

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°19

Mai 2025

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° 19

MAI 2025

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ – CONCLUSION	7
INTRODUCTION	11
CHAPITRE I : DISPONIBILITÉ DE L'URANIUM NATUREL	13
1.1 LES PROJECTIONS DE LA DEMANDE MONDIALE EN URANIUM NATUREL	13
1.2 L'ADÉQUATION ENTRE OFFRE ET DEMANDE MONDIALE D'URANIUM NATUREL JUSQU'À LA FIN DU SIÈCLE	14
1.3 ABSENCE D'ENJEU DE CINÉTIQUE DU DÉVELOPPEMENT MINIER.....	15
1.4 RISQUE POUR LE NUCLÉAIRE FRANÇAIS D'UNE CRISE CONJONCTURELLE	16
1.5 CRISE STRUCTURELLE - MODIFICATION DE LA STRUCTURE GÉOPOLITIQUE.....	16
1.6 CONCLUSION.....	17
CHAPITRE II : USINES	19
2.1 RAPPEL	19
2.2 NOUVELLES USINES POUR LA GESTION DES COMBUSTIBLES USÉS DES REP ET EPR2.....	19
2.2.1 <i>Usine de fabrication des MOX</i>	20
2.2.2 <i>Usine de retraitement</i>	20
2.3 L'ENTREPOSAGE DES COMBUSTIBLES USÉS	21
2.4 NOUVELLES USINES POUR LA GESTION DES RNR	22
2.5 R&D POUR SOUTENIR LES NOUVELLES USINES.....	22
2.5.1 <i>Usine de fabrication des MOX</i>	23
2.5.2 <i>Usine de retraitement</i>	23
2.6 CONCLUSION ET RECOMMANDATION.....	24
CHAPITRE III : LA FILIÈRE DES RNR NA : UNE ASSURANCE CONTRE LA DÉPENDANCE	27
3.1 LE RNR NA : RETOUR D'EXPÉRIENCE	27
3.1.1 <i>Contexte international sur les réacteurs à neutrons rapides</i>	27
3.1.2 <i>Les acquis français sur la filière RNR Na au service de la conception d'un réacteur filière : expertise et compétence</i>	28
3.2 UN PROJET ORIENTÉ VERS LA FERMETURE DU CYCLE	29
3.2.1 <i>Éléments de cahier des charges pour le RNR filière</i>	29
3.2.2 <i>Les moyens engagés par la filière pour la R&D sur les réacteurs à neutrons rapides</i>	30
3.2.3 <i>La contribution limitée des AMR rapides à la conception du RNR 1000</i>	30
3.2.4 <i>La nécessité de structurer le projet RNR 1000 autour d'un industriel</i>	31
3.3 LE SURCÔÛT DU RNR PAR RAPPORT À UN REP : UNE DÉPENSE ASSURANTIELLE À OPTIMISER	31
3.4 TRANSITION VERS UN PARC RNR, INDÉPENDANCE VIS-À-VIS DE L'URANIUM NATUREL	32
CHAPITRE IV : FORMATIONS ET RECRUTEMENTS DANS LE NUCLÉAIRE, LE DÉFI DE L'ATTRACTIVITÉ	35
4.1 UN APPAREIL DE FORMATION EN ORDRE DE MARCHÉ	35
4.1.1 <i>Un effectif en augmentation dans les formations</i>	35
4.1.2 <i>Des filières de formation couvrant les besoins</i>	35
4.2 RENFORCER L'ATTRACTIVITÉ DU NUCLÉAIRE, UN OBJECTIF PRIORITAIRE	36
4.2.1 <i>L'image dégradée de l'industrie, un contexte d'ensemble</i>	36
4.2.2 <i>Des besoins en recrutement quantifiés par le programme Match du GIFEN</i>	36
4.3 LA COOPÉRATION INTERNATIONALE, OUTIL DE RECRUTEMENT ET DE PROMOTION DU NUCLÉAIRE	38
4.3.1 <i>Les formations de la filière nucléaire française, un atout dans la compétition internationale</i>	38
4.3.2 <i>Mobilité géographique et professionnelle, deux créneaux pour les formations françaises au nucléaire</i>	38
4.4 L'IMPORTANCE CRITIQUE DE LA CHAÎNE DES SOUS-TRAITANTS OU « SUPPLY CHAIN »	39

CHAPITRE V : A&D	41
5.1 CONTEXTE DES OPÉRATIONS D'ASSAINISSEMENT ET DÉMANTÈLEMENT AU CEA	41
5.2 LA STRATÉGIE D'ASSAINISSEMENT ET DÉMANTÈLEMENT DU CEA.....	41
5.3 LES DÉCHETS ISSUS DES OPÉRATIONS D'A&D ET LEUR GESTION.....	42
5.4 LA R&D RELATIVE AUX OPÉRATIONS DE DÉMANTÈLEMENT	42
5.5 LE FINANCEMENT DE L'A&D AU CEA ET SON IMPACT SUR LA STRATÉGIE ET LES CALENDRIERS	43
5.6 RECOMMANDATIONS DE LA COMMISSION	43
CHAPITRE VI : FAVL.....	45
6.1 LA SPÉCIFICITÉ DES DÉCHETS FAVL	45
6.2 LA CLARIFICATION DES INVENTAIRES	46
6.3 MODALITÉS DE GESTION	47
6.3.1 <i>Approche réglementaire</i>	47
6.3.2 <i>Gestion multisite</i>	47
6.3.3 <i>Les potentialités du site de la communauté de communes de Vendevre-Soulaines</i>	48
6.3.4 <i>Faisabilité d'un stockage sur le site d'Orano Malvési</i>	49
6.4 PERSPECTIVES.....	49
6.5 CONCLUSIONS.....	49
CHAPITRE VII : CIGÉO.....	51
7.1 SÛRETÉ À LONG TERME.....	51
7.2 RÉCUPÉRABILITÉ.....	52
7.3 QUESTIONS TRANSVERSES	52
CHAPITRE VIII : LES PETITS RÉACTEURS MODULAIRES (SMR) : PERCEPTION ET PRÉPARATION DE L'IMPLANTATION.....	55
8.1 SÉLECTION DES SITES	55
8.2 LES PARTIES PRENANTES.....	56
8.3 LES STRATÉGIES D'ENGAGEMENT	56
8.4 AVIS DE LA COMMISSION.....	57

GLOSSAIRE :	59
ANNEXE I : COMPOSITION DE LA COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION	65
ANNEXE II : ACTIVITÉ DE LA COMMISSION	67
ANNEXE III : AUDITIONS RÉALISÉES PAR LA COMMISSION	69
ANNEXE IV: LISTE DES PERSONNES AUDITIONNÉES PAR LA COMMISSION	71
ANNEXE V : LISTE DES DOCUMENTS TRANSMIS À LA COMMISSION EN 2024-2025	73
ANNEXE VI : HISTORIQUE ET ACQUIS DE LA FILIÈRE FRANÇAISE DES RÉACTEURS À NEUTRONS RAPIDES	75
VI.1 : PHÉNIX	75
<i>Une conception et une construction rapides</i>	75
<i>Une exploitation aisée</i>	75
<i>La maîtrise des risques</i>	76
<i>Des résultats exploitables sur longue période</i>	76
VI.2 : SUPERPHÉNIX	76
<i>Autres réalisations de RNR contemporaines à Superphénix</i>	77
<i>La construction du réacteur</i>	77
<i>Les délais de mise au point</i>	77
<i>Des performances concluantes après la phase de "déverminage"</i>	78
VI.3 : ASTRID, UN PROJET D'ACTUALISATION DES COMPÉTENCES.....	78
<i>Un projet industriel nécessitant une intense R&D préalable</i>	78
<i>La réduction des ambitions avec New Astrid</i>	79
ANNEXE VII : DESCRIPTION SYNTHÉTIQUE DES PROJETS DE NOUVEAUX RÉACTEURS EXAMINÉS PAR LA COMMISSION FIN 2024	81

RESUMÉ – CONCLUSION

DISPONIBILITÉ DE L'URANIUM NATUREL

La relance du nucléaire est un mouvement général et de nombreuses constructions de centrales sont déjà en cours, notamment en Asie. Compte tenu, au niveau mondial, des projections de développement du nucléaire, on peut estimer que les besoins en uranium naturel seront au moins multipliés par deux à l'horizon 2050. Au vu des ressources existantes, il n'existerait pas de problème jusqu'à la fin du siècle pour couvrir la demande à condition toutefois que le marché reste ouvert.

Les moyens prévus en France pour faire face à une crise conjoncturelle semblent adéquats.

La Commission s'interroge cependant sur la pérennité de la disponibilité de l'uranium dans un monde géopolitiquement peu prévisible. Dans la mesure où les orientations de mix énergétique actuellement envisagées par la France contiennent une part significative de nucléaire, la disponibilité de l'uranium revêt un caractère stratégique. Le risque paraît donc suffisant pour justifier la mise en place de mesures assurantielles concrètes contribuant à atteindre à terme l'indépendance de la filière nucléaire française vis-à-vis de l'uranium naturel.

USINES

La fermeture du cycle inclut le déploiement d'un parc de réacteurs à neutrons rapides, en substitution totale ou partielle aux réacteurs de type REP, avec ou sans étape intermédiaire de multi-recyclage du plutonium en REP. Quelle que soit la trajectoire, cela nécessitera la mise en œuvre de nouveaux procédés dans les usines de l'aval du cycle.

La Commission note que le procédé de séparation Pumas s'avère, au stade actuel des études, prometteur : il serait plus performant que l'actuel procédé Purex pour retraiter le combustible usé UNE, et il permettrait en outre de retraiter efficacement des assemblages de combustibles usés riches en Pu comme le MOX REP et à terme le MOX RNR. La Commission observe avec satisfaction la synergie entre le CEA et Orano, indispensable en vue de la qualification industrielle du procédé. La Commission recommande que l'industrie se donne tous les moyens pour qualifier le procédé Pumas dans un calendrier compatible avec son intégration dans la nouvelle usine, dès la phase d'avant-projet détaillé, en prolongeant au besoin la durée d'exploitation de l'usine actuelle de retraitement des combustibles usés.

Plus généralement, la Commission observe que la coordination des acteurs a été très largement améliorée : les objectifs pour l'aval du cycle du futur sont partagés par les industriels et le CEA, qui ont présenté une stratégie commune pour les atteindre.

LA FILIÈRE DES RÉACTEURS À NEUTRONS RAPIDES

La Commission note que, cette année, les travaux sur les réacteurs à neutrons rapides (RNR) de puissance lui ont été présentés conjointement par les différents acteurs (CEA, EDF, Framatome). Ces travaux s'appuient sur une esquisse de spécification du besoin proposée par EDF, sous l'appellation de RNR 1000 ou réacteur filière. La Commission observe que les connaissances accumulées par la filière française des RNR Na constituent un socle d'expertise facilitant la mise au point d'un RNR de génération IV.

La conception et la construction d'un futur RNR constituant un projet industriel, la responsabilité doit en être confiée à un industriel. Le projet devra être conduit par une maîtrise d'ouvrage forte qui

assure une direction efficace des maîtrises d'œuvre, cela afin de piloter de manière globale les performances, les coûts, les délais et les interfaces. Enfin, la stabilité, pendant toute la durée du projet, du besoin à satisfaire, de l'architecture et des principales options de conception du réacteur est essentielle.

La Commission recommande que le programme de travail qui sera remis à l'État en réponse à la demande du Conseil de politique nucléaire englobe l'ensemble des éléments qui sont nécessaires à la fermeture du cycle : les infrastructures de recherche indispensables, l'accès à des outils d'irradiation, le parc de réacteurs à neutrons rapides, le combustible associé et les usines de l'amont et de l'aval du cycle. Elle recommande d'intensifier les travaux relatifs aux coûts des RNR Na de puissance, en évaluant l'intérêt de toutes les pistes de réduction des coûts envisageables y compris, le cas échéant, celles issues des travaux des porteurs d'AMR à neutrons rapides.

FORMATION ET RECRUTEMENT DANS LE NUCLÉAIRE

La Commission insiste sur la nécessité que les formations aux métiers du nucléaire couvrent tous les niveaux de qualification. Il est souhaitable que les formations de techniciens soient au plus près des bassins d'emploi. Elle recommande que les grands donneurs d'ordres du nucléaire soutiennent les filières techniques de formation aux métiers non nucléaires impliqués dans la construction et la maintenance de nouveaux réacteurs.

ASSAINISSEMENT ET DEMANTÈLEMENT

La Commission approuve l'existence d'une R&D soutenue en appui aux programmes d'assainissement et démantèlement. La Commission recommande que la stratégie à court et moyen terme du CEA pour ces opérations, qui est globalement pertinente, soit complétée par une planification à long terme faisant apparaître le calendrier envisagé pour le démantèlement complet des installations.

8

FAVL

La Commission estime que la méthode proposée par l'Andra avec l'appui du CEA et d'Orano permet une clarification des inventaires de déchets potentiellement admissibles dans un stockage en subsurface. Cette méthode permet d'apprécier le potentiel d'un site à recevoir des déchets FAVL, même si des critères d'acceptabilité spécifiques devront être établis lors des études de sites réels par type de colis et par famille.

La Commission note que le site de la Communauté de Communes de Venduvre-Soulaines (CCVS) pourrait convenir pour les déchets radifères contenant des radionucléides fortement retenus par les argiles. La Commission recommande que les études soient poursuivies sur ce site. L'Andra, prenant acte que ce site ne peut convenir pour les autres familles de déchets FAVL (déchets bitumés, déchets technologiques, déchets graphites) qui contiennent des éléments mobiles, a commencé à spécifier les conditions géologiques et hydrogéologiques favorables pour orienter la recherche de site.

La Commission recommande que toute décision de reclassement de MAVL en FAVL ne soit prise qu'après identification d'un exutoire pour la famille considérée.

CIGÉO

La Commission publiera dans les prochains mois son rapport sur le dossier de demande d'autorisation de création (DAC) de l'installation de stockage Cigéo. La Commission a analysé les piliers scientifiques et techniques sur lesquels s'appuie l'évaluation de la sûreté à long terme et la démonstration de la récupérabilité. Par ailleurs, elle a examiné des questions transverses parmi lesquelles la phase industrielle pilote, la réversibilité et la stratégie de fermeture.

PERCEPTION ET PRÉPARATION DE L'IMPLANTATION DES PETITS RÉACTEURS MODULAIRES

Pour les projets de petits réacteurs modulaires (SMR), la Commission insiste sur la nécessité d'engager le dialogue le plus tôt possible dans le processus de recherche de site. Elle estime qu'il faut clarifier la répartition des rôles en matière de dialogue avec les parties prenantes, entre la start-up, le titulaire de l'autorisation d'exploitation du réacteur et le client industriel. Elle souligne que la conduite du dialogue doit toujours revenir au futur exploitant du réacteur. La Commission recommande toutefois aux clients industriels de ne pas se désengager de la concertation, car ils seront de fait acteurs du projet nucléaire et, à ce titre, inévitablement impliqués dans les débats à venir.

INTRODUCTION

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

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

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

Depuis le discours du président de la République à Belfort du 10 février 2022, de nouvelles orientations ont été données à la filière nucléaire française par les pouvoirs publics. Récemment le quatrième Conseil de politique nucléaire (CPN) « pour assurer notre souveraineté en uranium dans le contexte géopolitique actuel, a validé une stratégie de développement des activités minières d'Orano [...], a confirmé le programme permettant le renouvellement des installations sur l'aval du cycle du combustible nucléaire à la Hague, nécessaire pour l'entreposage et le recyclage des combustibles usés [... et] a lancé des travaux préparatoires nécessaires pour relancer la recherche sur la fermeture du cycle, qui permettra à terme de se passer des importations d'uranium naturel. » (source : présidence de la République).

Le présent rapport présente d'abord l'évaluation de la Commission sur l'état des recherches liées aux orientations stratégiques qui viennent d'être réaffirmées. Ainsi, le premier chapitre s'intéresse à la disponibilité de l'uranium naturel pour alimenter les réacteurs électronucléaires français, le deuxième chapitre fait le point des études conduites en vue du renouvellement des usines du cycle du combustible et le troisième chapitre examine celles relatives à la préparation d'une filière de réacteurs à neutrons rapides (RNR). Le quatrième chapitre est consacré au renforcement de la filière industrielle du nucléaire par la formation et le recrutement.

Le rapport évalue ensuite les travaux relatifs à la gestion des déchets radioactifs. Le cinquième chapitre examine la conduite des travaux d'assainissement et démantèlement d'installations au CEA, le sixième l'avancement des études sur le stockage des déchets de faible activité à vie longue (FAVL) et le septième chapitre la méthode suivie par la Commission pour élaborer son rapport sur la demande d'autorisation de création de l'installation Cigéo, rapport qui paraîtra fin 2025.

Enfin, ce rapport examine dans un huitième chapitre la manière dont les porteurs de projets de petits réacteurs innovants (SMR) abordent la question de l'insertion d'un SMR sur un territoire et de la concertation avec toutes les parties prenantes.

Pour ce rapport, la Commission a tenu compte des documents qui lui ont été transmis jusqu'à fin avril 2025.

CHAPITRE I : DISPONIBILITÉ DE L'URANIUM NATUREL

Les réserves mondiales d'uranium naturel correspondent à la part des ressources qui sont exploitables actuellement, compte tenu de la technologie (extraction et concentration) et des conditions de marché. Elles s'élèvent aujourd'hui à 5,9 millions de tonnes¹, pour un coût de recouvrement de l'uranium naturel inférieur à 130 US\$/kgU. Ces réserves ne permettent pas de déterminer si, ou quand, l'uranium pourrait manquer, car elles dépendent des conditions économiques, en particulier du coût de recouvrement, de la demande, et de l'effort consenti en exploration. Les réserves sont ainsi dynamiques : si le prix de marché de l'uranium augmente, les réserves sont plus élevées. Il existe par ailleurs une limite au coût acceptable pour l'obtention d'uranium supplémentaire, implicitement définie par le rapport entre l'énergie mobilisée pour l'extraction du minerai et sa transformation en combustible et la quantité d'électricité produite (en lien avec l'EROI, *energy return on investment*). Dans le cas précis de l'uranium, qui a une densité énergétique très élevée, cette borne est loin d'être actuellement contraignante.

Les ressources en uranium sont supérieures à ces réserves, et peuvent être classées selon deux catégories.

- Les ressources identifiées recouvrent les ressources raisonnablement assurées (*reasonably assured resources, RAR*) et les ressources présumées (*inferred resources, IR*). Les ressources raisonnablement assurées sont les gisements exploitables d'uranium délimités par des mesures directes dans le cadre d'études de préfaisabilité ou de faisabilité, avec un degré de confiance élevé dans l'estimation des teneurs et du tonnage. Même si les ressources présumées sont définies avec un degré de confiance élevé, elles requièrent tout de même des mesures directes supplémentaires avant que soit prise la décision d'exploiter le gisement.
- Les ressources non découvertes sont les ressources soupçonnées sur la base des connaissances géologiques de gisements identifiés et des connaissances générales de la géologie régionale. Leur existence doit être confirmée, ainsi que les teneurs et les tonnages définis. Elles comprennent d'une part les ressources dites pronostiquées dont on s'attend qu'elles se trouvent dans des provinces uranifères connues (avec quelques preuves directes), d'autre part, les ressources spéculatives qui pourraient se trouver dans des provinces géologiques susceptibles d'abriter des gisements d'uranium.

13

D'après le Red Book (2024, IAEA-NEA), pour un prix de 260 US\$/kgU, les réserves sont de 8,0 Mt, en intégrant les ressources raisonnablement assurées (4,8 Mt) et les ressources présumées (3,2 Mt). Les ressources non-découvertes atteindraient 6,5 Mt. Cependant, la notification des ressources spéculatives d'uranium est incomplète : seuls 26 pays les ont déclarées. En sus, il existe des ressources non conventionnelles, définies comme l'uranium récupérable comme un produit joint de l'exploitation d'une autre ressource (en particulier les phosphates). Elles s'élèvent à 57 Mt (source Red Book) et à 61 Mt (dans 360 gisements, source UDEPO qui est, avant tout, une base de données géologiques, sans connotation économique et qui retient aussi dans les ressources non conventionnelles celles dont la teneur est faible ou très faible).

