodium)	Stockage géologique du combustible usé après entreposage à sec	"US NRC engagement"	Réacteur de démonstration vers 2027 réacteur commercial vers 2030	Non indiqué	stockage d'énergie dans des sels fondus assurant le suivi de charge et pouvant porter temporairement la puissance à 500 MWe.
HEXANA (RNR Na)	Filière RNR Na française	Production de chaleur et d'électricité	Une centrale = 2 modules de 150 MWe (400 MWth) associés	MOX RNR	Recyclage du combustible usé	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.
Newcleo (RNR Pb)	Filière RNR Na française	Production d'électricité - brûleur de Pu et d'actinides	démonstrateur : 30 MWe (90 MWth) réacteur commercial : 200 MWe (480 MWth)	MOX RNR	Combustible retraitable	Echanges avec IRSN production du RPrS annoncée en 2025	2030 : démonstrateur 2032 : tête de série	Non indiqué	Le réacteur est conçu pour fonctionner soit en mode « brûleur de Pu » soit en mode « presque isogénérateur ». Une version plus puissante, capable de fonctionner en mode isogénérateur, est possible.
Leadcold SEALER-55S (RNR Pb)		Production de chaleur et d'électricité	55 MWe (140 MWth)	Nitride - HALEU (développé par Leadcold)	Le retraitement du combustible usé est envisagé. A défaut, stockage géologique	Contacts préliminaires avec SSM Certification visée en 2027	Premier de série : 2028	57 US\$/MWh	Association des SMR pour former des centrales de puissance : exemple cité : 20 réacteurs fournissant 1,1 GWe

TABLEAU SYNTHETIQUE DES PROJETS DE REACTEURS INNOVANTS EXAMINES PAR LA CNE

Produit	Antériorités scientifiques et technologiques	Utilisation	Puissance	Combustible	Gestion du combustible utilisé	Avancement certification	Mise en service	Coût de l'énergie visé	Commentaire
Réacteurs à sels fondus									
MCFR (Terrapower) RNR sels fondus	<i>Molten-Salt Reactor Experiment (MSRE) at the Oak Ridge National Laboratory (ORNL) 1964-1969</i>	Production d'électricité - brûleur de Pu et d'actinides	200 MWe (réacteur expérimental) 30 à 300 MWe (réacteurs de série)	NaCl+UCl ₃ réacteur expérimental : uranium hautement enrichi démonstrateur : HALEU	Etudes encore embryonnaires	Non indiqué	Réacteur expérimental vers 2030 premier démonstrateur vers 2035	Non indiqué	Une version plus puissante (300 à 800 MWe) est envisagée ultérieurement
IMCR (Terrestrial) neutrons thermiques	Molten-Salt Reactor Experiment (MSRE) at the Oak Ridge National Laboratory (ORNL) 1964-1969	Production de chaleur - brûleur de Pu et d'actinides	195 MWe	Fluorures de lithium et de béryllium et HALEU (<5%)	Le combustible pourrait être partiellement retraité - vitrification (ou procédé SYNROC) pour les déchets fluorés	VDR avec CNSC	Non indiqué	Non pertinent	Réacteur à neutrons thermiques modéré au graphite
NAAREA (RNR à sels fondus)		Production d'électricité - brûleur de Pu et d'actinides	40 Mwe	NaCl - PuCl ₃	Retraitement du combustible utilisé	Discussions engagées avec ASN et IRSN DOS annoncé fin 2023	Certification visée d'ici 2030	Non indiqué	Température 700°C réacteur intégrable dans un conteneur de 40 pieds
Réacteurs à fusion nucléaire									
Renaissance fusion "Chartreuse P" réacteur à fusion nucléaire	Travaux scientifiques amont + travaux technologiques sur les aimants à supraconducteurs	Production d'électricité	1 GWe	Mélange deutérium-tritium	Non indiqué	Non indiqué	Décennie 2030	40 à 80 €/MWh	Confinement magnétique par stellarator réalisé par gravure laser et pose d'un ruban supraconducteur sur un cylindre
Réacteurs pilotés par accélérateur									
START (Transmutex) RNR sous critique piloté par accélérateur	Travaux scientifiques amont	Transmutation et production d'électricité et/ou de chaleur (500°C)	300 MWth	Métallique (Uranium ou Thorium)	Retraitement par électroraffinage	Pas de dossier déposé à l'ASN	Prototype de 300 MWth : 2032	Non indiqué	Réacteur sous-critique au plomb à neutrons rapides - accélérateur à protons 800 MeV - cible de spallation 4MW
Microréacteurs									
Westinghouse eVinci neutrons thermiques	Applications spatiales des caloconducts	Production d'électricité et de chaleur	5 Mwe - 15 MWth	TRISO (HALEU)	Entreposage puis stockage géologique	Procédure en cours avec NSC - VDR en cours avec CNSC	Entre 2027 et 2030 (selon certification)	Le coût du MWh n'est pas un objectif	Microréacteur destiné en particulier aux sites isolés - remplacement des diesels

COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION

Commission en exercice jusqu'au 15 mars 2023

Membres de la Commission Nationale d'Évaluation :

Gilles PIJAUDIER-CABOT
Jean-Claude DUPLESSY*
Christophe FOURNIER
Philippe GAILLOCHET
Robert GUILLAUMONT*
Saïda LAAROUCHI ENGSTRÖM
Vincent LAGNEAU
Emmanuel LEDOUX*
Mickaële LE RAVALEC
Maurice LEROY
Virginie MARRY
José-Luis MARTINEZ
Jean-Paul MINON

Secrétaire général & Conseiller scientifique :

François STORRER

Secrétariat administratif :

Sandra AOUAIDIA
Florence LEDOUX

Nouveaux membres (nommés le 16 mars 2023)

Michel DUBOIS
Jean-Paul GLATZ
Catherine NOIRIEL
Céline PERLOT-BASCOULES
Aude POMMERET

COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION

Président jusqu'au 15 mars 2023 : **Gilles PIJAUDIER-CABOT**

Président à compter du 16 mars 2023 : **Vincent LAGNEAU**

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

Secrétariat administratif : **Sandra AOUAIDIA & Florence LEDOUX**

www.cne2.fr

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

ISSN : 2257-5758