1.1 LES PROJECTIONS DE LA DEMANDE MONDIALE EN URANIUM NATUREL

D'après le GIEC (2022), la production électronucléaire a augmenté de 9 % entre 2015 et 2019 pour atteindre 2 790 TW, ce qui représente à cette date 10 % de la production totale d'électricité mondiale. La génération d'électricité d'origine nucléaire présente l'avantage d'émettre peu de gaz à effet de serre, alors même que la lutte contre le changement climatique implique de décarboner l'énergie. Cet avantage a été officialisé en juillet 2022, lorsque la Commission Européenne a inclus le nucléaire dans la taxonomie européenne.

¹ à titre indicatif, la consommation actuelle au niveau mondial est d'environ 60 ktU/an.

Le scénario de réduction d'émissions permettant de contenir à 1,5°C l'augmentation de la température globale par rapport à son niveau préindustriel (avec un niveau de confiance supérieur à 50 %) sans dépassement ou avec un dépassement limité, requiert en moyenne une augmentation de 40 % de la production d'électricité d'origine nucléaire à l'horizon 2030 et de 90 % en 2050 avec une part dans la production mondiale d'électricité assez stable, autour de 10 %.

La demande future d'uranium à l'échelle mondiale dépend des choix énergétiques des états : évolution de la demande en énergie, place de l'électricité dans le mix énergétique, place de l'électronucléaire dans le mix électrique. En outre, la consommation d'uranium naturel est plus ou moins grande selon le type de cycle du combustible (ouvert, retraitement partiel, cycle fermé), pour la même quantité d'énergie électronucléaire produite. L'installation de nouvelles capacités nucléaires augmentera les besoins en uranium, non seulement en raison de la capacité supplémentaire des réacteurs qui devront être alimentés en combustible, mais aussi parce que les besoins en combustible de première charge sont plus élevés que les recharges pour les centrales en service.

Sur ces bases, l'agence de l'énergie nucléaire (NEA) et l'agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) estiment dans le Red Book (2024) que la demande d'uranium mondiale, qui était de 59 kt en 2022, devrait évoluer entre 67,6 kt par an (scénario bas) et 76,5 kt (scénario haut) en 2030, et entre 90 kt et 142,6 kt en 2050. Le scénario bas est fondé sur une augmentation de la capacité nucléaire mondiale à environ 574 GWe d'ici 2050, ce qui représente une augmentation de 45 % par rapport à 2023. Le scénario haut prévoit une capacité multipliée par 2,3 par rapport à 2023, la capacité nucléaire mondiale étant estimée à 900 GWe d'ici à 2050. Pour les deux scénarios, l'essentiel de la croissance est supposé se concentrer en Asie de l'Est.

Le scénario de référence de la World Nuclear Association, quant à lui, prévoit que la capacité électronucléaire en 2040 devrait atteindre 486 GWe (scénario bas) et 931 GWe (scénario haut) : cela se traduit par des besoins mondiaux en uranium entre 87 kt et 184 kt en fonction du scénario.

14

Les scénarios hauts sont cohérents avec la déclaration sur le triplement de l'énergie nucléaire entre 2020 et 2050 faite pendant la COP 28 de Dubaï fin 2023, par plus de 20 pays de quatre continents dont les États-Unis, le Canada, la France, les Pays-Bas et la Suède. Au-delà des déclarations d'intention, ces annonces et projections de développement rapide sont cependant à nuancer au regard du temps actuel de construction des centrales occidentales et de l'indisponibilité des financements nécessaires dans certains pays.

La Commission observe que, même s'il existe de forts écarts entre les scénarios, tant en termes de capacité électronucléaire que d'uranium nécessaire pour atteindre une capacité donnée, on peut inférer de ces chiffres un doublement à minima des besoins en uranium naturel à l'horizon 2050.

1.2 L'ADÉQUATION ENTRE OFFRE ET DEMANDE MONDIALE D'URANIUM NATUREL JUSQU'À LA FIN DU SIÈCLE

La ressource en uranium est largement suffisante pour alimenter la croissance des besoins d'ici 2040. On dispose en effet de 5,9 Mt de réserves à un coût inférieur à 130 US\$/kgU pour 115,6 ktU/an nécessaires à cet horizon dans le scénario haut du Red Book (2024), soit plus de trois fois les quantités nécessaires si cette consommation haute était appliquée dès à présent.

Actuellement, la part liée à l'extraction de l'uranium naturel dans le prix du kWh est de l'ordre de 5 %, soit 0,2 à 0,3 centime. Même à 260 US\$/kgU (pic constaté début 2024 pour le marché spot contre 195 US\$/kgU pour le marché à long-terme en 2025), ce coût est acceptable pour produire de l'électricité et les ressources identifiées se montent alors à 8,0 Mt.

Les ressources non conventionnelles représentent l'essentiel des ressources (57 Mt, contre 14,5 Mt pour les ressources conventionnelles). Si les estimations des ressources conventionnelles

ont peu évolué entre 2021 et 2023 (+0,2 % pour les ressources identifiées, +1,9 % pour les ressources raisonnablement assurées et -2,3 % pour les ressources présumées) les ressources non conventionnelles ont significativement augmenté entre 2017 et 2024, passant d'après l'UDEPO de 280 gisements et 51 Mt en 2017 à 360 gisements et 61 Mt.

Dans ces ressources non conventionnelles, on trouve par exemple l'uranium comme coproduit dans les gisements métallifères (mine de cuivre d'Olympic Dam) ou dans des gisements de phosphates. Il faut souligner que le pilotage d'une mine se fait sur le minerai qui est la source principale de revenu : il n'y a pas de levier pour augmenter la production du coproduit. En se basant sur les productions de 2024 à Olympic Dam, soit 1 865 kt de cuivre et 3,19 kt d'uranium il faudrait que le prix de la tonne d'uranium soit 585 plus élevé que le prix de la tonne de cuivre pour que l'uranium devienne la première source de revenus. Actuellement, le ratio de prix est de 21. Compte tenu de la demande future anticipée pour le cuivre, il est peu probable que son prix baisse, et si le prix du cuivre restait constant, il faudrait que celui de l'uranium soit multiplié par 28 pour qu'il devienne la substance principale extraite d'Olympic Dam.

Dans les annonces récentes, on trouve celle de la Chine qui aurait découvert 30 Mt d'uranium dans des grès éoliens dans le bassin d'Ordos, ce qui constitue un nouveau type de gisement suggérant l'existence d'autres ressources dans des configurations géologiques semblables (présentes en Chine).

Malgré quelques annonces récentes, les travaux sur les procédés d'extraction de l'uranium de l'eau de mer restent très prospectifs ; les questions de qualification à l'échelle industrielle, de quantité d'eau de mer à traiter, et d'énergie associée, ne sont pas abordées.

La couverture de la demande mondiale (suivant les différents scénarios de production d'électricité nucléaire) semble raisonnablement assurée à l'échéance de la fin du XXIème siècle, dans des conditions économiques acceptables, sous l'hypothèse que la ressource soit accessible et disponible pour les opérateurs.

15

L'OFREMI pourrait réaliser des *stress tests* à l'instar de ceux qu'elle fait déjà pour d'autres substances, et le prix de marché de l'uranium naturel pourrait être surveillé. Cependant le signal prix de l'uranium est tellement faible qu'il y a peu à attendre d'un tel travail de veille.

1.3 ABSENCE D'ENJEU DE CINÉTIQUE DU DÉVELOPPEMENT MINIER

La durée de développement d'une mine est de 15 à 20 ans, après identification du gisement, et tend à augmenter. Cependant, l'exploitation par lixiviation *in situ* (ISL, qui concerne plus de la moitié de la production actuelle) est plus rapide à mettre en place que les mines à ciel ouvert ou en travaux miniers souterrains. Cette durée est commensurable avec la durée de développement de parcs de réacteurs électronucléaires, ce qui permet d'anticiper en temps opportun la taille du marché pour les acteurs miniers.

Le prix de l'uranium naturel sur le marché à long terme est supérieur à 100 US\$/kgU depuis 2022 (sans influence, on le rappelle, sur le prix du kWh électrique), ce qui incite bien à l'exploration. Peu de gros gisements ont été découverts récemment, à l'exception de celui du bassin d'Ordos. Les découvertes concernent soit des gisements concentrés de plus en plus petits, soit des grands gisements dont les teneurs se réduisent très fortement.

En France, il n'y a actuellement pas d'activité d'exploration car le prix n'est pas suffisamment favorable. Historiquement, l'exploitation minière, à des fins militaires, consistait en un réseau de mines de petites tailles à ciel ouvert et souterraines. Un gisement est identifié en Dordogne, d'environ 20 000 t, dont la teneur en U est de 0,1 %, ce qui représente environ 2 ans de consommation nationale. D'après l'UDEPO, les ressources géologiques françaises en uranium seraient situées dans 341 gisements, correspondant à une quantité d'uranium entre 74 kt et 217 kt.

L'essentiel des échanges d'uranium naturel s'effectue au travers de contrats à long terme. Cependant, la manipulation des marchés se développe avec l'arrivée d'intermédiaires financiers qui spéculent sur l'uranium. Occasionnant de fortes fluctuations des prix, ils empêchent les investisseurs d'avoir une bonne visibilité sur la rentabilité future et cela tend à retarder les investissements. Par ailleurs, des « *barter deals* » semblent se développer entre États : il s'agit d'accords qui vont au-delà du prix et peuvent consister à troquer des éléments de la chaîne de valeur ou à faire des concessions sans lien direct avec l'uranium. De telles pratiques impliquent que le prix de marché n'informe pas complètement sur la vraie valeur de l'uranium.

L'information sur les prix de marché de l'uranium n'est pas suffisante pour prendre les décisions pertinentes pour le moyen terme, sur la prospection minière et l'ouverture de mines par exemple. Une grande vigilance est donc requise sur les autres signaux.

1.4 RISQUE POUR LE NUCLÉAIRE FRANÇAIS D'UNE CRISE CONJONCTURELLE

Dans le cas particulier de la crise ukrainienne, le marché de l'uranium n'a pas été affecté. Certes, le nucléaire a été épargné par les sanctions directes, mais cela signifie que les effets indirects ont été négligeables et que le nucléaire est protégé des turbulences affectant certaines autres sources d'électricité.

De façon générale, EDF a mis en place un ensemble de mesures d'atténuation du risque sur l'approvisionnement en uranium. Tout d'abord, EDF veille à diversifier ses sources d'approvisionnement (à la fois pour les pays d'origine et les compagnies minières) et est capable de s'ajuster rapidement en cas de problème. Ensuite, la France dispose de stocks qu'elle peut mobiliser : stocks stratégiques, stocks d'uranium appauvri (Uapp) voire d'uranium de retraitement (URT), qu'il serait possible de réenrichir. Ces stocks garantissent un approvisionnement pendant une dizaine d'années en cas d'instabilité du marché pouvant aller jusqu'à la rupture d'approvisionnement.

En synthèse, il y a suffisamment de dispositions prises pour que le nucléaire français puisse faire face à une crise conjoncturelle d'une dizaine d'années affectant le marché et la disponibilité de l'uranium naturel.

Plus généralement, EDF pratique une bonne valorisation des matières en REP (Pu en MOX et ré-enrichissement de l'URT) ce qui réduit le besoin d'uranium naturel de 25 %. En complément, à terme, le multi-recyclage dans le parc EPR2 pourrait permettre d'atteindre une économie de ressource en uranium naturel pouvant aller jusqu'à 40 % au-delà de 2055.

1.5 CRISE STRUCTURELLE - MODIFICATION DE LA STRUCTURE GÉOPOLITIQUE

L'exemple des « *barter deals* » montre que le marché de l'uranium n'est pas complètement ouvert. Les évolutions géopolitiques pourraient aboutir par exemple à la création de blocs de pays qui ne serait pas anodine pour garantir l'approvisionnement en uranium. Il existerait alors un risque géopolitique de réorganisation des échanges mondiaux de l'uranium.

Ce risque dépend de la localisation géographique du minerai, de toute la chaîne de valeur pour aboutir au concentré d'uranium (voire des assemblages de combustible), et des routes commerciales pour l'acheminer. Les interdépendances entre pays proviennent parfois de relations passées (entre le Canada et les États-Unis, la Russie et le Kazakhstan, ou la Chine et les pays des nouvelles routes de la soie en Afrique). La recomposition des routes de l'uranium est en cours, avec une volonté de diversification (avec par exemple une route d'export du Kazakhstan via la mer Caspienne). Les gains de cette diversification sont cependant à mettre en regard des risques

supplémentaires qu'elle engendre *via*, par exemple, la réaction sous forme de représailles possibles des états impactés.

Les mesures de précaution qui pourraient être mises en place pour sécuriser l'approvisionnement d'uranium pour le nucléaire français consisteraient tout d'abord à évaluer précisément les disponibilités, à différents niveaux géographiques, et sur toute la chaîne de l'amont du cycle. Ces mesures prises à l'échelle de l'OCDE, seraient intéressantes mais elles n'apporteraient pas de réelles garanties pour la France car la clef de répartition de l'uranium entre les pays n'est pas fixée et le risque de priorisations nationales demeure. Au niveau européen, c'est l'Agence d'approvisionnement d'Euratom (AAE) qui a pour mission principale de garantir la sécurité de l'approvisionnement en matières nucléaires et en combustible nucléaire pour tous les utilisateurs de l'UE. À cette fin, elle prend de sa propre initiative, des mesures ou en propose à la Commission européenne.

Enfin, l'utilisation optimale de la matière (recyclage voire multi-recyclage en REP) permettrait une économie jusque 40 % d'uranium naturel mais cela ne fait qu'alléger la dépendance à l'extérieur.

1.6 CONCLUSION

Compte tenu, au niveau mondial, des projections de développement du nucléaire et des ressources existantes, il n'apparaît pas de problème à court, moyen et long terme pour couvrir la demande dans un monde ouvert. Cela implique cependant une surveillance des signaux autres que les prix afin que les bonnes décisions en matière d'exploration ou de développement minier soient prises.

Les moyens prévus en France pour faire face à une crise conjoncturelle semblent adaptés.

La Commission s'interroge cependant sur la robustesse de l'analyse de la disponibilité à long terme, dans un monde géopolitiquement peu prévisible. Dans la mesure où les orientations de mix énergétique actuellement envisagées par la France contiennent une part significative de nucléaire, la disponibilité de l'uranium revêt un caractère stratégique. Le risque paraît donc suffisant pour justifier la mise en place de mesures assurantielles concrètes contribuant à atteindre à terme l'indépendance de la filière nucléaire française vis-à-vis de l'uranium naturel.

CHAPITRE II : USINES

2.1 RAPPEL

L'objectif de parvenir à la fermeture du cycle a été confirmé au plus haut niveau. Elle s'inscrit dans une stratégie qui s'étend sur un siècle et intègre le déploiement d'un parc de réacteurs à neutrons rapides RNR, en substitution totale ou partielle aux réacteurs à neutrons thermique de type REP et avec ou sans une étape intermédiaire de multi-recyclage du plutonium en REP (MRREP). EDF, Orano, Framatome et le CEA étudient depuis quelques années l'enchaînement des cycles du combustible associés aux deux options. Dans tous les cas ceux-ci nécessiteront de nouvelles usines pour la fabrication des assemblages de combustibles (AC) neufs (ACN) et le retraitement des assemblages de combustibles usés (ACU). Sans ces usines, le mono-recyclage du Pu et l'utilisation de l'URT tels que pratiqués aujourd'hui en REP ne pourraient se poursuivre au-delà du milieu du siècle date au-delà de laquelle les usines Melox et UP2 800/UP3 ne seront plus opérationnelles.

La teneur en plutonium des combustibles mais aussi l'isotopie de l'uranium et du plutonium sont des paramètres très importants pour définir les caractéristiques des nouvelles usines. La puissance et la configuration du parc, au moins pour les 40 années à venir au-delà de 2040, sont essentielles pour définir les capacités des usines. Les scénarios de développement du parc actuel permettent d'avoir accès à ces données. Ces scénarios sont étudiés par le CEA et les industriels sur la base de données de gestion des réacteurs et de la durée de préparation des ACN et de retraitement des ACU. En effet ils donnent de façon incrémentale annuelle les bilans matières lors des modifications du parc, constructions et fermetures de nouveaux réacteurs, changements de combustibles.

19

Dans ses derniers rapports et en particulier dans son rapport 18, la Commission a examiné l'avancement des solutions techniques pour réaliser les nouvelles usines de fabrication (Melox 2) et retraitement à la Hague. Certains scénarios retenus, encore à l'étude, considèrent la possibilité de mettre en œuvre du multi-recyclage en REP (MRREP) après 2050 dans 24 EPR2 (40 GWe) fonctionnant à cette puissance sur 40 ans à partir de 2060, tous les REP dits de deuxième génération ayant été mis à l'arrêt définitif à cette date. On rappelle que le MRREP est présenté comme une étape vers les réacteurs à neutrons rapides (RNR) qui seuls permettront la fermeture complète du cycle, en présentant un double intérêt : faire progresser la technologie et les procédés de retraitement du MOX, permettre une économie d'U naturel d'environ 20 % par rapport au mono-recyclage.

Techniquement, la construction des nouvelles usines doit tenir compte de l'ensemble des contraintes de l'exploitation des parcs et notamment de la capacité d'entreposage des ACU et, bien sûr de la réalité des échelles de temps industrielles.

2.2 NOUVELLES USINES POUR LA GESTION DES COMBUSTIBLES USÉS DES REP ET EPR2

Les études concernant la réalisation, à la Hague, des ateliers de Melox 2 et de retraitement des ACU, qui constituent ensemble la future usine « Aval du Futur », ont été présentées cette année à la Commission par Orano. Il s'agit en fait d'usines dans une grande Usine. Toutes les opérations de préparation des autres assemblages de combustible (AC) pour alimenter les futurs parcs de REP à partir du Yellow Cake ou d'oxydes d'uranium se font et se feront en dehors de la Hague (Malvési, Pierrelatte, Romans).

2.2.1 Usine de fabrication des MOX

La perspective du MRREP et du développement à terme des RNR nécessite un schéma industriel qualifié par Orano d'*agile et adaptable*, permettant de répondre aux futurs besoins du parc EPR2 à l'horizon 2040.

La construction de Melox 2 à La Hague bénéficiera des études effectuées dans le cadre du programme GoMox et du retour d'expérience de Melox. Sa mise en service est toujours prévue pour 2040. Dès cette date, elle permettra de préparer les ACN MOX REP à 8-9 % en Pu pour les REP et les EPR. La capacité serait de 170 t/an. Une réserve foncière déjà retenue permettra d'implanter une troisième ligne de fabrication de MOX si nécessaire.

2.2.2 Usine de retraitement

Un schéma d'implantation des ateliers de la future usine de retraitement a été présenté par Orano. Sa capacité devrait être de 1200 t/an de retraitement d'ACU UNE ou ses équivalents en ACU URE, MOX REP et MOX MR. Les usines de La Hague actuelles arriveront en fin de vie vers 2040.

Le procédé Purex mis en œuvre actuellement pour la séparation U/Pu par extraction liquide (phase aqueuse nitrique) /liquide (phase organique) utilise le tributylphosphate (TBP) dilué dans un solvant hydrophobe. Du fait d'une sélectivité moyenne du TBP vis à vis de U, Pu et des produits de fission, plusieurs cycles de purification sont nécessaires pour séparer U et Pu aux normes requises pour leur recyclage. Par ailleurs, la séparation U/Pu nécessite un changement du degré d'oxydation de Pu, de Pu(IV) à Pu(III), qui conduit à une forte consommation d'agents redox et rend le procédé difficile à exploiter dans les limites de fonctionnement en cas de perte de stabilisation de Pu(III).

20

Le procédé Pumas, à l'étude depuis 2009, et dont la R&D s'est accélérée ces dernières années, permettrait un gain très fort par rapport au procédé Purex : l'utilisation d'un monoamide (composé de C, H, O et N) plus sélectif que le TBP permettrait d'une part d'éliminer un cycle de purification de l'U (et donc d'éliminer un atelier de la chaîne de traitement), d'autre part de supprimer les déchets phosphatés. La séparation U/Pu serait basée uniquement sur des changements d'acidité, ce qui permettrait de s'affranchir des étapes redox du procédé Purex, simplifiant ainsi la gestion de la sûreté liée à l'utilisation de réactifs redox et de stabilisants, tout en diminuant les rejets (nitrates en particulier). Ainsi Pumas serait plus compact, moins coûteux et plus vertueux du point de vue environnemental, pour tous les types de combustibles (combustibles usés UOX, MOX, MOX-MR et MOX-RNR).

Les choix technologiques à mettre en œuvre dans la nouvelle usine (dont ceux concernant le procédé Pumas) sont encore ouverts. Pour le premier jalon décisionnel courant 2027, correspondant au début d'avant-projet sommaire (APS) de la nouvelle usine, le procédé Pumas devrait avoir atteint un TRL de 4 pour être considéré comme une option dans l'APS en parallèle du procédé classique Purex. Orano se donne pour objectif de choisir le procédé (Pumas ou Purex) avant le début de l'avant-projet détaillé (APD) de l'usine fin 2030 : pour être considéré, Pumas devra alors avoir atteint un TRL de 5. Les jalons décisionnels sur la qualification du procédé Pumas pourraient être repoussés si les usines actuelles étaient prolongées. La décision d'une telle prolongation devrait être prise fin 2026. De cette décision dépendra aussi la possibilité d'embarquer d'autres procédés dont la maturité technologique n'est pour l'instant pas aussi avancée que celle du procédé Pumas (par exemple la voloxydation, voir rapport 18).

La Commission note que le procédé Pumas s'avère, au stade actuel des études, prometteur : il serait plus performant que l'actuel procédé Purex pour retraiter le combustible usé UNE et il permettrait, en outre, de retraiter efficacement des assemblages de combustibles usés riches en Pu comme le MOX REP et à terme les MOX-RNR.

La Commission recommande que l'industrie se donne tous les moyens pour qualifier le procédé Pumas dans un calendrier compatible avec son intégration dans la nouvelle usine dès la phase APD, en prolongeant au besoin la durée d'exploitation de l'usine actuelle de retraitement des combustibles usés.

2.3 L'ENTREPOSAGE DES COMBUSTIBLES USÉS

L'entreposage des assemblages de combustibles usés (ACU) constitue, en France, une phase intermédiaire de refroidissement par décroissance de leur radioactivité, indispensable avant leur retraitement. Fin 2023, les quantités d'ACU UOX (ou ACU UNE) représentaient 11 000 tML (tonnes de métal lourd), les quantités d'ACU MOX s'élevant à la même date à 2 500 tML. Les ACU UOX contiennent 96 % de matières valorisables, dont 95 % d'uranium et 1 % de plutonium de bonne qualité isotopique (63 % de ²³⁹Pu et ²⁴¹Pu). Les ACU MOX contiennent également du plutonium (6 %), de qualité isotopique inférieure (55 % de ²³⁹Pu). Il s'agit là de gisements de matières radioactives présentes sur le sol national et réutilisables, à condition que les ACU puissent être aisément repris et retraités.

L'entreposage s'effectue, en premier lieu, dans les piscines BK des REP, puis dans les piscines Orano de La Hague. La principale fonction de l'entreposage sous eau est de conserver les ACU dans le meilleur état possible pour permettre leur reprise en vue de les retraiter.

L'entreposage en piscine bénéficie de plusieurs décennies d'expérience qui en font la solution de référence. EDF assure que l'entreposage en piscine garantit la bonne tenue des ACU, sans limitation de durée.

La PPE2 couvrant les deux périodes 2019-2023 et 2023-2028 prévoyait la fermeture de 14 réacteurs pour parvenir à 50 % d'électricité nucléaire en 2035, ce qui avait pour conséquence la saturation, dès 2028, des capacités d'entreposage de la Hague. Dans le cadre de la PPE3 en cours de finalisation, le maintien en activité du parc actuel et la prolongation à 60 ans de la durée de vie du plus grand nombre possible de réacteurs éloignent cette perspective au-delà de 2040.

Pour optimiser l'utilisation des capacités d'entreposage actuelles et à venir, plusieurs leviers sont prévus.

- La densification des paniers d'entreposage des ACU dans les piscines actuelles de La Hague devrait permettre l'accueil de 3 200 tonnes additionnelles.
- L'extension de la parité MOX sur le palier des 900 MWe moxés permettrait que les recharges des AC MOX neufs passent de 12 à 16. Pour cela il faudra retraiter plus d'ACU UOX ce qui libèrera des places d'entreposage (il faut retraiter 8 ACU UOX pour faire un AC MOX neuf).
- L'utilisation du MOX sur le palier des réacteurs 1300 MWe (actuellement à l'étude sur Paluel 4) ira dans la même sens.

À plus long terme, l'aval du cycle du futur inclut un agrandissement des capacités d'entreposage à La Hague. EDF et Orano ont annoncé fin 2024 l'abandon du projet de piscine centralisée d'entreposage des ACU porté par EDF. Ce projet est remplacé par un autre, à savoir la construction de trois bassins pouvant entreposer chacun 6 500 tonnes d'ACU, toujours à La Hague mais sous maîtrise d'ouvrage Orano. Il est inclus dans le programme « Aval du futur ». Les nouvelles capacités d'entreposage des ACU seront adossées à la construction de nouveaux ateliers et de la nouvelle usine d'Orano, comprenant des capacités de retraitement du MOX, qui devraient être prêts vers 2050.

Enfin, l'entreposage à sec est conservé comme solution de repli. EDF a étudié la tenue des ACU REP UOX entreposés à sec dans des emballages TN Eagle. Le fluage ou déformation progressive permanente des gaines en raison de l'augmentation de la température ne dépasserait pas leur limite à la rupture. L'augmentation de pression de l'hydrogène dans les crayons n'occasionnerait

pas non plus leur rupture. Ces résultats sont confortés par des expériences de même type effectuées aux États-Unis.

La Commission estime que la situation des entreposages est actuellement maîtrisée. Elle continuera à observer avec attention le bon déroulement des projets à court et moyen terme de renforcement des marges.

2.4 NOUVELLES USINES POUR LA GESTION DES RNR

Orano a confirmé qu'à chacune des usines de la Hague (Melox 2 et nouvelle usine de retraitement de deux modules de 600 t/an) pourront être ajoutées des lignes pilotes de préparation d'ACN MOX RNR à 20 % en plutonium et de retraitement d'ACU MOX RNR à 15-16 % en plutonium pour les besoins de start-up ou ceux d'un pilote de RNR de puissance. La capacité de la ligne RNR Melox 2, envisagée dès 2040, serait d'une dizaine de tonnes par an. La ligne de retraitement viendrait plus tard dans le deuxième module, et serait équipée d'un atelier de cisailage pour combustibles particuliers (TCP) mais pourrait aussi retraiter de faibles quantités d'ACU MOX RNR.

Ces lignes optionnelles dans Melox 2 et la nouvelle usine de retraitement seront de faibles capacités. Elles permettront de qualifier les procédés et les technologies pour répondre aux exigences des usines industrielles associées à un parc RNR, mais pour alimenter les RNR de puissance de ce parc, de nouvelles usines seront nécessaires. Orano dispose de réserves foncières pour installer plus tard des usines capacitatives de traitement et de fabrication de combustibles MOX RNR.

L'évolution dans le temps du stock de matières nécessaires pour alimenter à terme un parc RNR peut être modélisée, sur la base d'un scénario présenté par le CEA et émanant de discussions avec EDF et Orano. Il s'agit de la transition du parc actuel vers un parc EPR2 d'une puissance de 40 GWe (constitué de 24 EPR2), puis vers un parc RNR de 50 GWe. Ce scénario considère pour le parc EPR2 deux options de cycle : mono-recyclage ou MRREP. Pour cet exercice, les hypothèses pour les RNR sont les suivantes : puissance unique de 1 000 MWe pour le RNR filière, tête de série de RNR mise en service en 2075, deuxième RNR en 2077, puis déploiement de la filière au rythme d'une paire tous les 3 ans, pour atteindre un parc de 50 RNR en 2160. Vers 2100, il y a 10 RNR, le parc EPR2 entre en décroissance, et après 2160 il n'y a plus que des RNR. L'étude de ces scénarios montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les options de mono-recyclage et multi-recyclage de Pu et URT vis-à-vis de la disponibilité du plutonium nécessaire pour atteindre la fermeture du cycle.

Dans les hypothèses précédentes, l'usine de fabrication du MOX RNR (Melox 3) devra monter en puissance à partir de 2080 jusqu'à pouvoir fabriquer 320 t/an de MOX RNR en 2160. De même, l'usine de retraitement des ACU MOX RNR (Hague 3) devrait passer de 50 t/an vers 2100, début de retraitement de ces assemblages, à 430 tonnes/an en 2160. Elle devra par ailleurs assurer le retraitement des ACU UNE, URE et MOX UNE ou MOX MR. Au total sa capacité serait autour de 1 000 à 1 400 t/an.

2.5 R&D POUR SOUTENIR LES NOUVELLES USINES

Aujourd'hui, les programmes de R&D sont essentiellement conduits par le CEA.

La Commission n'a pas examiné cette année les recherches spécifiques sur la fabrication des ACN UNE et MOX REP, qui sont produits à forte cadence, ni sur le retraitement des ACU UNE.

Dans l'optique d'un MRREP, les nouvelles usines nécessiteront des améliorations pour gérer au mieux la dégradation isotopique du Pu au cours des cycles, et des teneurs en Pu plus élevées dans les CU (voir rapport 18). En particulier, tout nouveau procédé permettant de ne pas perdre en cadence du fait des flux de Pu importants serait un progrès. Le procédé Pumas en fait partie. Par

ailleurs certaines évolutions seront absolument indispensables dans le cas de la fabrication et du retraitement des combustibles MOX RNR.

Le CEA continue ainsi à travailler sur la préparation des assemblages combustibles RNR neufs et le traitement des ACU MOX. Les futurs ACU MOX RNR ne seront pas identiques à ceux de Phénix et Superphénix qui ont été préparés avec du Pu issu du combustible usé de réacteurs UNGG. S'agissant de la radioprotection et de la sûreté, les modifications de l'isotopie du Pu issu des REP, notamment l'augmentation de ^{238}Pu par rapport au CU des réacteurs UNGG, devront être prises en compte pour la construction des nouvelles usines.

2.5.1 Usine de fabrication des MOX

Le CEA a fortement développé la simulation des procédés de fabrication : elle permet l'identification de domaines de fonctionnement des procédés par mélanges de poudres d'oxydes selon la variabilité des matières premières, les spécifications du produit final et les évolutions des étapes. De plus, l'utilisation de la simulation permet de limiter les essais sur matériaux radioactifs. La mise en place de nombreux outils de calcul scientifique (OCS) a connu une très forte dynamique depuis 2019 avec l'objectif à moyen/long terme de disposer de jumeaux numériques des procédés qui seront déployés dans les usines. La démarche globale de la simulation va de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique. Sa validation nécessite un aller-retour constant avec l'expérimentation.

2.5.2 Usine de retraitement

Concernant le retraitement des ACU MOX, l'essentiel de la R&D porte sur la dissolution de l'oxyde MOX et sur le procédé Pumas. Le premier point est lié à la concentration du Pu dans l'acide nitrique : la dissolution doit être complète pour éviter les pertes par formation d'insolubles de Pu. Le deuxième point concerne la séparation U-Pu, étape qui pose un problème dans le procédé Purex lorsque la concentration du Pu excède quelques pourcents. En 15 ans de R&D (2010 à 2024) le développement de Pumas a atteint la phase de faisabilité et fait l'objet d'un programme pluriannuel partagé de développement industriel qui pourrait permettre sa mise en place dès la construction de la prochaine usine de traitement. Depuis 2024 en effet, sur une initiative conjointe du CEA et d'Orano, la R&D sur le procédé Pumas et sa montée en échelle s'est fortement accélérée. Cette R&D s'articule autour de trois axes correspondant à une échelle TRL croissante.

L'axe 1 concerne l'acquisition de données de base pour la modélisation et la mise en œuvre du procédé : conditions d'extraction et spéciation des différentes espèces chimiques dans les systèmes biphasés, propriétés physico-chimiques des mélanges organiques au regard de la radiolyse, et ce, depuis des conditions en inactif jusqu'aux conditions en haute activité. Beaucoup a déjà été accompli, il reste encore à consolider et acquérir des données sur l'impact de certains composés de dégradation du monoamide sélectionné et de la régénération du solvant.

L'axe 2 consiste à valider les performances du schéma de procédé. Ces validations ont lieu sur les plateformes C17 et CBP d'Atalante à Marcoule. En 2021, les performances des cycles en termes de rendement de récupération et de séparation U/Pu ont déjà été validées en moyenne activité, ainsi que l'extraction et la séparation U/Pu à partir d'un combustible MOX sans dilution. En 2024, l'étape de concentration du Pu, permettant d'atteindre la concentration nécessaire pour l'étape de conversion en aval, a été validée, ainsi que la faisabilité de la gestion du neptunium par ajout contrôlé d'acide nitreux. Des essais pour valider les performances du cycle principal en conditions de haute activité sont prévus en 2025. Un pilote est en cours de construction sur Atalante pour tester la partition U/Pu dans des colonnes pulsées de 25 mm de diamètre, dont le fonctionnement devrait être extrapolable à l'échelle industrielle (colonnes de 100 mm de diamètre) grâce aux codes de simulation.

L'axe 3 concerne l'aptitude du procédé à être industrialisé. En particulier, des essais d'endurance doivent être entrepris. Actuellement, on sait déjà quantifier et évaluer l'impact de la plupart des dérivés issus de la dégradation du solvant par radiolyse et hydrolyse. La recherche sur l'identification de ces composés et le traitement du solvant pour les éliminer se poursuit. Concernant le changement d'échelle, les propriétés hydrodynamiques et de transfert ainsi que les données de base (pour alimenter les codes de simulation) doivent être acquises dans des ateliers pilotes dont les dimensions permettent une extrapolation à l'échelle industrielle grâce aux simulations. Il est prévu la construction d'un pilote à l'échelle 1/2 sur le Centre d'innovation en métallurgie extractive (CIME) d'Orano à Bessines, pour valider le design, les performances hydrauliques et de transfert des fluides et des équipements industriels. Il comportera des colonnes pulsées de 8 mètres de haut. Des extracteurs centrifuges seront intégrés en cours d'essai. Ce pilote permettra aussi de vérifier que les prédictions des modélisations sont correctes. L'avant-projet sommaire de ce pilote est quasiment terminé. L'avant-projet détaillé devrait être prêt fin 2025 pour un démarrage prévu fin 2026. C'est la dernière phase avant la construction d'un pilote à l'échelle 1 (en 2028).

La Commission observe avec satisfaction la synergie entre le CEA et Orano, indispensable en vue de la qualification industrielle du procédé Pumas.

La Commission souligne l'intérêt des méthodes numériques mises en œuvre, notamment en dynamique des fluides, pour le dimensionnement des procédés et des équipements.

A terme, la R&D devra intégrer la gestion des déchets produits par les usines, sur laquelle la Commission n'a pas d'informations récentes. Il conviendra notamment d'adapter la vitrification des produits de fission et des actinides mineurs produits par la mise en œuvre des procédés Purex modifiés et Pumas.

De manière générale, le CEA poursuit la R&D sur le développement d'une instrumentation spécifique et innovante pour suivre les étapes des procédés de retraitement des CU et leur chaînage, l'acquisition de données sur la dissolution complète de UO₂, PuO₂ et UO₂/PuO₂ en relation avec leur structure, la confrontation entre expérimentation et simulation. Tous ces travaux font l'objet de partenariats académiques et industriels et donnent lieu à de nombreuses thèses et publications.

2.6 CONCLUSION ET RECOMMANDATION

Les études conduites sur les caractéristiques des nouvelles usines des cycles de combustible, associées à l'évolution envisagée du parc électronucléaire forment un socle de connaissance permettant d'étayer des choix pour aller vers la fermeture du cycle. Si une chronologie des réalisations est présentée, aucun calendrier n'a encore été établi. Aucune option de sûreté n'a été déposée.

Aujourd'hui, disposer de l'usine Melox 2 vers 2040 apparaît indispensable pour continuer de fournir à tout le moins du MOX REP issu du mono-recyclage du Pu. Le retour d'expérience apporté par le fonctionnement de Melox permet de définir les améliorations nécessaires pour Melox 2. Les premiers éléments du dossier d'options de sûreté sont en principe pour cette année.

La situation est moins claire pour la nouvelle usine de retraitement, appelée à retraiter plusieurs types d'ACU dont en premier lieu les ACU MOX REP. On dispose d'un large retour d'expérience du fonctionnement des usines de retraitement mais, s'agissant des nouvelles usines, elles reposeront soit sur des améliorations technologiques si on garde le procédé Purex, et de ce fait il faut qualifier les composants, soit sur des innovations en rupture si le procédé Pumas est mis en œuvre, auquel cas il faut qualifier composants et procédé. Le choix d'embarquer ou non le procédé Pumas dans la nouvelle usine devrait être fait en 2030 avant le début de l'avant-projet détaillé. Quoi qu'il en soit, c'est l'ensemble atelier de déchargement/piscine d'entreposage qui sera construit en premier. Les premiers éléments du dossier de sûreté pour cet ensemble sont attendus en 2025.

Pour les nouvelles usines, la R&D sur les composants (cas des MOX REP et MOX MR) et les procédés (retraitement) est engagée, et leur qualification industrielle est en préparation. Une feuille de route plus précise que le schéma actuel devrait donner plus de visibilité à des opérations qui nécessiteront d'énormes moyens et investissements. Dans ce contexte, une collaboration très étroite entre l'ensemble des acteurs de la recherche et de l'industrie est indispensable.

La Commission observe que la coordination des acteurs a été très largement améliorée : les objectifs pour l'aval du cycle du futur sont partagés par les industriels et le CEA et ont conduit à définir une stratégie commune pour les atteindre.

Un plan de qualification industrielle a été proposé pour l'intégration du procédé Pumas dans les nouvelles usines de retraitement. La Commission recommande que tous les moyens soient engagés pour que ce plan soit mené à bien et dans les délais.

À l'instar de ce que le CEA et Orano ont présenté conjointement en vue de la qualification industrielle du procédé Pumas, la Commission souhaite que lui soient présentés un calendrier comportant les jalons des réalisations des différentes usines, ainsi que la liste des études en cours et des nouvelles études jugées indispensables.

La Commission comprend que, dans l'immédiat, les prochains ateliers de la nouvelle usine de retraitement viseraient le MOX REP et le MOX MR. Les ateliers pilotes qui pourraient être ajoutés à ces usines pour préparer ou retraiter des ACU MOX RNR restent des options.

La Commission recommande que des réflexions sur l'installation des usines de fabrication et de retraitement du combustible RNR soient entreprises de manière coordonnée avec les études sur les réacteurs RNR, de manière que le réacteur soit intégré dans son cycle dès sa mise en service.

A minima, la Commission recommande que les options proposées par Orano pour commencer la fabrication et le traitement de MOX RNR dans les prochaines usines du cycle soient retenues.

Compte tenu des durées des étapes de développement et de qualification, la Commission demande que lui soit présentés l'expression du besoin pour la fabrication du combustible RNR, et les travaux en cours et prévus concernant les procédés de fabrication des pastilles, des aiguilles et des assemblages.

CHAPITRE III : LA FILIÈRE DES RNR NA : UNE ASSURANCE CONTRE LA DÉPENDANCE

La production électronucléaire est un des piliers de la politique énergétique française. Elle dérive de choix historiques, guidés par la volonté de diminuer la dépendance aux importations de combustibles fossiles du secteur énergétique national. Un bénéfice additionnel, non-identifié au moment de ces choix, est l'obtention d'un mix électrique très décarboné par rapport à la majorité des pays européens.

La volonté de fermer le cycle, plus exactement de ne plus reposer sur l'apport continu d'uranium naturel, a été récemment réaffirmée. La fermeture du cycle a de nombreux avantages, d'une part une meilleure utilisation du potentiel énergétique de l'uranium, d'autre part l'indépendance vis-à-vis de l'achat d'uranium dont la production est entièrement réalisée à l'étranger.

La France bénéficie d'atouts importants. Côté cycle du combustible, la politique de monorecyclage prépare la fermeture complète du cycle. Le retraitement des combustibles usés UNE permet déjà de recycler, partiellement pour le moment, les matières fissiles non consommées (^{235}U contenu dans l'uranium de retraitement valorisé en URE, et Pu valorisé en MOX) ce qui diminue les besoins d'importation d'uranium naturel.

Côté réacteur, la France a été pionnière pour l'étude et le développement de la filière des réacteurs à neutrons rapides (RNR). La Commission a souligné, dans plusieurs de ses rapports, que la fermeture complète du cycle du combustible nucléaire ne pourra être totalement réalisée qu'avec des RNR. La filière des RNR Na, choisie par la France, bénéficie d'une maturité technologique élevée. C'est donc la filière permettant d'assurer le plus rapidement à la France une indépendance totale vis-à-vis d'approvisionnements extérieurs en uranium naturel.

Le présent chapitre a pour objet de faire le point sur les acquis techniques des nombreuses recherches et installations dévolues à la mise au point industrielle des réacteurs à neutrons rapides, en vue de la conception d'un futur réacteur RNR Na de puissance, déployé dans un parc électrogène.

3.1 LE RNR NA : RETOUR D'EXPÉRIENCE

3.1.1 Contexte international sur les réacteurs à neutrons rapides

Malgré les difficultés rencontrées dans le passé par la filière RNR, on observe aujourd'hui une accélération rapide des réflexions et des travaux sur ce type de réacteur dans tous les pays actifs en matière de recherche nucléaire.

La Russie étudie activement et de manière continue les réacteurs à neutrons rapides depuis les années 1950. Elle maintient en activité son réacteur expérimental BOR 60 de type RNR Na, lancé en 1968. De plus, c'est encore le seul pays disposant aujourd'hui de réacteurs de type RNR Na couplés au réseau électrique ; le BN-600, d'une puissance de 600 MWe, fonctionne depuis 1980 et le BN-800, d'une puissance de 800 MWe depuis 2016. Par ailleurs, la Russie a entrepris la réalisation d'un complexe pilote de démonstration de la fermeture du cycle autour d'un réacteur à neutrons rapides refroidi au plomb dénommé Brest 300.

La Chine dispose depuis 2011 d'un réacteur RNR Na expérimental, construit par la Russie, d'une puissance de 20 MWe. Elle a entrepris depuis 2017 la construction d'un démonstrateur de 600 MWe, le CFR 600, qui aurait été mis en service mais serait toujours en phase d'essai. Un deuxième exemplaire de ce réacteur est en construction et un modèle de puissance supérieure serait en projet.

L'Inde poursuit depuis de nombreuses années la construction d'un réacteur prototype à neutrons rapides d'une puissance de 470 MWe. Sa mise en service, maintes fois reportée, est annoncée pour 2025.

Aux États-Unis la relance de l'énergie nucléaire est principalement portée par des start-up qui explorent des technologies variées. L'une des plus avancées est la société Terrapower qui a déposé en 2024 le permis de construire d'un réacteur RNR Na dans le Wyoming (projet Natrium).

Le Japon s'intéresse depuis très longtemps à la technologie des RNR Na et a construit entre les années 1970 et 1990 deux réacteurs expérimentaux de ce type sur son sol, Joyo puis Monju. L'industrie japonaise est partie prenante du projet américain Natrium de Terrapower. Par ailleurs, le Japon a relancé en 2024 des études, en collaboration avec des acteurs français, en vue de la construction d'un prototype RNR Na de GEN IV de 600 MWe.

En Europe, la France est largement le pays le plus avancé sur la technologie RNR Na. L'expérience acquise avec Phénix et Superphénix, ainsi que les recherches effectuées dans le cadre du projet Astrid et complétées depuis lors, constituent un actif considérable de la recherche et de l'industrie françaises et peuvent leur permettre de conserver, si elles s'en donnent les moyens, une place de premier plan sur la technologie des RNR.

3.1.2 Les acquis français sur la filière RNR Na au service de la conception d'un réacteur filière : expertise et compétence

La France dispose d'un vaste retour d'expérience sur les recherches en vue du développement de RNR de puissance. Un historique détaillé du développement des RNR de puissance est présenté en annexe VI dont les points saillants sont repris ici.

28

Avec le réacteur Rapsodie, mis en service en 1967, le CEA concrétise ses premiers travaux sur les réacteurs à neutrons rapides, qui conduiront à la construction et l'exploitation de deux réacteurs d'une puissance plus élevée, Phénix puis Superphénix, tous deux aujourd'hui arrêtés et en cours de démantèlement. Ces étapes ont été suivies par le projet Astrid, resté au niveau de l'étude conceptuelle.

Le projet de réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium Phénix a été, depuis sa conception, sa construction (en 9 ans) et son exploitation jusqu'à son démantèlement, d'une grande utilité pour le développement de la filière. On peut en retenir ces éléments principaux :

- une exploitation aisée (grâce au contrôle aisé de la réactivité) et une production significative (26 TWh en quatorze années de connexion au réseau, rendement thermodynamique élevé à 45 %), avec cependant un suivi de charge jugé impossible ;
- une utilisation également comme outil d'irradiation pour l'étude de matériaux exposés aux neutrons, pour tester et qualifier des combustibles pour RNR, et pour la transmutation de l'américium ;
- une maîtrise des risques, notamment l'utilisation du sodium comme liquide de refroidissement du cœur du réacteur ;
- un certain nombre d'incidents ont été signalés et ont pu être traités, dont un retour d'expérience a pu être tiré (voir annexe VI) ;
- une étape importante a été atteinte dans l'objectif de démonstration de la fermeture du cycle, avec une expérience de réutilisation de plutonium issu du retraitement du MOX RNR usé de Phénix.

Le programme Phénix continue de livrer des résultats expérimentaux utiles pour la connaissance et le perfectionnement de la filière. Rassemblés dans un programme intitulé "Trésor Phénix", les principales recherches portent sur le combustible $UPuO_2$ utilisé pendant l'exploitation, la validation des modèles relatifs au cœur du réacteur et le comportement des aciers du circuit primaire.

Le réacteur Superphénix, de forte puissance (1 240 MWe), avait pour objectif d'intégrer un RNR dans son cycle du combustible et de tester des modes de fonctionnement en isogénération du Pu (utile pour un parc 100 % RNR) ou en surgénération (permettant une indépendance vis-à-vis de l'uranium naturel au sein d'un parc hybride de RNR et de REP moxés). Comme tout grand démonstrateur industriel, la construction et le début de mise en opération de Superphénix ont connu des difficultés, parmi lesquelles on peut citer : la vibration des structures internes (résolue par un ajustement de la vitesse des pompes et du débit de refroidissement des collecteurs), la fuite du barillet (qui a conduit à l'abandon de cet équipement et son remplacement par un poste de transfert sous argon), la pollution du sodium des circuits primaires. Les enseignements sur les équipements et les matériaux se sont révélés nombreux, y compris par le retour d'expérience sur les difficultés rencontrées. Superphénix a par ailleurs illustré que des modifications de la politique industrielle et scientifique en cours de projet augmentent la complexité et par conséquent les risques du projet.

Pendant la décennie 2010, le programme Astrid, même s'il n'a pas été jusqu'à la construction d'un réacteur, a suscité une intense activité de recherche (notamment sur les codes de simulation) dont les résultats sont bien compilés.

Enfin, à partir de 2016, des travaux ont débuté en vue de définir une esquisse d'un RNR Na commercial, sous l'appellation RNR 1000 ou RNR Filière. L'objectif est de concevoir un réacteur intégrant les enseignements de la filière nationale, Astrid compris, mais avec une réduction sensible de ses coûts de construction et d'exploitation.

3.2 UN PROJET ORIENTÉ VERS LA FERMETURE DU CYCLE

Dans son rapport n° 18, la Commission rappelait que l'objectif de fermeture complète du cycle n'est accessible que par le déploiement d'un parc de RNR de puissance élevée et s'estimait convaincue que cet objectif ne pourra être atteint que par la création d'un nouveau programme d'ensemble, à visée industrielle, échéancé et financé, allant jusqu'au déploiement d'un parc de RNR de puissance et des usines du cycle associées.

La Commission note que cette année, les travaux sur les RNR lui ont été présentés conjointement par les différents acteurs (CEA, EDF, Framatome). Ces travaux s'appuient sur une esquisse de spécification du besoin proposée par EDF, sous l'appellation de RNR 1000 ou réacteur filière.

3.2.1 Éléments de cahier des charges pour le RNR filière

Ce réacteur doit concourir, par construction, à la fermeture du cycle du combustible. Il doit permettre la surgénération dans un parc hybride EPR – RNR et l'isogénération dans un parc stabilisé 100 % RNR. De forts taux de combustion (burn-up) doivent pouvoir être atteints pour optimiser les coûts de production. Son niveau de sûreté doit être élevé, en détectant au plus tôt tout événement précurseur, en assurant la mitigation de ses effets et en minimisant la probabilité d'une fusion du cœur. La possibilité d'inspecter la robustesse des structures dans le sodium liquide doit y contribuer. Son coût de construction doit être maîtrisé et ses niveaux de disponibilité et de manœuvrabilité élevés. De même, le retraitement des MOX-RNR pour en extraire le plutonium afin d'être multirecyclé avec de l'uranium appauvri doit être fiabilisé à l'échelle industrielle.

La construction du RNR 1000 est envisagée par paires dans des bâtiments rectangulaires permettant de partager les moyens de manutention. Les assemblages de combustible usé seront entreposés dans la cuve principale avant évacuation en piscine via une hotte gaz.

L'amélioration de la sûreté et en particulier de la gestion des accidents graves, conduit à retenir les dispositions de conception suivantes :

- Pour améliorer la stabilité du cœur en situation accidentelle, l'option d'un cœur axialement hétérogène est envisagée (insertion d'une couche fertile d'oxyde d'uranium appauvri pour générer le plutonium et limiter l'effet de vide) ;
- Le récupérateur de corium sera dimensionné pour 100 % du cœur ;
- La cuve de sécurité sera suspendue.

Plusieurs points du cahier des charges du RNR 1000 nécessitent des validations préalables. Au niveau du cœur, les assemblages hétérogènes doivent être qualifiés de même que le dispositif de manutention du combustible. La conception et la validation des soufflets de dilatation doit être menée à bien, les matériaux de la chaudière doivent être améliorés, les boucles secondaires étudiées et validées et les études sur le sodium approfondies (feux et interactions avec l'eau et le corium). Enfin l'instruction de la gestion des accidents graves doit être réalisée.

3.2.2 Les moyens engagés par la filière pour la R&D sur les réacteurs à neutrons rapides

Sur la période 2020-2024, le CEA s'était attaché à capitaliser les connaissances acquises dans des banques de données et des outils de calcul et de simulation. 24 brevets ont été déposés et plusieurs start-up ont été créées en essaimage. Le CEA a exposé à la Commission son programme de travail 2025-2029, qui porte sur les sujets d'intérêt commun au RNR 1000 et aux AMR sodium. En 2025, le CEA mobilise 140 ETPT sur les réacteurs GenIV, dont 110 ETPT et 37 thèses pour la R&D sur les réacteurs à neutrons rapides.

Sur la physique des RNR Na, plusieurs outils de calcul sont en cours de réalisation sur la neutronique, la thermo-hydraulique, la simulation multiphysique, les accidents graves et leur mitigation. Des expérimentations seront effectuées en support.

Des recherches sont programmées sur les gaines de combustibles RNR Na avec les codes RCC-MRX de conception et de construction des matériels mécaniques et le comportement à long terme de l'acier 316 L(N). Des développements sont également conduits sur l'inspectabilité des structures et la vision sous sodium par ultrasons.

Des innovations de conception sont également à l'étude, comme le cœur Cadore à sûreté intrinsèque, le combustible et les composants de la chaudière nucléaire. La fabrication du combustible MOX RNR pour le RNR 1000 requiert également des études et des tests dont l'importance et les difficultés ne doivent pas être sous-estimées.

L'expérience a montré que la conception du combustible de Superphénix a compliqué la fabrication et l'entrée de la chaîne de retraitement des assemblages de combustible usé. La Commission recommande que les études sur la conception du combustible prennent pleinement en compte les aspects industriels du cycle du combustible amont et aval.

Ces travaux de R&D seront conduits en partenariat avec les acteurs industriels, tout particulièrement EDF et Framatome, qui entretiennent et développent des compétences internes sur les RNR.

3.2.3 La contribution limitée des AMR rapides à la conception du RNR 1000

Stimulée par le programme France 2030 et son appel à projet de 2021 pour des réacteurs nucléaires modulaires et de puissance réduite, l'innovation dans le nucléaire a largement fait appel à des technologies bien connues mais encore dépourvues de réalisations industrielles dans le domaine civil. Six des onze start-up ayant répondu à l'appel ont opté pour le principe des réacteurs à neutrons rapides.

Ces projets d'AMR (Advanced Modular Reactor), tous de puissances unitaires inférieures à 300 MWe, se distinguent par le choix du fluide caloporteur. Les trois projets de RNR à combustible solide sont : Newcleo avec un caloporteur plomb, Hexana et Otrera avec un caloporteur sodium. Naarea, Stellaria et Thorizon ont opté pour une technologie très différente reposant sur un combustible à sels fondus.

L'option sodium permet aux porteurs de projets d'AMR de capitaliser sur les connaissances acquises par la filière française, mais le développement des AMR ne devrait concourir que faiblement à celui du RNR 1000 ; en effet, les options de sûreté d'un réacteur de faible puissance ne sont pas toutes extrapolables à un réacteur de puissance plus élevée. En revanche, les AMR peuvent contribuer à la qualification du cœur et des combustibles, aux méthodes d'industrialisation et au redéveloppement du tissu industriel et des compétences.

Les AMR à neutrons rapides et à combustible solide, de par la petite taille de leur cœur, ne peuvent pas atteindre l'isogénération, et encore moins la surgénération. Même mis en batterie afin d'atteindre la même puissance qu'un RNR-Na filière, ils ne contribueront donc pas à la fermeture du cycle.

3.2.4 La nécessité de structurer le projet RNR 1000 autour d'un industriel

Le Conseil de politique nucléaire a demandé que les industriels (EDF, Framatome, Orano), le CEA et l'ensemble des acteurs mobilisés sur les RNR remettent à l'État un programme de travail et une proposition d'organisation industrielle pour la fin de l'année 2025.

La Commission observe que les connaissances accumulées par la filière française des RNR Na constituent un socle d'expertise facilitant la mise au point d'un RNR de génération IV. Pour l'avenir, la Commission souligne l'importance de la structuration du projet et de son organisation.

La conception et la construction d'un éventuel RNR Na du futur constituant un projet industriel, la responsabilité doit en appartenir à un industriel. Le projet devra être conduit par une maîtrise d'ouvrage forte qui assure une direction efficace des maîtrises d'œuvre, cela afin de piloter de manière globale les performances, les coûts, les délais et les interfaces. Enfin, la stabilité du besoin à satisfaire, de l'architecture et des principales options de conception du réacteur, pendant toute la durée du projet, est essentielle.

La Commission recommande que le programme de travail qui sera remis à l'État englobe l'ensemble des éléments qui sont nécessaires à la fermeture du cycle : infrastructures de recherche indispensables et accès à des outils d'irradiation, réacteurs à neutrons rapides, combustible associé et usines de l'amont et de l'aval du cycle.

3.3 LE SURCÔÛT DU RNR PAR RAPPORT À UN REP : UNE DÉPENSE ASSURANTIELLE À OPTIMISER

La finalité première de la filière est sa contribution décisive à l'indépendance de la production d'électricité, mais elle est aussi justifiable par une approche assurantielle des risques d'approvisionnement en uranium. La question de son coût ne peut être, pour autant, tenue pour accessoire. EDF a réalisé plusieurs analyses techniques pour comparer les coûts d'un RNR et ceux

d'un REP. Les coûts de génie civil, de contrôle-commande, d'électricité, de ventilation, d'auxiliaires, de piscine et de manutention sont similaires pour les deux types de réacteurs. En revanche les circuits primaire et secondaire d'un RNR, ainsi que le système de manutention de son combustible, sont plus onéreux que ceux d'un REP. La fabrication du combustible des RNR est également plus coûteuse. Il faut souligner que cette comparaison des coûts sur une base technique n'a pas grand sens dans une logique assurantielle, puisque les RNR se développeraient alors parce qu'il n'y aurait plus d'uranium naturel disponible pour alimenter les REP.

La seule comparaison des coûts fondée sur un RNR réellement construit figure dans le rapport de la Commission d'enquête parlementaire sur Superphénix et la filière des réacteurs à neutrons rapides (rapport n°1018 publié le 26 juin 1998). Les coûts d'investissement élevés conduisaient à une estimation d'un facteur de l'ordre de 2,3 entre le coût du kWh Superphénix et celui d'un REP 1300, aux conditions économiques de 1982.

La recherche d'optimisation économique a donc été une des orientations principales des études de RNR postérieures à Superphénix. Plusieurs comparaisons ont été effectuées sur la base d'études papier ; elles conduisent à des coûts estimés du MWe produit par un RNR de l'ordre de 50 % supérieurs au coût du MWe produit par un REP de puissance comparable.

La comparaison entre Superphénix et le REP 1300 fournit une borne haute du surcoût, soit 2,3 fois plus par kWh. Les analyses postérieures montrent que malgré les contraintes de sûreté toujours plus fortes, ce surcoût devrait pouvoir être réduit par les efforts de R&D et l'effet de la construction en série.

La Commission recommande de poursuivre et d'intensifier les travaux relatifs aux coûts des RNR Na de puissance, en évaluant l'intérêt de toutes les pistes de réduction des coûts envisageables y compris, le cas échéant, celles issues des travaux des porteurs d'AMR à neutrons rapides.

32

La Commission recommande que soient étudiés et quantifiés l'ensemble des services spécifiques que pourrait apporter un parc de RNR afin d'objectiver la question des coûts de manière globale. Elle estime que le coût d'un parc de RNR est à mettre en regard des bénéfices assurantiels qu'il apporte, vis-à-vis du risque d'indisponibilité d'uranium. Un raisonnement comportant une valorisation de la souveraineté apporterait des informations précieuses de nature à éclairer la décision de l'État.

3.4 TRANSITION VERS UN PARC RNR, INDÉPENDANCE VIS-À-VIS DE L'URANIUM NATUREL

La souveraineté de la production d'électricité nucléaire passe par la diminution progressive de la consommation d'uranium naturel. La France met déjà en œuvre aujourd'hui deux premières étapes pour l'atteindre. Le monorecyclage du plutonium issu des combustibles usés permet une économie d'uranium naturel de 10 %. L'utilisation en réacteur de l'uranium de retraitement enrichi (URE), qui vient d'être relancée, permet, à l'équilibre, de porter à 20 % l'économie d'uranium naturel. Au-delà, l'introduction du multi-recyclage en REP, s'il était validé et décidé, permettrait de porter l'économie globale à 40 %.

La Commission s'est inquiétée dans ses précédents rapports du risque de compétition entre les programmes MRREP et RNR, tant pour ce qui concerne les moyens humains et financiers nécessaires que pour l'accès à la ressource plutonium. Les informations apportées à la Commission cette année semblent indiquer que le MRREP ne compromettrait pas la disponibilité du plutonium nécessaire aux RNR. Il présente par ailleurs l'intérêt d'engager dès à présent les travaux indispensables sur le retraitement à l'échelle industrielle du combustible MOX.

Pour s'affranchir complètement de l'uranium naturel, le déploiement des RNR est indispensable. Toutefois, l'indépendance vis-à-vis de l'uranium naturel peut être atteinte avant de disposer d'un parc 100 % RNR. Il est en effet envisageable de faire fonctionner un parc hybride comprenant environ 70 % de RNR et 30 % de REP sans recourir à l'uranium naturel. Pour cela, il conviendrait d'utiliser les RNR en mode surgénérateur pour fournir le plutonium nécessaire à la fabrication du combustible MOX-REP alimentant des REP moxés à 100 %. Un des intérêts majeurs d'un tel parc hybride serait de permettre de prolonger l'utilisation des REP existants (en parallèle de nouveaux RNR), tout en atteignant l'objectif d'indépendance d'accès à l'uranium naturel.

Un parc hybride ne permet d'obtenir l'indépendance vis-à-vis de l'uranium naturel que si les REP sont chargés uniquement avec du combustible MOX. Cette possibilité reste à valider. Cela nécessite également que les RNR puissent être utilisés en mode surgénérateur. La Commission recommande que des études soient conduites pour s'assurer que la conception du RNR filière lui permette d'atteindre le taux de surgénération nécessaire au fonctionnement du parc hybride envisagé.

CHAPITRE IV : FORMATIONS ET RECRUTEMENTS DANS LE NUCLÉAIRE, LE DÉFI DE L'ATTRACTIVITÉ

4.1 UN APPAREIL DE FORMATION EN ORDRE DE MARCHÉ

Réunie au sein du GIFEN (Groupement des industriels français de l'énergie nucléaire), la filière nucléaire française a entamé un processus de recensement de ses besoins actuels ou futurs de recrutement, au travers de son programme Match. L'Université des métiers du nucléaire (UMN) a structuré les filières de formation en les mettant en relation et en s'assurant de leur bonne répartition sur le territoire.

4.1.1 Un effectif en augmentation dans les formations

Le contexte est en amélioration : les effectifs des formations au nucléaire sont, en effet, en augmentation au niveau Master. Ainsi, les cursus de génie atomique ont multiplié par deux le nombre d'étudiants depuis la catastrophe de Fukushima de 2011 qui avait marqué un fort repli des vocations. Les annonces du discours de Belfort du président de la République ont ouvert des perspectives d'emploi encourageantes suivies d'effets.

L'UMN interagit avec les 7 Campus des métiers et des qualifications dans les régions ainsi qu'avec des associations et des groupements d'industriels au niveau des territoires, partant du constat qu'il est indispensable de développer l'offre locale pour maximiser le nombre de candidatures dans les formations au nucléaire. Dans le cadre de l'appel à manifestation d'intérêt "*Compétences et métiers d'avenir*" de France 2030, des adaptations des formations régionales sont en cours de réalisation, avec le soutien de l'État.

À titre d'exemple, 15 % des emplois dans la région Normandie sont fournis par le nucléaire, alors que l'offre de formation ne représente que 5 % des besoins. L'offre de formation est en évolution, financée par l'État à hauteur de 40 millions d'euros, et par la région pour 20 millions d'euros.

4.1.2 Des filières de formation couvrant les besoins

L'UMN coordonne les efforts des lycées techniques et professionnels, et des établissements du supérieur. Elle s'attache à couvrir les besoins en différents types de formation. L'UMN a soutenu plusieurs projets complétant l'offre de formation, en particulier ceux déposés dans le cadre de l'appel à manifestation d'intérêt relatif aux "*Compétences et métiers d'avenir*" de France 2030 (AMI CMA). Au total, ce sont près de 80 nouvelles formations qui sont ouvertes ou en passe de l'être.

Début 2025, les formations conduisant aux métiers du nucléaire sont au nombre de 7000, de niveau CAP à bac+5. Les grands donneurs d'ordres complètent par ailleurs cette offre par la mise en place de formations internes. À titre d'exemple, les tensions sur la disponibilité de soudeurs qualifiés pour remédier à la crise de la corrosion sous contrainte ont conduit à la création de 7 formations de soudure supplémentaires. Il est aujourd'hui possible de former trois cents soudeurs par an, nombre dépassant les besoins évalués par le programme Match.

L'offre de formation devrait maintenant couvrir correctement les besoins. L'enjeu prioritaire est aujourd'hui de remplir ces formations, tout spécialement pour les cursus CAP, BTS ou licences professionnelles.

La Commission observe que plusieurs régions ont soutenu la mise en place au niveau local, de nouvelles formations au nucléaire. Elle insiste sur la nécessité que ces formations couvrent tous les niveaux de qualification. Pour les formations de techniciens, il est indispensable que les formations soient au plus près du bassin d'emploi pour pallier la moindre mobilité de ces personnels.

Par ailleurs, la Commission insiste sur la nécessité que ces formations aillent jusqu'à des certifications pour le domaine du nucléaire.

Elle recommande que les grands donneurs d'ordre du nucléaire, à leur tour, soutiennent les filières techniques de formation aux métiers non nucléaires impliqués dans la construction et la maintenance de nouveaux réacteurs de puissance ou modulaires.

4.2 RENFORCER L'ATTRACTIVITÉ DU NUCLÉAIRE, UN OBJECTIF PRIORITAIRE

4.2.1 L'image dégradée de l'industrie, un contexte d'ensemble

Un sondage sur l'avenir de l'industrie en France, réalisé par l'IFOP fin 2024, montre que la population française estime à 77 % que l'industrie a une importance stratégique en tant que secteur d'avenir. Mais son déclin et son décrochage dans la concurrence internationale sont reconnus dans les mêmes proportions. Une étude de la Société des ingénieurs arts et métiers (SIAM) souligne ainsi le profond déficit d'image de l'industrie : son indice d'attractivité (Net Promoter Score) mis au point par l'IFOP est de -61 pour les 18-24 ans, -52 pour les femmes, et -46 pour l'ensemble des Français. Les niveaux de rémunération proposés par l'industrie en sortie d'études ne contribuent pas à l'attractivité par rapport à d'autres secteurs : dans les secteurs de l'énergie, de la construction, du BTP et de la métallurgie, la fourchette des salaires annuels d'embauche est de 37-39 k€, par comparaison à 45 k€ dans les secteurs de la banque et de la finance.

Les grandes écoles d'ingénieurs voient nombre de leurs diplômés s'écarter de l'industrie. Il est noté par ailleurs une baisse des effectifs optant pour l'enseignement scientifique dans le secondaire, qui touche en particulier les filles depuis la dernière réforme du baccalauréat.

Autres difficultés, même si les flux d'élèves des grandes écoles d'ingénieurs généralistes augmentent, ceux des grandes écoles de spécialité diminuent. La part des enseignements pratiques diminue, ce qui impacte les compétences liées aux savoir-faire techniques.

4.2.2 Des besoins en recrutement quantifiés par le programme Match du GIFEN

Le GIFEN accorde une importance particulière à l'adéquation entre les capacités du marché du travail et les besoins en effectifs et en recrutement de la filière. Les études Match réalisées par le GIFEN et l'EDEC (Engagement, développement de l'emploi et compétences) du ministère du Travail, ont évalué les besoins à 10 ans de la filière nucléaire. Pour l'ensemble des besoins de la filière d'ici à 2033, ce sont 100 000 recrutements qui seront nécessaires, de niveau CAP à bac+5.

Les régions se caractérisant par les besoins de recrutement les plus importants sont la Normandie, l'Île-de-France et la région Auvergne-Rhône-Alpes. En pratique, les besoins de recrutement de nouveaux personnels par la filière nucléaire sont variables selon deux critères : d'une part le niveau de la formation initiale, d'autre part la taille et la structure des entreprises ; les besoins d'emploi des fournisseurs représenteraient la moitié du total.

Les recrutements d'ingénieurs

Les donneurs d'ordre de la filière, qui sont des entreprises publiques (ou contrôlées par l'État) de grande taille et économiquement stables, ne rencontrent pas de difficulté de recrutement au niveau ingénieurs diplômés d'écoles ou d'universités.

Les postes et qualifications les plus recherchées sont les chefs de projet, le génie civil et l'ingénierie système. L'excellence opérationnelle et l'utilisation d'outils numériques devraient aussi, selon le GIFEN, figurer parmi les missions prioritaires confiées aux nouvelles recrues de la filière.

Les besoins d'opérateurs spécialisés

Le recrutement de techniciens de niveau CAP, BTS ou Licence Professionnelle est pour sa part difficile, en particulier dans certaines régions. Une vingtaine de métiers sont identifiés comme étant en tension. Les qualifications indispensables pour la construction sont les suivantes : dessinateur-projeteur, projeteur génie civil, projeteur BIM (Building Information Model), monteur, coffreur-bancheur, conducteur de travaux. Pour l'exploitation et la maintenance, les spécialités suivantes sont recherchées : automaticien, électricien, chaudronnier, tuyauteur, soudeur, bobinier, fondeur, forgeron, maintenance, radioprotection.

Ces métiers ne sont spécifiques au nucléaire que pour 10 % d'entre eux. Le défi de ces recrutements se pose ainsi pour l'ensemble de l'industrie. Il est critique pour la relance du nucléaire.

L'évolution des conditions d'emploi souhaitées par les nouvelles générations

La stabilité et les avantages qu'offrent les grands donneurs d'ordre sont des critères d'attractivité. Certains sous-traitants, à l'inverse, peuvent séduire des profils plus mobiles, par leur agilité, leur maîtrise des technologies numériques les plus avancées ainsi que la possibilité de travailler pour plusieurs industries différentes.

Les projets nucléaires étant des projets de longue durée dont l'aboutissement peut sembler lointain, certains industriels cherchent à accroître la mobilité des personnels au sein leur structure (fonction, formation, localisation). La segmentation des projets en sous-projets de durée réduite peut correspondre aussi aux envies de changement et de renouvellement des tâches.

Capitaliser les innovations des start-up de France 2030

Les appels à projet de SMR et d'AMR lancés dans le cadre de France 2030, ont donné un nouveau souffle et une nouvelle image au nucléaire ; ils ont eu un réel impact sur l'engagement des jeunes diplômés dans les filières nucléaires. Si ces projets s'appuient, pour un grand nombre d'entre eux, sur des technologies nucléaires connues, les projets de réacteurs innovants présentent des caractéristiques nouvelles sur plusieurs plans dont il conviendra de tirer parti pour l'ensemble de la filière.

La gestion de l'innovation dans les grandes organisations est une difficulté rémanente. La constitution d'équipes resserrées et indépendantes est un atout pour innover. Non seulement les structures *ad hoc* favorisent l'innovation mais elles renforcent également la motivation des personnels. Les start-up, en reconsidérant les méthodes de gestion du temps et des tâches, sont plus agiles pour répondre aux contraintes de délais imposés. La participation au capital des employés des start-up est également une source de motivation.

L'industrialisation de la construction des SMR et AMR, pour en réduire les coûts et accélérer la mise en service, donne lieu également à des innovations qui peuvent être d'une grande utilité pour l'industrie nucléaire.

Constatant que sur le plan national, la demande de personnels techniques excède largement le nombre de candidats, la Commission estime nécessaire l'amélioration de l'attractivité de ce type de métiers. La simplification des procédures, l'utilisation d'outils numériques et la revalorisation de leurs carrières pourraient notamment y contribuer.

4.3 LA COOPÉRATION INTERNATIONALE, OUTIL DE RECRUTEMENT ET DE PROMOTION DU NUCLÉAIRE

La France est reconnue comme l'un des leaders mondiaux de la recherche et de l'industrie nucléaire. La valorisation de cette position par la coopération internationale est souhaitable. La formation de personnels étrangers peut être un atout concurrentiel à l'export, particulièrement pour des états primo-accédants. Les échanges de bonnes pratiques sont de nature à renforcer l'efficacité et la sûreté du secteur. Enfin, la coopération internationale peut aussi permettre de disposer d'un vivier de recrutement plus large.

4.3.1 Les formations de la filière nucléaire française, un atout dans la compétition internationale

En se basant sur les seuls projets de construction de réacteurs dans le monde occidental, l'Institut international de l'énergie nucléaire (I2EN) constate un fort besoin de compétences nucléaires dans les années à venir. Les recrutements seront importants, qu'il s'agisse de compléter le parc nucléaire existant (en République tchèque, en Hongrie ou au Canada) ou bien de construire *ex nihilo* un parc de production d'électricité nucléaire (en Pologne, en Slovénie ou au Kazakhstan). D'une manière générale, les cursus nucléaires nationaux actuels sont insuffisants pour couvrir les besoins futurs.

38

Le savoir-faire français en matière de formation au nucléaire est d'ores et déjà mis en avant et pourrait, en étant davantage promu l'international, constituer les prémices de coopérations plus étendues.

4.3.2 Mobilité géographique et professionnelle, deux créneaux pour les formations françaises au nucléaire

Le Canada mise sur le renforcement de son parc nucléaire pour atteindre le Net Zéro en 2050. Son programme présente la particularité de recourir à la fois aux SMR pour les territoires isolés et aux réacteurs de puissance pour les zones interconnectées. Son appareil de formation doit redoubler d'efforts satisfaire les besoins d'emploi du secteur nucléaire, qui devraient croître de 20 % en 3 ans. Les coopérations sont en cours d'approfondissement entre les filières de formation françaises et canadiennes avec, comme horizon, la mise en place de doubles diplômes, la reconnaissance de diplômes étrangers et les échanges de personnels qualifiés.

Un objectif commun réunit les pays nucléarisés ou en passe de l'être : élargir le vivier de candidats à l'emploi dans le nucléaire. L'I2EN travaille sur ce sujet dans le cadre de ses contacts internationaux.

La reconversion professionnelle et la requalification dans les métiers du nucléaire sont aussi des sources de recrutement, tout particulièrement dans une période de bouleversement du tissu industriel. Différents outils sont à développer, comme les bourses internationales d'études, la formation à distance, et les cours ou séminaires compatibles avec des obligations professionnelles.

L'accueil d'étudiants et de cadres étrangers dans les cursus français et l'internationalisation de ces filières permettraient, entre autres avantages, d'élargir le vivier des candidats en France et d'assurer le rayonnement ou "soft power" de la recherche et de l'industrie nucléaires nationales.

La Commission souligne également que la filière pourrait bénéficier d'une mobilité accrue des salariés entre les donneurs d'ordre et les entreprises sous-traitantes, cette mobilité permettant d'assurer la transmission des compétences.

4.4 L'IMPORTANCE CRITIQUE DE LA CHAÎNE DES SOUS-TRAITANTS OU « SUPPLY CHAIN »

Les annonces du discours de Belfort en 2022 du président de la République semblaient avoir mis fin à l'absence de perspectives pour les entreprises de taille intermédiaire (ETI) sous-traitantes, après 25 années d'arrêt de la construction de centrales nucléaires. Selon le GIFEN, 62 % des 2 000 entreprises de la filière nucléaire ont recruté en 2023 pour leurs activités dans le nucléaire. La part des jeunes diplômés s'élève à 36 % du total. À titre d'exemple, Assystem a réalisé 2 000 recrutements en 2024 mais n'en prévoit que 1 000 en 2025.

Ce sont les perspectives à long terme de la filière dessinées par les pouvoirs publics qui ont motivé ces embauches. Nombreuses, toutefois, sont les entreprises qui s'inquiètent des retards dans la traduction budgétaire des annonces du président.

La taille limitée des entreprises et leurs contraintes de financement bancaire nécessitent des commandes fermes et des plans de charge pluriannuels, préalablement à l'embauche d'ingénieurs et de techniciens. Les travaux sur le parc existant compensent seulement partiellement les incertitudes sur les anticipations de chantiers de construction. Le risque d'orientation des nouveaux entrants dans les activités non nucléaires, voire de licenciements, existe, alors que la relance du nucléaire nécessite une « *supply chain* » résiliente et de qualité.

Le GIFEN s'est donné pour mission de resserrer les liens entre les grands donneurs d'ordre du nucléaire et les ETI de la chaîne de sous-traitance.

*La Commission alerte sur le fait qu'en l'absence de commandes fermes il est vain d'espérer une montée en puissance effective de la « *supply chain* ».*

CHAPITRE V : A&D

5.1 CONTEXTE DES OPÉRATIONS D'ASSAINISSEMENT ET DÉMANTÈLEMENT AU CEA

Le CEA est confronté à la nécessité d'assainir et de démanteler un grand nombre d'installations (33 fin 2024) de natures et de caractéristiques très diverses : réacteurs d'expérimentation, laboratoires de R&D, installations d'entreposage de déchets, de traitement de déchets solides ou d'effluents, laboratoires de fabrication, etc.

L'assainissement et démantèlement (A&D) d'installations de recherche est fondamentalement différent de celui d'installations industrielles. Les différences résultent de plusieurs facteurs : ancienneté des installations, caractère souvent unique de chaque installation, extrême diversité des termes sources, vecteurs isotopiques de la radioactivité mal connus ou impossibles à déterminer.

Ces particularités ont des conséquences au niveau du démarrage des opérations : connaissance des termes sources, caractérisation physico-chimique de déchets, etc. De plus, on ne peut guère espérer « d'effet de série » entre les différentes installations, contrairement à ce qui peut être obtenu lors du démantèlement de réacteurs nucléaires de même type.

En 2024, l'effectif affecté au CEA sur les opérations d'A&D atteint 1250 personnes.

5.2 LA STRATÉGIE D'ASSAINISSEMENT ET DÉMANTÈLEMENT DU CEA

L'ampleur de la tâche à accomplir, avec des moyens humains et financiers limités, nécessite une stratégie de priorisation des opérations. La stratégie globale du CEA a été définie en concertation avec les deux autorités de sûreté (ASN et ASND). Elle vise à réduire le plus rapidement possible le terme source mobilisable présent globalement dans les installations en démantèlement, ce qui implique de réaliser en priorité les chantiers de reprise et de conditionnement des déchets les plus irradiants, en vue de leur entreposage sûr dans des installations dédiées.

La Commission ne peut que reconnaître la pertinence de cette stratégie du point de vue de la sûreté. Elle présente toutefois l'inconvénient de reporter le démantèlement complet des installations, dès lors que la plus grande partie du terme source a été évacuée. De ce fait, le nombre d'installations en cours de démantèlement ne diminue pas, mais au contraire augmente au fur et à mesure de la mise à l'arrêt de nouvelles installations. Ces installations en attente doivent être surveillées et maintenues en sûreté, ce qui consomme une part croissante des moyens dédiés à l'A&D (près de la moitié des crédits et du tiers des effectifs en 2024), aux dépens des opérations réelles de démantèlement.

Le CEA étudie diverses mesures visant à réduire ces coûts fixes de démantèlement. Un des leviers principaux est la réduction de la consommation d'énergie et de fluides. Ainsi des actions ont été menées pour réduire ou arrêter, lorsque les conditions de sûreté le permettaient, certaines ventilations nucléaires, réduire les consignes de climatisation en été ou mettre en place des moyens de chauffage plus économes.

La Commission observe que le CEA lui a présenté un calendrier des opérations à conduire à court terme (5 ans environ) sur la réduction du terme source mobilisable et la préparation des chantiers de démantèlement, mais pas une planification à long terme (fût-ce sous forme d'esquisse) de la résorption du nombre d'installations en attente de démantèlement complet.

5.3 LES DÉCHETS ISSUS DES OPÉRATIONS D'A&D ET LEUR GESTION

Les opérations d'assainissement et démantèlement produisent une quantité considérable de déchets dont la plus grande partie sont très peu, voire pas du tout contaminés.

L'article R 1333-2 du Code de la santé publique proscrit l'usage de substances provenant d'une installation dans laquelle est exercée ou a été exercée une activité nucléaire, lorsque celles-ci sont contaminées, activées ou susceptibles de l'être par des radionucléides. Toutefois, le décret n° 2022-174 du 14 février 2022 a introduit la possibilité de dérogations à cette interdiction dès lors que ces substances font au préalable l'objet d'une opération de valorisation qui ramène la concentration massique en radionucléides au-dessous de valeurs fixées. L'installation en projet sur le site de Fessenheim (Technocentre) vise à permettre l'utilisation de déchets métalliques décontaminés par fusion. À ce stade, l'application à des déchets de types gravats d'une procédure analogue n'est pas envisagée.

La Commission constate que la plus grande partie des déchets produits par les démantèlements des installations nucléaires, notamment les gravats, ne sont pas actifs. Il est donc souhaitable d'éviter que ces déchets soient dirigés vers des stockages de déchets radioactifs, avec le risque de les saturer et de les multiplier.

Pour permettre le reclassement vers des filières conventionnelles des déchets qui le justifient, il est nécessaire de disposer d'une connaissance aussi précise que possible de l'état initial des installations à démanteler, et de développer des moyens fiables de détection et de mesure des très faibles contaminations.

La Commission recommande que la stratégie de démantèlement et de déconstruction prenne en compte dès maintenant des dispositions de nature à faciliter le recyclage éventuel hors de la filière nucléaire des matériaux pondéreux.

5.4 LA R&D RELATIVE AUX OPÉRATIONS DE DÉMANTÈLEMENT

Les actions de R&D au service de l'assainissement et démantèlement mobilisent un budget de l'ordre de 18 M€ par an et environ 90 personnes (ETPT). Ces travaux incluent des études en soutien aux opérations en cours, des recherches plus prospectives en vue de développer des technologies utilisables à moyen terme (5 à 10 ans) et enfin des travaux académiques avec l'intérêt de contribuer à la constitution d'un réseau de chercheurs sur les questions de l'A&D, même si les travaux n'ouvrent de perspectives d'application qu'à long terme. Ils s'appuient sur des programmes nationaux (PIA) ou européens (EURATOM) et donnent lieu au dépôt de 3 à 5 brevets par an.

Parmi les thèmes généraux de recherche qui ont été présentés à la Commission, celle-ci souligne l'intérêt majeur de travaux dédiés à l'évaluation de l'état initial des installations et à la caractérisation des déchets. D'autres études concernent le traitement et le conditionnement des effluents et des déchets, et ont donc des applications pratiques directes. Il s'agit par exemple de la contribution du CEA au programme quadripartite Babylone sur les déchets bitumés.

Au stade actuel, les études relatives à la décontamination et à la remédiation des sols sont, aux yeux de la Commission, essentiellement prospectives.

5.5 LE FINANCEMENT DE L’A&D AU CEA ET SON IMPACT SUR LA STRATÉGIE ET LES CALENDRIERS

Les modalités de financement des opérations d’A&D au CEA sont également spécifiques. La loi dispose que les producteurs de déchets doivent mettre en place des provisions sous forme d’actifs dédiés pour financer le démantèlement de leurs installations et la gestion de leurs déchets. Dans le cas du CEA, ces provisions sont remplacées par une créance sur l’État. Le financement des opérations d’A&D est de ce fait inscrit dans le budget annuel du CEA au même titre que celui d’autres activités. En 2024, cela représente un flux annuel de 780 M€ courants.

Ce mode de financement apporte une contrainte sur le calendrier des opérations de démantèlement qui ne peuvent être réalisées dès qu’elles sont techniquement possibles. L’impact de cette contrainte doit toutefois être relativisé. Il n’est pas certain en effet que le CEA disposerait des moyens humains et industriels nécessaires pour accélérer significativement les démantèlements, même si leur financement pouvait être assuré. Le CEA a pu par ailleurs s’adapter à la contrainte budgétaire par des réductions de coûts ou la prise en compte d’échéanciers de paiements plus réalistes que les hypothèses initiales.

La Commission a pu constater l’ampleur des conséquences d’un investissement insuffisant dans les opérations d’assainissement et démantèlement lors de son voyage d’études, en juin 2023, au Royaume-Uni, où ces sujets ont été négligés pendant de nombreuses années jusqu’à ce que la *Nuclear Decommissioning Authority* (NDA) soit chargée du problème. La reprise des déchets provenant du démantèlement des réacteurs et installations arrêtés à Sellafield est aujourd’hui une tâche immense dont la durée est estimée à une centaine d’années. Le seul budget de démantèlement et d’assainissement de ce site s’élève 2,3 Md£ par an. La situation britannique montre l’importance de traiter ces questions en temps et en heure, le report des décisions et des mesures concrètes pouvant se révéler pour finir très dispendieux.

5.6 RECOMMANDATIONS DE LA COMMISSION

La Commission recommande que le CEA formalise (ou expose à la Commission si cette formalisation existe) sa politique en matière de caractérisation des bâtiments (cartographie radiologique), de décontamination des bâtiments et des procédés, de caractérisation et de minimisation des déchets.

La Commission recommande que la stratégie à court et moyen terme du CEA pour les opérations d’assainissement et démantèlement, qui est globalement pertinente, soit complétée par une planification à long terme faisant apparaître le calendrier envisagé pour le démantèlement complet des installations.

La Commission approuve l’existence d’une R&D soutenue en appui aux programmes d’assainissement et démantèlement. Elle recommande que cette R&D soit en particulier intensifiée sur toutes les techniques permettant d’améliorer la caractérisation des installations et des déchets, la minimisation des volumes de déchets, la détection de concentrations singulières au sein de grands volumes ainsi que sur le traitement des déchets organiques.

CHAPITRE VI : FAVL

La Commission considère depuis plusieurs années que la gestion des déchets de faible activité à vie longue (FAVL) est un sujet important. Elle en a évoqué les différents aspects dans ses précédents rapports. La Commission insiste depuis plus de cinq 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.

Elle constate aujourd'hui des avancées, qui restent cependant inégales suivant la typologie des déchets. Alors que les déchets radifères pourraient trouver un exutoire sur le site de la communauté de communes de Vendevre-Soulaines (CCVS), les autres types de déchets FAVL ne peuvent pas y être accueillis en quantité significative. Ce constat confirme celui déjà posé par la Commission dans son rapport 16.

L'Andra a présenté à la Commission les résultats de ses travaux, réalisés en concertation avec les acteurs de la filière. Ceux-ci ont porté principalement sur la fiabilisation de l'inventaire des déchets FAVL, l'identification d'options de gestion pour l'ensemble des déchets et la définition d'options techniques et de sûreté permettant d'évaluer la faisabilité technique d'un stockage à faible profondeur sur le site de la CCVS. Enfin l'Andra a initié des réflexions sur les caractéristiques que devrait présenter un site complémentaire pour accueillir les déchets FAVL n'ayant pas encore de filière de gestion à long terme.

6.1 LA SPÉCIFICITÉ DES DÉCHETS FAVL

La définition de déchets à faible activité et vie longue (FAVL) est faite par défaut ; il s'agit de déchets à vie trop longue pour être considérés dans la catégorie des déchets de faible activité et à vie courte (FAVC), mais avec une activité suffisamment faible pour ne pas être considérés comme à moyenne activité et vie longue (MAVL). Leur activité massique est de quelques centaines de Bq/g à un million de Bq/g selon la classification française, la majorité sont déjà produits, ils ne sont pas thermiques mais contiennent essentiellement des éléments à vie longue (demi-vie supérieure à 30 ans) ce qui requiert qu'ils soient isolés de l'homme et de l'environnement sur des temps longs, c'est à dire sur des temps bien supérieurs à ceux des déchets FMA-VC. Leur typologie est variée. On distingue plusieurs familles de déchets FAVL : les déchets radifères (qui sont issus de l'extraction de terres rares de certains minerais et de l'assainissement d'anciens sites industriels de production de radium ou de thorium), les résidus de traitement de conversion de l'uranium (produits depuis 1959 jusqu'à ce jour à Malvési), les déchets graphites (produits par le démantèlement des réacteurs UNGG), des enrobés bitumés et certains déchets technologiques. L'hétérogénéité des déchets FAVL se traduit par une variation de l'activité au cours du temps, ainsi que par des différences de radiotoxicité.

L'inventaire de ces déchets est en augmentation et pourrait atteindre un volume de 270 000 m³, à la suite de la recatégorisation en FAVL de certains colis MAVL tels que des déchets bitumés, et des colis de déchets technologiques de procédés du CEA et d'Orano, auxquels s'ajoutent plus de 266 000 m³ correspondant aux déchets historiques de retraitement entre 1959 et 2004 des combustibles usés (RTCU historiques) de Malvési.

Le volume de déchets que constitue la catégorie FAVL ainsi que leurs caractéristiques variées justifient que soient engagées des réflexions quant aux différentes solutions permettant leur gestion, incluant le développement d'une ou plusieurs solutions de stockage de subsurface dédiées et proportionnées aux risques qu'ils posent pour l'homme et l'environnement. Les déchets FAVL doivent faire l'objet d'une gestion spécifique et adaptée, leur durée de vie élevée ne permettant pas leur entreposage en surface, leur faible activité ne nécessitant pas a priori le degré d'isolement d'un stockage profond.

Pour cette raison, des réflexions ont été engagées au niveau international débouchant sur le concept d'approche graduelle. L'approche graduelle telle que développée par l'AIEA et l'AEN/OCDE réside en la capacité du système d'élimination choisi à contenir les déchets et à les isoler de l'homme et de la biosphère accessible de manière proportionnée à la nocivité des déchets. Cet objectif est atteint via une sélection appropriée de typologies de déchets, de leur conditionnement, ainsi que le choix du site et la conception de l'installation de stockage.

Le concept de stockage en subsurface, implanté à une profondeur de plusieurs dizaines de mètres, offre une capacité de confinement supérieure à celle d'un stockage en surface. La gamme de profondeur est essentiellement indicative, certains déchets qui ne peuvent être stockés en un endroit donné pouvant l'être à un autre endroit ; plusieurs facteurs entrent en effet en jeu, entre autres : la profondeur, la concentration en éléments à vie longue, la barrière ouvragée. Notamment, la présence d'une couverture argileuse (naturelle ou remaniée) augmente la capacité de rétention du stockage et retarde la migration des radionucléides. La détermination de la profondeur de stockage adaptée dépend fortement de la géologie du site (épaisseur de la formation argileuse, perméabilité, écoulement, présence d'aquifères à proximité), des scénarios d'intrusion envisagés ainsi que des caractéristiques des déchets à stocker (composition chimique et radiologique, mobilité, toxicité).

Le stockage en subsurface a posé dans le passé des problèmes d'acceptabilité qui n'ont pu être résolus à l'époque. Dans un rapport publié en date du 7 octobre 2011, le HCTISN a analysé le déroulé des processus de choix de site qui avaient été appliqués et émis une série de recommandations, notamment sur la concertation avec les populations locales, qui restent entièrement valables aujourd'hui.

6.2 LA CLARIFICATION DES INVENTAIRES

46

La classification des déchets radioactifs en France est une classification par destination. Les déchets doivent pouvoir être accueillis dans leur stockage de destination sans constituer un danger inacceptable pour l'homme et l'environnement. La discrimination des déchets FAVL des déchets FAVC et MAVL doit donc être établie sur cette base.

L'Andra, en lien avec le CEA et Orano, a défini des critères opérationnels permettant de discriminer les déchets FAVL des déchets MAVL, en particulier pour les déchets bitumés, et de préciser ainsi les inventaires associés à ces deux catégories. La démarche exposée ci-dessous a été soumise pour avis à l'Autorité de sûreté.

Pour ce faire, l'Andra adopte une approche par exclusion en s'appuyant sur son retour d'expérience des études d'un stockage de subsurface de déchets FAVL. Les calculs sont effectués pour un stockage générique implanté dans une formation argileuse affleurante, à plus de 30 m de profondeur et des hypothèses de conditionnement et de concept. Ces critères ont une valeur indicative et évolueront suivant les sites et les concepts retenus.

Les critères d'exclusion sont établis en considérant l'activité massique et le type de colis. L'Andra définit un indice radiologique d'exclusion (IRE) du stockage de subsurface. L'IRE est la somme des activités massiques des radionucléides contenus dans le déchet non conditionné ou dans le colis de déchets à la date potentielle de mise en stockage rapportée à l'activité massique maximale admissible de chaque radionucléide au regard des scénarios traités (scénarios d'évolution normale aux grandes échelles de temps et scénarios d'intrusion humaine involontaire). Pour être éligible aux études FAVL, l'IRE doit rester inférieur à 1 pour les déchets et colis déjà conditionnés ou pour lesquels les modes de conditionnement sont déjà connus, et inférieur à 2 pour les déchets ou colis de déchets non encore conditionnés. L'IRE est le résultat de calculs inverses basés sur les scénarios de sûreté traités et sur les bornes hautes des valeurs de référence de doses recommandées internationalement ; en effet, il s'agit de critères d'exclusion permettant de déterminer la capacité limite d'un stockage pour des déchets donnés. À noter que la méthode ne s'applique pas pour les radionucléides à vie courte (29 radionucléides dont la période est inférieure à 5 ans). Leurs limites en activité massique seront établies ultérieurement, une fois les modalités d'exploitation définies.

À titre illustratif, l'application, sur l'inventaire de référence MAVL, de ces nouveaux critères d'exclusion pourrait conduire à envisager de recatégoriser en FAVL une proportion significative des colis MAVL de responsabilité CEA (quelques dizaines de milliers), ainsi qu'une assez faible proportion des colis MAVL sous responsabilité Orano. La Commission souligne que ces recatégorisations auraient pour conséquence une augmentation de l'inventaire de colis FAVL.

La Commission estime que l'outil proposé par l'Andra avec l'appui du CEA et d'Orano permet une clarification des inventaires de déchets potentiellement admissibles dans un stockage en subsurface. Il est également un moyen permettant d'apprécier le potentiel d'un site à recevoir des déchets FAVL.

En tout état de cause, des critères d'acceptabilité spécifique devront être établis lors des études de sites réels par types de colis et par familles.

La Commission recommande que toute décision de reclassement de MAVL en FAVL ne soit prise qu'après identification d'un exutoire pour la famille considérée.

6.3 MODALITÉS DE GESTION

6.3.1 Approche réglementaire

La spécificité des déchets FAVL, grands volumes et présence en quantité significative d'isotopes à vie longue, pose des enjeux de sûreté spécifiques. Leur gestion doit être organisée en conséquence : caractérisation précise et complète en particulier pour les éléments mobiles (Cl, C, Se, I, Tc), ségrégation, conditionnements adaptés, modalités de stockage proportionnées aux enjeux principalement à long terme.

En France, l'Autorité de sûreté a publié en 2008 un guide définissant « les orientations générales qui doivent être retenues dès les phases d'investigation d'un site et de conception d'une installation de stockage de déchets FAVL pour en assurer la sûreté après fermeture ». Dans les études préliminaires qu'elle mène, l'Andra se réfère aux prescriptions du guide.

La nécessité d'une approche par risque ou approche graduelle (*graded approach*) est cependant de plus en plus reconnue au niveau international pour ce type de déchets ; cette approche implique une gestion holistique basée sur le conditionnement des déchets et la mise en place d'un concept de stockage implanté dans un site en adéquation avec les exigences de sûreté. Le système de stockage mis en place pour confiner et isoler les déchets est proportionné aux risques que présentent les déchets. Cela permet une optimisation efficiente du système de stockage et une analyse plus représentative des cas où les bornes supérieures des valeurs de référence des doses aux différents groupes critiques seraient atteintes voire dépassées.

L'Andra participe aux groupes de travail internationaux qui étudient cette question à l'AIEA et à l'AEN/OCDE.

6.3.2 Gestion multisite

L'absence d'identification d'un site de stockage répondant à toutes les exigences de sûreté applicables aux différents types de déchets conduit logiquement au constat que plusieurs sites seront nécessaires pour gérer l'ensemble des déchets FAVL.

Les enjeux économiques de la gestion des déchets devront également être pris en compte. Des choix sont à envisager, notamment en fonction des volumes, entre un stockage en subsurface et un stockage dans Cigéo. Le reclassement de certains déchets FAVL en catégorie FAVC, si les techniques de mesures permettent de garantir que leurs caractéristiques le justifient, conduit également à réduire le coût de leur gestion. Les acteurs de la filière et l'Andra ont entamé des actions concrètes qui devraient permettre de donner un exutoire à certains types de déchets FAVL.

6.3.3 Les potentialités du site de la communauté de communes de Vendevre-Soulaines

La géométrie de la couche et l'hydrogéologie du site sur lequel sera implanté le stockage sont des caractéristiques essentielles du stockage FAVL. L'Andra étudie la faisabilité d'un stockage de déchets FAVL sur le site de la communauté de communes de Vendevre-Soulaines (CCVS) en menant des investigations géologiques et hydrogéologiques complétées par des analyses et expériences réalisées sur des carottes de roche issues de forages.

La formation géologique visée est celle des argiles tégulines d'âge Albien (Crétacé inférieur) qui ont une épaisseur comprise entre 60 et 70 m ce qui permet d'assurer une garde minimum de 30 m au toit (c'est-à-dire le sommet) et de 20 m au mur (c'est-à-dire la base) de la formation. Les modèles d'érosion montrent qu'une épaisseur de 30 m environ au toit constitue une hypothèse robuste à 50 000 ans au regard des phénomènes d'érosion dans le secteur d'étude, suivant les scénarios d'évolution climatique considérés (scénario B4 subtropical à pluies violentes d'hiver avec érosion des sommets et comblement des vallées, et scénario A4 de retour des glaciations et du permafrost permanent sur le Bassin parisien avec incision des vallées sous la glace).

Les analyses minéralogiques montrent que la teneur en argile est de 30 à 60 % associée à des minéraux silicatés et de la calcite (<30 %). Le faible enfouissement de la formation au cours de la subsidence du bassin de Paris confère aux argiles un taux de compaction assez faible et en conséquence une conductivité hydraulique relativement élevée pour une formation argileuse, comprise entre 1×10^{-12} et 4×10^{-10} m.s⁻¹. Les écoulements sont globalement verticaux descendants, dirigés vers l'aquifère sous-jacent constitué des sables verts d'âge Apto-Albien. La vitesse de transfert des radionucléides mobiles (¹⁴C, ³⁶Cl, ⁷⁹Se, ¹²⁹I), présents sous forme d'anions qui n'interagissent pas avec la surface des argiles, est relativement élevée, avec un temps de transfert vers l'aquifère estimé à quelques milliers à dizaines de milliers d'années.

Les études réalisées montrent que le site de la CCVS pourrait être approprié au stockage en subsurface de certains déchets radifères (hors déchets MAVL du CEA), après élimination des sels contenus dans ces déchets, dans la mesure où les capacités de sorption de la formation sont bonnes. En revanche, le site ne s'avère pas propice au stockage des déchets bitumés, des déchets technologiques, et de la grande majorité des déchets graphites, dans la mesure où la capacité de la formation des argiles tégulines à retenir les éléments mobiles est faible. Une augmentation de la distance au mur de la formation n'apporterait pas de changement significatif des temps de transfert.

La Commission note que les études faites sur le site de la CCVS ouvrent des perspectives prometteuses pour le stockage de déchets radifères. La Commission recommande que les études soient poursuivies sur ce site, en vue d'évaluer pleinement ses qualités et potentialités.

L'absence d'exutoire de subsurface identifié pour les déchets bitumés, déchets technologiques et la grande majorité des déchets graphites impose de poursuivre les efforts de recherche de sites appropriés. La formation géologique cible devra présenter des performances globales permettant de ralentir davantage les transferts des radionucléides mobiles que celle de la CCVS.

6.3.4 Faisabilité d'un stockage sur le site d'Orano Malvési

Les résidus de traitement de conversion de l'uranium (RTCU) résultent de l'activité de conversion d'U métal ou d'UF₄ réalisée sur le site de Malvési depuis 1959, et de campagnes périodiques de conversion de l'URT entre 1960 et 1983. Sont distingués les déchets produits depuis 2019 qui rentrent dans la catégorie FAVL, et les déchets RTCU dits historiques (RTCUh) qui sont inscrits en partie à l'inventaire des déchets FAVL, certains pouvant relever de la catégorie TFA.

Orano travaille sur la densification des boues historiques et celles produites depuis 2021 en vue de réduire le volume à entreposer ou stocker. Le bilan des opérations réalisées à ce jour montre une réduction de volume d'un facteur 2,83. L'ASN a demandé que les stockages des RTCUh et des RTCU FAVL produits depuis 2019 soient mutualisés. Deux concepts de stockage en subsurface à proximité immédiate du site de production sont actuellement à l'étude. L'objectif est de parvenir vers 2030 à la démonstration de la faisabilité technique du stockage.

6.4 PERSPECTIVES

Une grande partie des déchets graphites, des déchets bitumés et des déchets technologiques ne sont pas éligibles à un stockage sur le site de la CCVS ; ils représentent environ 44 000 tonnes pour 202 000 m³ de déchets conditionnés.

Pour autant, suivant les critères de l'Andra, une grande partie de ces déchets pourraient être stockés à faible profondeur, à condition de trouver un site géologique approprié. Ce site complémentaire et la formation cible devront présenter des performances globales permettant de limiter davantage les transferts des radionucléides mobiles en comparaison des argiles tégulines du site de la CCVS.

Les caractéristiques favorables identifiées sont de bonnes propriétés de confinement des radionucléides par l'association de capacités de rétention élevées et de propriétés de transport restreintes. Il apparaît que les critères permettant d'y répondre sont : une formation géologique ou un ensemble d'unités géologiques à dominante marneuse ou argileuse, un faible gradient hydraulique de préférence descendant (qui dépendra de la structuration des formations aquifères locales), et une épaisseur suffisante permettant d'implanter le toit des alvéoles de stockage à au moins 30 m de profondeur en maintenant une garde importante entre le stockage et l'exutoire. Compte tenu de la mobilité des radionucléides ciblés, une formation faiblement perméable et épaisse d'environ 80 à 100 m est estimée nécessaire par l'Andra à ce stade des études.

6.5 CONCLUSIONS

La Commission note que le site de la CCVS pourrait convenir pour les déchets radifères contenant des radionucléides fortement retenus par les argiles. La Commission recommande que les études soient poursuivies sur ce site. L'Andra, prenant acte que ce site ne peut convenir pour les autres familles de déchets FAVL (déchets bitumés, déchets technologiques, déchets graphites) qui contiennent des éléments mobiles, a commencé à spécifier les conditions géologiques et hydrogéologiques favorables pour orienter la recherche de site.

La Commission note qu'Orano a identifié des sites potentiels pour le stockage des RTCU situés à proximité du site d'entreposage de Malvési. La qualification d'un site local permettrait d'éviter les impacts liés au transport à longue distance de grands volumes de FAVL.

La Commission rappelle que la recherche d'un optimum global de gestion associé à l'utilisation des capacités de stockage disponibles ou envisagées et des coûts associés devrait faire partie intégrante de la démarche.

La Commission recommande que toute recherche de site se fasse avec les meilleures pratiques internationales en matière de concertation, avec toutes les parties prenantes, en priorité locales, dès la phase amont du projet.

CHAPITRE VII : CIGÉO

La Commission publiera dans les prochains mois son rapport sur le dossier de demande d'autorisation de création (DAC) de l'installation de stockage Cigéo. La Commission a analysé les piliers scientifiques et techniques sur lesquels s'appuie l'évaluation de la sûreté à long terme et la démonstration de la récupérabilité. Par ailleurs, elle a examiné des questions transverses parmi lesquelles la phase industrielle pilote, la réversibilité et la stratégie de fermeture.

La Commission a fondé son analyse sur l'examen de l'ensemble des documents du dossier de DAC ; elle a également exploité, lorsque cela lui a semblé nécessaire, la littérature scientifique qui lui est associée (rapports, publications, parangonnages), d'autres publications scientifiques (articles dans des revues à comité de lecture) et des travaux de thèses soutenues ou non par l'Andra.

Le socle de connaissances scientifiques sur lequel repose l'analyse de sûreté de Cigéo met en jeu quasiment toutes les disciplines scientifiques. Il y a celles qui concernent les ouvrages souterrains au premier rang desquelles on trouve les sciences de la matière et des matériaux, des interfaces entre matériaux et fluides, des transports de chaleur et de matière dans ces fluides notamment des solutés et des gaz. Il y a celles qui concernent tous les autres composants du stockage, la formation géologique hôte non perturbée, en relation avec ses encaissants, utilisant l'ensemble des disciplines des sciences de la terre dont l'hydrogéologie. Toutes ces disciplines sont matures et ont même progressé grâce aux travaux sur les stockages géologiques de l'Andra, de ses partenaires scientifiques et plus largement d'une large communauté scientifique.

La Commission s'est intéressée d'une part à l'analyse des piliers scientifiques et techniques, des exigences de conception et des modes de réalisation sur lesquels s'appuie le travail de démonstration de la sûreté et de la récupérabilité, et d'autre part à l'analyse des questions transverses parmi lesquelles la phase industrielle pilote, l'adaptabilité, la réversibilité et la stratégie de fermeture.

7.1 SÛRETÉ À LONG TERME

Le système de stockage Cigéo est constitué d'une couche de Callovo-Oxfordien dans laquelle sont implantés les ouvrages souterrains destinés à recevoir les colis de déchets radioactifs. En ce qui concerne la sûreté, la DAC de Cigéo comporte deux grands volets : la sûreté en exploitation (de l'ordre de 150 ans) et la sûreté après fermeture (jusqu'au million d'années).

Le premier volet concerne la construction des installations souterraines, l'acheminement et la mise en place des colis de déchets, le comblement des vides résiduels, le scellement des ouvrages et des liaisons surface-fond. Il repose sur la capacité de la science à modéliser le court/moyen terme, compris comme le temps pendant lequel les scientifiques et ingénieurs peuvent garantir que les objectifs de construction et d'exploitation définis seront atteints après corrections si nécessaire. La démarche pourra être vérifiée tout au long de l'exploitation avant la fermeture de Cigéo. Ce volet relève de l'état de l'art du génie minier, du génie civil, et de la réalisation des grands chantiers.

Le second volet concerne l'évolution en mode passif des composants du stockage. Il repose sur la capacité de la science à comprendre et modéliser les processus mis en jeu sur le long terme, compris comme le temps au bout duquel l'impact de la radioactivité pouvant parvenir à la biosphère est négligeable pour l'homme et l'environnement. Il relève de la modélisation des processus et de la bonne connaissance de leurs paramètres. Pour un système passif et aux échelles de temps visées, la démarche de vérification que les objectifs de sûreté peuvent être atteints est basée sur la qualité des données, la robustesse des modèles et des codes de simulation.

La Commission examine le dossier de DAC sous ce double aspect en se limitant pour le premier volet aux questions techniques et pour le second aux calculs des flux de radionucléides à la base des calculs de doses. Déterminer si ces doses sont acceptables vis-à-vis des objectifs de protection relève de l'autorité de sûreté et sort du champ de l'évaluation de la Commission.

La méthode d'analyse de la DAC par la Commission est ainsi une démarche de validation du socle de connaissances scientifiques et d'évaluation de l'emploi des éléments scientifiques en appui à l'analyse de sûreté, qui conduit à identifier des exigences de conception et de dispositions constructives pour respecter les objectifs fixés.

7.2 RÉCUPÉRABILITÉ

La récupérabilité s'obtient par la combinaison de dispositions d'organisation et des dispositions techniques mais elle dépend également de connaissances de nature plus scientifiques.

Il n'appartient pas à la Commission de se prononcer sur les dispositions d'organisation. Pour les questions techniques (mode de construction des alvéoles, conception de machines permettant d'aller chercher un colis au fond d'un alvéole, ...), la Commission a vérifié que la conception présentée par l'Andra est conforme aux règles de l'art des différents domaines techniques impliqués.

La démonstration de la récupérabilité a aussi des enjeux scientifiques importants, imposés par la durée séculaire, ainsi que par l'environnement géologique, par exemple :

- L'absence d'ovalisation des alvéoles HA est indispensable pour permettre le retrait des colis ;
- La durée d'exploitation de l'installation impose une évaluation de la tenue des alvéoles MAVL et de leurs revêtements qui dépasse les prescriptions classiques du génie civil.

52

La Commission s'est intéressée de plus près à ces aspects. Elle analysera dans son rapport sur la DAC les éléments que l'Andra mobilise pour démontrer qu'elle atteindra la récupérabilité : fondements scientifiques et leur déclinaison sur des parties clés de l'ouvrage.

7.3 QUESTIONS TRANSVERSES

Les questions transverses qui seront examinées dans le rapport de la Commission sur la DAC sont la réversibilité, la phase industrielle pilote, la gestion des incertitudes et la stratégie de fermeture de l'installation.

Les quatre composantes de la réversibilité sont selon la loi : la progressivité de la construction, la flexibilité de l'exploitation, la récupérabilité des colis de déchets pendant une certaine durée, l'adaptabilité de la conception et de sa capacité à prendre en compte un inventaire de nature et de volume distincts de celui de départ. Seule la récupérabilité a des enjeux scientifiques et techniques forts dans la mesure où la conception du stockage doit garantir la capacité à identifier et récupérer certains colis pendant la période prescrite par la loi (d'ordre séculaire). La Commission analysera donc plus particulièrement dans le dossier de DAC les éléments permettant de garantir l'accès à l'ensemble des ouvrages souterrains (descenderie, quartiers, alvéoles) notamment sous l'angle de leur tenue mécanique et de leur déformation.

Pour ce qui concerne la phase industrielle pilote (Phipil), le rapport de la Commission analysera les propositions faites par l'Andra relatives aux « critères de succès » de la Phipil, en particulier dans le plan directeur d'exploitation (PDE) qui est une pièce du dossier de DAC, ainsi que les propositions complémentaires émises par l'Andra en janvier 2025 à destination de la Commission d'orientation du PNGMDR, tant sur le volet technique que sur le volet gouvernance.

Conformément à l'article R. 593-16 du Code de l'environnement, le dossier de DAC contient un plan de démantèlement, de fermeture et de surveillance de l'installation (pièce n° 13 du dossier). La Commission observe que ces opérations ne seront réalisées que plusieurs décennies après la mise en service de l'installation et qu'il n'est donc pas nécessaire d'en définir le détail dès l'autorisation de création. Pour autant, le rapport de la Commission examinera le scénario de référence proposé par l'Andra pour la fermeture.

CHAPITRE VIII : LES PETITS RÉACTEURS MODULAIRES (SMR) : PERCEPTION ET PRÉPARATION DE L'IMPLANTATION

Avec l'appel à projets France 2030, la France a choisi de faire du développement des « *Small Modular Reactors* » ou SMR un élément à part entière de sa politique énergétique. Ces petits réacteurs sont décrits comme innovants tant sur le plan des technologies mobilisées (fission, fusion) que sur celui des usages (chaleur, électricité), du cycle de combustible (multirecyclage) comme des méthodes de construction. Comme pour toute installation nucléaire, de nombreux aspects sont à prendre en compte en amont du choix de l'emplacement, comme pendant et après la préparation de la construction de ces SMR.

La Commission a souhaité étudier le degré de maturité des start-up financées par France 2030 en matière de réflexions mais également en matière d'actions concrètes concernant le devenir socio-économique de leurs projets. Depuis la fin des années 1960, les chercheurs en sciences sociales étudient les conditions de diffusion des innovations techniques. Ils ont montré que les « voies du succès » ne dépendent que rarement de la seule solution technologique proposée, mais passent par l'importance et la qualité des interactions entre les innovateurs, les industriels et un grand nombre de parties prenantes, nationales et/ou locales. La transition d'un projet de sa conception *in silico* vers son installation dans un environnement déterminé apparaît donc comme un moment critique.

Au fil des ans, l'expérience acquise dans le cadre de projets industriels, positive comme négative, a permis d'accumuler des connaissances précieuses sur la manière de s'approprier cette phase critique. Ces connaissances soulignent l'importance d'anticiper autant que possible le dialogue qui doit être mené avec toutes les parties concernées par l'implantation d'une installation nucléaire. Or, d'une manière générale et de façon compréhensible, les start-up tendent à faire prévaloir les enjeux amont de recherche et développement de leur objet technologique et de leur positionnement sur le marché avant l'ingénierie sociale et l'engagement vers le grand public. De même, l'amont du cycle (le combustible) suscite un vif intérêt, là où l'aval du cycle (retraitement ou évacuation des déchets) est encore assez peu pris en compte.

55

La Commission a eu l'occasion dans ses rapports précédents de décrire les projets des start-up lauréates de l'appel à projet France 2030, tout en soulignant l'incertitude associée à leur devenir à court et moyen terme. Pour contribuer à sa réflexion sur les aspects socio-économiques de leurs projets, elle les a invitées à venir échanger avec ses membres. Seules quelques-unes ont accepté d'être auditionnées par la Commission, ce qui suggère que ces aspects ne constituent pas encore une priorité pour beaucoup d'autres.

Pour préparer ces auditions, la Commission a transmis aux start-up un ensemble de questions destinées à leur permettre de mieux appréhender la variété des enjeux associés à l'implantation d'un SMR. Ces questions s'organisent autour de trois grandes thématiques : état d'avancement et critères de sélection des sites, identification des parties prenantes, de leurs perceptions et de leurs attitudes et stratégies d'engagement et de concertation avec les parties prenantes locales à court et moyen terme.

8.1 SÉLECTION DES SITES

Les responsables des projets de SMR ont pu faire état de l'avancement de la sélection des sites, en France comme dans une perspective ultérieure à l'étranger. Certaines parcelles sont d'ores et déjà acquises, d'autres sont en cours d'acquisition. Tous soulignent l'importance d'identifier des sites disponibles à partir desquels il est possible soit de répondre à une demande préexistante d'électricité ou de chaleur, soit de répondre à une demande émergente. Celle de futurs *data centers* est fréquemment mentionnée.

On voit ici qu'une différence importante entre l'implantation d'un SMR et celle d'un réacteur de forte puissance réside dans l'émergence d'un nouvel acteur : le client industriel, étranger au milieu du nucléaire. Ce dernier a un rôle à jouer, car c'est lui qui a besoin de la production du SMR. Toutefois, cela ne saurait en aucun cas décharger les start-up de leur responsabilité dans la conduite du dialogue avec toutes les parties prenantes.

Si le concept de SMR est fréquemment résumé à « sa petite taille », comparé aux réacteurs traditionnels, la recherche de site doit intégrer qu'un réacteur, même petit, implique des flux de matières, des sites de production de combustible, des sites de stockage, d'entreposage ou de recyclage, des centres de formation, etc. Les critères de sélection des sites doivent donc nécessairement intégrer tous ces éléments qui, ensemble, définissent l'empreinte sociale et environnementale globale du projet.

Confrontées à une gestion complexe des temporalités économiques, administratives et politiques, les start-up recherchent parfois la proximité avec un site nucléaire préexistant, notamment pour bénéficier de la loi d'accélération qui a été mise en place en 2023 et qui permet aux opérateurs de lancer des opérations préalables dès l'obtention de l'autorisation environnementale, sans attendre le décret d'autorisation. Cette proximité permet également de s'appuyer sur des études préexistantes concernant les risques sismiques, les risques d'inondation, etc.

Enfin la plupart des responsables de projets sont conscients de la difficulté de mener à son terme le choix d'un site. Leurs démarches de pré-identification et de contacts présentent une marge de progression.

8.2 LES PARTIES PRENANTES

56

Les représentants des start-up interrogés ont généralement conscience de la grande diversité des parties prenantes associées à la réussite de leurs projets : acteurs industriels, acteurs politiques et institutionnels nationaux, mais également acteurs régionaux et locaux (présidents de région ou d'agglomération, maires, comités locaux d'information, etc).

Lorsque les sites retenus bénéficient de la proximité d'une installation nucléaire préexistante, les responsables ont généralement identifié l'ensemble des acteurs professionnels associés aux différents métiers du nucléaire.

L'appréhension du grand public, de ses attitudes ou de ses perceptions, lorsqu'elle est intégrée par les responsables, passe essentiellement par le recours à des instituts de sondage. Certains responsables ont mentionné les résultats d'études, mais sans que la Commission n'ait pu accéder directement à ces études.

8.3 LES STRATÉGIES D'ENGAGEMENT

Les auditions ont montré que le dialogue est souvent engagé avec l'autorité de sûreté, avec le client industriel avec lequel le projet va s'associer, et avec des élus locaux. Un certain nombre de responsables de projet ont pu bénéficier d'une sensibilisation au débat public organisée par la CNDP

Cependant, le rôle de la CNDP dans la concertation semble surestimé par les start-up. Si le débat public au sens de la CNDP est indispensable, le dialogue avec les parties prenantes au sens large (les citoyens et les organisations sociales) est encore à construire. Une planification des interactions avec les parties prenantes et une coordination rigoureuse de leur contenu doivent être discutées très en amont entre la start-up et son partenaire industriel. La Commission constate qu'en matière de dialogue avec les parties prenantes, l'effort nécessaire semble jusqu'à présent largement sous-estimé.

La Commission observe que certains responsables de projets peinent encore à distinguer le travail de communication destiné aux parties prenantes locales d'un véritable travail de concertation qui puisse permettre à la population concernée par l'implantation de SMR qui ont vocation à se rapprocher des centres urbains ou industriels, de s'approprier le sens et l'intérêt du projet.

8.4 AVIS DE LA COMMISSION

La Commission estime qu'il est nécessaire de :

- *clarifier la répartition des rôles en matière de dialogue avec les parties prenantes, entre la start-up, le titulaire de l'autorisation d'exploitation du réacteur (s'il est différent du maître d'ouvrage du projet), le client industriel et la CNDP. Il faut souligner que la conduite du dialogue doit toujours revenir au futur exploitant du réacteur : dans le cadre de ce dialogue, la CNDP ne peut en aucun cas se substituer au travail et à l'engagement direct de la start-up ;*
- *sensibiliser les clients industriels à la nécessité de leur engagement, car ils seront de fait, acteurs du projet nucléaire et à ce titre, inévitablement impliqués dans les débats à venir ;*
- *organiser l'accompagnement des start-up dans l'acquisition de compétences en matière de concertation et de débat public, et dans l'accès à l'expérience disponible en France et à l'international ;*
- *insister sur la nécessité d'engager le dialogue le plus tôt possible.*

Indépendamment de sa réflexion sur les aspects sociétaux de l'implantation d'un SMR, la CNE s'était donné pour objectif d'auditionner toutes les start-up lauréates de l'appel à projet France 2030. Elle a achevé ce travail cette année avec l'audition des sociétés GenF et Thorizon. Les fiches jointes en annexe VII, établies sur le même modèle que celles des rapports précédents, synthétisent les informations recueillies lors de ces auditions.

GLOSSAIRE

- AAE : agence d'approvisionnement d'Euratom
- AC : assemblages de combustibles
- ACN : assemblages de combustibles neufs
- ACU : assemblages de combustibles usés
- A & D : assainissement et démantèlement
- ADS : accelerator driven system, ou réacteur nucléaire piloté par un accélérateur en français, encore appelé système hybride (couplant un accélérateur de particules à un réacteur sous-critique)
- AEN : agence de l'énergie nucléaire
- AIEA : agence internationale de l'énergie atomique
- AM : actinides mineurs
- Am : américium
- AMI CMA: appel à manifestation d'intérêt relatif aux "compétences et métiers d'avenir" France 2030
- AMR : advanced modular reactor
- Andra : agence nationale de gestion des déchets radioactifs
- APD : avant-projet détaillé (ou avant-projet définitif)
- APS : avant-projet sommaire
- ASN : autorité de sûreté nucléaire
- ASNR : autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection
- ASTRID : advanced sodium test reactor for industrial demonstration
- AURN : arrêt d'urgence automatique sur réactivité négative
- BIM : building information model
- BK : bâtiment d'entreposage temporaire du combustible (dans une centrale électronucléaire)
- BOR 60 : réacteur d'essais russe à neutrons rapides
- BTP : bâtiment et travaux publics
- CBP : chaîne blindée procédé (d'Atalante à Marcoule)
- CCAM : couverture chargée en actinides mineurs
- CCAm : couverture chargée en américium
- CCVS – Communauté de Communes de Vendevre-Soulaines
- CEA : commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

CFR 600 : réacteur expérimental chinois à neutrons rapides

Cigéo : projet de Centre industriel 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 : comité local d'information et de suivi du laboratoire de Bure

CNDP : commission nationale du débat public

CNE : commission nationale d'évaluation

CNRS : centre national de la recherche scientifique

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

COP : conférence des parties sur le climat

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

CPA : chirped pulse amplification

CPN : conseil de politique nucléaire

CU UOx : combustible d'oxyde d'uranium usé

60

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

EDC : engagement, développement de l'emploi et compétences

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)

EROI : energy return on investment

ESFR : projet européen dédié aux réacteurs à neutrons rapides

ETPT : équivalent temps plein travaillé

ETI : entreprise de taille intermédiaire

FAVL : déchets de faible activité à vie longue

FMA-VC : déchets de moyenne activité à vie courte

GIEC : groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

GIFEN : groupement des industriels français de l'énergie nucléaire

HAVL : déchets de haute activité à vie longue

HCTISN : haut comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire

I2EN : institut international de l'énergie nucléaire

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

IFOP : institut français d'opinion publique

INB : installation nucléaire de base

INSERM : institut national de la santé et de la recherche médicale

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

IR : inferred resources

IRE : indice radiologique d'exclusion

IRSN : institut de radioprotection et de sûreté nucléaire

ISL : lixiviation *in situ*

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

MAVL : déchets de moyenne activité à vie longue

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

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

MYRRHA : projet proposé par les belges du SCK-CEN pour la mise en œuvre d'un ADS ou système hybride (« multipurpose hybrid research reactor for high-tech application » en anglais)

NDA : nuclear decommissioning authority

NEA : agence de l'énergie nucléaire

NRC : autorité de sûreté nucléaire américaine (« nuclear regulatory commission » en anglais)

OCDE : organisation de coopération et de développement économiques

OCS : outil de calcul scientifique

ONDRAF : organisme national belge chargé de gérer les matières et déchets radioactifs

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

OFREMI : observatoire français des ressources minérales pour les filières industrielles

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

PDE : plan directeur de l'exploitation (de l'installation Cigéo)

Poma : entreprise française spécialisée dans la fabrication de systèmes de transport par câble

PCA : plan de continuité d'activité

PIA : programme d'investissement d'avenir

PNGMDR : plan national de gestion des matières et déchets radioactifs

PME : petite et moyenne entreprise

PMLT : plan à moyen et long terme

PPE : planification pluriannuelle de l'énergie

Pumas : procédé industriel de traitement des combustibles usés permettant d'extraire et de recycler l'uranium et le plutonium (« plutonium uranium monoacid separation » en anglais)

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)

R&D : Recherche et Développement

RCD : reprise et conditionnement des déchets radioactifs anciens

REP : réacteur à eau pressurisée

REX : retour d'expérience

RNR Na : réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium.

RTCU : résidus de traitement de conversion de l'uranium

RTCUh : résidus historiques de traitement de conversion de l'uranium

SCK-CEN : centre de recherche de Mol en Belgique

SIAM : société d'ingénieurs arts et métiers

SKB : entreprise suédoise de gestion des déchets radioactifs

SMR : petit réacteur modulaire (« small modular reactor » en anglais)

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

TFA : déchets de très faible activité

TN : emballage de transport nucléaire

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

Uapp : uranium appauvri

UDEPO : Uranium DEPOsit database

UOx : oxyde d'uranium

UMN : université des métiers du nucléaire

Unat : uranium naturel

UNE : uranium naturel enrichi

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

UNSCEAR : comité scientifique des Nations unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (« United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation » en anglais)

URE : uranium de retraitement enrichi

URT : uranium de retraitement

WIPP : centre américain de stockage de déchets radioactifs militaire, à Carlsbad, Nouveau-Mexique (« waste isolation pilot plant » en anglais)

ANNEXE I : COMPOSITION DE LA COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION

Commission en exercice en date du 31 mai 2025

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

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

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

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

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

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

Virginie MARRY – professeur des universités, Sorbonne université.

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

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

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

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

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

Conseillers de la CNE :

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

Robert GUILLAUMONT – membre de l'Académie des sciences – membre de l'Académie des technologies – professeur honoraire chimie-radiochimie - Université Paris Sud Orsay.

Maurice LEROY – membre associé de l'Académie nationale de pharmacie – professeur honoraire - École européenne de chimie, polymères et matériaux de Strasbourg.

ANNEXE II : ACTIVITÉ DE LA COMMISSION

Le rapport n°18 a été présenté :

- à l' OPECST le 14 novembre 2024 ;
- au Comité local d'information et de suivi (CLIS) du laboratoire de Bure le 13 janvier 2025 ;

La Commission a procédé à (*cf.* annexe III) :

- 8 auditions plénières, dont 3 auditions à préparation renforcée ;
- 14 auditions restreintes, dont 5 consacrées aux start-up ;
- 5 ateliers thématiques organisés avec Andra afin d'éclairer la CNE sur le contenu du dossier de DAC du projet Cigéo ;

On trouvera en Annexe IV 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 radioprotection (ASNR), des industriels principalement concernés détenteurs de matières ou producteurs de déchets (Orano, Framatome, EDF, NUWARD) ainsi que de l'administration centrale (DGEC et DGRI).

La Commission s'est déplacée à 2 reprises pour des visites techniques :

- visite de l'établissement de contrôle de Cherbourg le 12 juin 2024 ;
- visite du centre de stockage de l'Aube de l'Andra le 14 janvier 2025.

La liste des documents pris en compte pour ce rapport (arrêtée au 24 avril) est donnée en annexe V.

ANNEXE III : AUDITIONS RÉALISÉES PAR LA COMMISSION

AUDITIONS PLÉNIÈRES :

(8 auditions)

16 octobre 2024 :	Andra – La R&D prospective pour les progrès de demain et le maintien des connaissances
13 novembre 2024 :	CNE2 – Audition à préparation renforcée - Archéologie prospective sur la filière RNR
14 novembre 2024 - matin :	CNE2 - Audition à préparation renforcée – SMR/AMR
11 décembre 2024 :	CEA – Etapes vers la fermeture du cycle
12 décembre 2024 :	CEA – Les activités de R&D relatives à la gestion des déchets générés par les activités d’assainissement démantèlement
15 janvier 2025 :	Andra – Dossier FAVL
12 février 2025 :	CNE2 – Audition à préparation renforcée - Disponibilité de l’uranium : ressource et géopolitique
13 février 2025 :	CNE2 - Audition à préparation renforcée - Formations et Recrutements : des enjeux systémiques

69

AUDITIONS RESTREINTES :

(14 auditions)

25 septembre 2024 – matin :	EDF
25 septembre 2024 – matin :	Orano
26 septembre 2024 – matin :	GIFEN
26 septembre 2024 – matin :	CNRS
11 octobre 2024 – matin :	Framatome
14 novembre 2024 – après-midi :	Start-up GenF
12 décembre 2024 - après-midi :	Start-up Thorizon
16 janvier 2025 – après-midi :	Orano
12 mars 2025 – matin :	EDF
12 mars 2025 – après-midi :	3 auditions privées avec des lauréats de l'appel à projets « réacteurs nucléaires innovants » France 2030 : Newcleo (14h00-14h45), Naarea (15h00-15h45), Jimmy Energy (16h00-16h45),

13 mars 2025 : CEA & ORANO
24 avril 2025 : EDF & NUWARD

ATELIERS THÉMATIQUES AVEC L'ANDRA :

(5 ateliers)

15 novembre 2024 : La caractérisation du milieu géologique sur la ZIRA : la flexure au droit des structures dans le Trias

13 décembre 2024 – matin : Les Alvéoles HA dont corrosion

13 décembre 2024 – après-midi : La durabilité des ouvrages souterrains sur une phase d'exploitation plus grande que celle à la DAC

14 janvier 2025 : Mise à jour du dossier de Coût

17 janvier 2025 – matin : Marges de sûreté : méthodologie exploitation et après-fermeture

17 janvier 2025 – après-midi : Surveillance dont la R&D sur les fibres optiques et capteurs en général

14 février 2025 - 09 h – 11 h : La Phipil

14 février 2025 - 11 h – 13 h : Représentativités des alvéoles témoins

ANNEXE IV: LISTE DES PERSONNES AUDITIONNÉES PAR LA COMMISSION

Andra

ARMAND Gilles
BARKATE Claudine
BRUYER Nicolas
COCHARD Jean
CORDIER Bérengère
COTTON Julien
DESERT Lucas
EGO Frédéric
HEMBERT Pierre
HERMAND Guillaume
LANDREIN Philippe
PERRAUD Denis
ROBINET Jean-Charles
SAQUET Gaëlle
THEODON Louise
WASSELIN Virginie

ASSYSTEM

CHAUSSADE Lionel
LAMBERTS Caroline
PLANA Robert

BRGM

BOURG Stéphane

CEA

ABONNEAU Eric
CANAS Daniel
CHABERT Christine
CHAMPENOIS Jean-Baptiste
FAURE Sylvain
FONTAINE Bruno
GARNIER Jean-Claude
GRANDJEAN Stéphane
GUETON Olivier
JACQ François
MICHEL Caroline
PAYOT Frédéric
PEREIRA-MENDES Fabrice
PHELIP Mayeul
QUINTAS Arnaud
ROBISSON Anne-Charlotte
SALUDEN Magali
SARRADE Stéphane
SOREL Christian
STOHR Philippe

SUDREAU François
VANDENBERGHE Valérie

CNRS

CUNEY Michel

CNRS/ IN2P3

DAVID Sylvain

DGEC

PETIT Briec

Ecole des mines

GOETZ Damien

Ecole nationale supérieure des Arts et Métiers

CHAMPANEY Laurent
ROSSIGNOL Francis

EDF

AT Jean-François
BARBE Vincent
GARREL Julien
GIRAUD Olivier
LAUGIER Frédéric
MENAGER Antoine
MOATTI Marie
MOREL Damien
PELISSIER Simon
SETTIMO David
VIETTE Arnaud

FRAMATOME

FRICHET Alain
GAUCHE François
HAMY Jean-Marie
REBEYROLLE Véronique
ROBIN Marie-Edith

GIFEN

BARD Olivier

I2EN

VAN DER LEE Jan

IFPEN

HACHE Emmanuel

INSTN

SIDA Jean-Luc

NUWARD

GARREL Julien
HOFMANN Frédéric

ONDRAF

BRASSINNES Stéphane
CAPOUET Manuel

ORANO

ALAMEDA-ANGULO Célia
DEBERGÉ Adrien
EYMERY Jérôme
GAGNER Laurent
GUIHEUX Jean-Michel
LIBERGE Renaud
LOUVET Thibault
POLAK Christian
POUPINEL-DESCAMBRES Marion
ROMARY Jean-Michel
VINCENT Jean-Luc
VIOLAS Céline

Société des Ingénieurs Arts et Métiers

GORCE Stéphane

START UP

GenF

BESAUCELE Hervé

JIMMY ENERGY

DAUBIN Godefroy
LUNVEN Grégoire
TEPPER Jessica

NAAREA

ALEXANDRE Jean-Luc
DERDEVET Michel
LEDIEU Aurélien

NAGRA

STOPELLI Emiliano

NEWCLEO

CALPENA Stéphane

THORIZON

CLAQUIN Laure

Université des Métiers du Nucléaire

BADIA Hélène

ANNEXE V : LISTE DES DOCUMENTS TRANSMIS À LA COMMISSION EN 2024-2025

Andra

- Rapport d'activité 2023.
- Rapport d'information sur la sûreté nucléaire et la radioprotection – Centre de stockage de l'Aube (CSA) – 2023.
- Rapport d'information – Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (CIRES) – 2023.
- Rapport d'information sur la sûreté nucléaire et la radioprotection – Centre de stockage de la Manche (CSM) – 2023.
- Rapport de l'inspection générale – Bilan 2023.
- Newsletter du Mag de l'Andra – Octobre 2024.
- Newsletter du Mag de l'Andra – Novembre 2024
- Newsletter du Mag de l'Andra – Janvier 2025.

ANNEXE VI : HISTORIQUE ET ACQUIS DE LA FILIÈRE FRANÇAISE DES RÉACTEURS À NEUTRONS RAPIDES

Avec son réacteur Rhapsodie, le CEA concrétise ses premiers travaux sur les réacteurs à neutrons rapides. Commence ainsi la marche vers la construction et l'exploitation de deux réacteurs d'une puissance plus élevée, Phénix puis Superphénix, tous deux aujourd'hui arrêtés et en cours de démantèlement. Le projet Astrid, qui leur a succédé, est resté au plan conceptuel.

La France, avec le CEA, EDF et Framatome, détient ainsi une expérience sur une longue période et des résultats nombreux, seuls comparables aux réalisations de la Russie.

Dans quelle mesure les résultats obtenus par le CEA et Framatome constituent le socle d'un nouveau démonstrateur de RNR Na, si sa construction était décidée ? Pour explorer cette question, la Commission a consacré une journée d'auditions à l'examen détaillé de ce patrimoine technologique. Une synthèse des informations recueillies lors de cette journée est présentée dans cette annexe.

VI.1 : PHÉNIX

Une conception et une construction rapides

Capitalisant sur les enseignements de Rhapsodie, la conception de Phénix, débutée en 1964, a été rapidement menée, de même que sa construction. En moins de 9 années, le réacteur est entré en fonctionnement avec une première divergence en août 1973 et une mise en service industrielle en juillet 1974. L'association du CEA portant 80 % du projet et d'EDF 20 %, s'est avérée adéquate, grâce à la constitution d'équipes mixtes.

Les principales orientations de la conception de Phénix se sont révélées pertinentes et ont ensuite été reprises pour la plupart des RNR-Na : réacteur intégré, diamètre de la cuve limité, cœur de petite taille comprenant en périphérie des aiguilles pour la surgénération, échangeurs de chaleur primaire intégrés et immergés dans la cuve, circuits primaires et secondaires au sodium.

Quatre périodes ont marqué l'exploitation de Phénix (250 MWe). De 1974 à 1990, les technologies des composants, des assemblages de combustible et des matériaux ont été validées. De 1990 à 1993, des investigations ont été menées pour expliquer les quatre arrêts d'urgence automatiques déclenchés par une réactivité négative (AURN). A partir de 1994 jusqu'à 2003, des travaux ont été conduits pour prolonger de dix ans la durée de vie de Phénix et mettre à niveau sa sûreté. De 2003 à 2009, Phénix a fonctionné aux deux tiers de sa puissance nominale. L'exploitation de Phénix a permis d'engranger un important retour d'expérience et de disposer d'un réacteur d'irradiation.

Une exploitation aisée

Phénix s'est révélé facile à piloter du fait d'un contrôle aisé de la réactivité. Son rendement thermodynamique a atteint 45 %. Les combustibles utilisés se sont avérés robustes. Le suivi de charge n'a pas, toutefois, été jugé possible. L'exposition des personnels aux rayonnements ionisants a été très inférieure à son équivalent pour les réacteurs à eau pressurisée.

Bien qu'étant un prototype, Phénix a livré une production non négligeable d'électricité : 26 TWh pour quatorze années de connexion au réseau.

De plus, le réacteur s'est révélé un outil d'irradiation précieux pour l'étude de matériaux exposés aux neutrons rapides pour l'amélioration des combustibles MOX et pour les recherches sur la transmutation des actinides mineurs notamment de l'américium.

La maîtrise des risques

L'une des critiques à propos des RNR Na a été et reste l'utilisation du sodium comme liquide de refroidissement du cœur du réacteur. Phénix a montré que dans la pratique, les fuites de sodium sur les superstructures de la cuve et ses composants, ainsi que sur le circuit primaire, peu nombreuses d'ailleurs, ont été détectées à un stade précoce. Dans de nombreux cas, un colmatage spontané des points de fuite s'est produit.

Les arrêts d'urgence pour réactivité négative (AURN) de Phénix n'ont pas reçu d'explication définitive. Le gerbage du cœur, incriminé en première analyse, n'apparaît plus comme une explication valable du phénomène. Aucune autre cause plausible n'a été mise en évidence. Le redémarrage de Phénix a été autorisé par l'Autorité de sûreté, après des travaux de mise à niveau de sa sûreté et d'extension de sa durée de vie.

Des résultats exploitables sur longue période

Après son arrêt définitif et pendant son démantèlement en cours, Phénix a et continue de livrer des résultats expérimentaux utiles pour la connaissance et le perfectionnement de la filière. Rassemblés dans un programme intitulé "Trésor Phénix", les principales recherches portent sur le combustible $UPuO_2$ utilisé pendant l'exploitation, la validation des modèles relatifs au cœur du réacteur et le comportement des aciers du circuit primaire.

VI.2 : SUPERPHÉNIX

Grâce aux acquis technologiques de Phénix, l'objectif d'une meilleure - voire complète - maîtrise du cycle du combustible nucléaire a justifié la construction d'un RNR Na commercial de puissance : Superphénix. Son nom souligne sa filiation et un changement d'échelle. Il a été conçu comme un démonstrateur tête de série industrielle de RNR Na destiné au parc électronucléaire français. Sa puissance de 1240 MWe a été choisie comparable à celle des réacteurs à eau pressurisée du parc EDF. Des tensions sur les approvisionnements en uranium étaient redoutées dès la crise pétrolière de 1973, ce qui a conduit à la décision en 1976 de lancer Superphénix, dont la finalité explicite était la production d'électricité et la surgénération. Cette décision fut confirmée en 1981. Superphénix, qui avait le statut de Centre nucléaire de production d'électricité (CPN), fut exploité par les équipes d'EDF.

Son objectif principal était qu'une grande partie des matières (uranium appauvri et plutonium) issues de l'enrichissement de l'uranium naturel et du retraitement des assemblages de combustible usés des réacteurs REP puissent être recyclées, réduisant ainsi les besoins globaux d'uranium naturel par rapport à ceux des REP.

De plus, Superphénix (et ses copies) devait offrir deux possibilités spécifiques, l'isogénération et la surgénération du plutonium, susceptibles l'une et l'autre d'accroître l'indépendance énergétique.

L'isogénération devait permettre de se passer totalement d'uranium naturel. La surgénération, c'est-à-dire une production de plutonium dans un RNR, supérieure à la consommation, devait permettre d'une part d'exploiter un parc mixte REP-RNR, en réduisant drastiquement les besoins en uranium naturel, d'autre part de poursuivre le déploiement du parc RNR si la quantité de plutonium issu des REP n'était pas suffisante.

Superphénix mobilisait d'autres acteurs que français. La société NERSA, exploitant la centrale, a, en effet, eu comme actionnaires, à hauteur de 16 % ensemble l'Allemagne, la Belgique, les Pays-Bas, et à hauteur de 33 %, l'Italie.

Malgré son arrêt définitif en 1997 et le début de son démantèlement en 2006, Superphénix, pendant ses douze années de fonctionnement, a généré des résultats techniques fondamentaux pour la filière des réacteurs RNR-Na.

Autres réalisations de RNR contemporaines à Superphénix

La démarche française s'est inscrite dans un mouvement général d'intérêt pour la filière des réacteurs à neutrons rapides, avec la divergence de BN-300 en Union soviétique (Kazakhstan), le démarrage de la construction du RNR US41 de 400 MWe, à Clinch River aux États-Unis et la divergence du PFR britannique de 250 MWe.

La construction du réacteur

Localisé à Creys-Malville, en amont de Bugey sur le Rhône, Superphénix a été construit sur une plateforme suffisamment étendue pour accueillir une réplique du réacteur. Malgré sa complexité et sa nouveauté, Superphénix, dans le cadre de la réglementation de sûreté de l'époque, a été construit en 9 ans, le premier béton étant coulé en 1976, le premier chargement en combustibles intervenant en 1985. Le réacteur est devenu le plus puissant des RNR Na en fonctionnement dans le monde.

En tant que démonstrateur tête de série industrielle d'un réacteur de production électrique, Superphénix fut conçu pour atteindre une puissance de 1240 MWe, comparable à celle des réacteurs à eau pressurisée du parc EDF. Superphénix, qui avait le statut de Centre nucléaire de production d'électricité (CPN), fut exploité par les équipes d'EDF.

Superphénix se caractérisait par un bâtiment réacteur de 84 mètres de haut, une cuve primaire de 21 m de diamètre et de 19 mètres de haut, deux turbogénérateurs de 600 MWe chacun. Par rapport à Phénix, Superphénix comprenait quatre pompes primaires au lieu de trois, huit échangeurs intermédiaires au lieu de six, quatre boucles secondaires au lieu de trois et quatre générateurs de vapeur monoblocs au lieu de trois modulaires.

Des améliorations majeures furent apportées en matière de sûreté : le système d'arrêt du cœur était plus complet ; des moyens nouveaux, diversifiés et redondants ont été apportés pour l'évacuation de la puissance résiduelle ; l'installation comportait quatre barrières de confinement.

Les délais de mise au point

Plusieurs anomalies apparues au démarrage ont été résolues rapidement.

La vibration des structures internes décelée en 1985 a été résolue par un ajustement de la vitesse des pompes et du débit de refroidissement des collecteurs. La fuite du barillet intervenue en 1987 provenait de l'acier 15D3 sujet à des problèmes de corrosion, ce qui a conduit à l'abandon de cet équipement et son remplacement par un poste de transfert sous argon. La pollution du sodium des circuits primaires, due à l'entrée d'oxygène dans l'argon, a été maîtrisée par l'introduction de détecteurs de rupture de membranes sur les compresseurs.

Parmi les critiques faites *a posteriori* au projet, figure celle d'un saut de puissance important par rapport à Phénix - multiplication par 5 - alors que certains phénomènes de la physique des réacteurs ne seraient pas linéaires. À l'expérience, rien n'indique toutefois que ce saut de puissance ait été une cause fondamentale des difficultés de sa mise au point.

L'évolution des règles de sûreté, a, de son côté, contribué à compliquer l'exploitation de Superphénix. Ce fut notamment le cas avec la prise en compte d'éventuels feux de sodium pulvérisé, alors qu'à la conception, seuls les feux en nappe devaient être considérés. L'instruction de cette nouvelle règle de sûreté a entraîné un arrêt du réacteur pendant 3 ans, ce qui a nécessité une nouvelle enquête publique et un nouveau décret d'autorisation.

Des performances concluantes après la phase de "déverminage"

Durant la période de 11 années s'écoulant du premier couplage au réseau début 1986, jusqu'à la fin 1996 correspondant à l'arrêt du réacteur par la dernière chute de barres, les grands incidents de mise au point de l'équipement ont représenté 25 mois, soit 20 % du total. Les procédures administratives ont entraîné 54 mois d'arrêt soit 40 % du total.

Globalement, le réacteur aura fonctionné de manière nominale pendant 53 mois (soit 40 % du temps écoulé entre le démarrage et le dernier arrêt), ce qui représente, compte tenu des arrêts normaux pour maintenance, 34 mois de production électrique.

Malgré l'arrêt prononcé une fois les difficultés résolues, les acquis scientifiques et technologiques de Superphénix sont nombreux.

Le retour d'expérience sur le combustible oxyde mixte - le MOX RNR - est positif. La fermeture du cycle du combustible a été démontrée avec la réutilisation du plutonium produit en réacteur par Phénix. La conduite de Superphénix s'est révélée simple, sa disponibilité bonne et ses effluents et déchets radioactifs peu aisés à gérer mais limités en quantité. Les fuites de sodium ont été rares, les feux de très faible ampleur. En revanche, la manutention des assemblages combustibles, la maintenance et les inspections en service se sont révélés complexes en milieu opaque, rendant nécessaire le développement de systèmes à ultra-sons.

VI.3 : ASTRID, UN PROJET D'ACTUALISATION DES COMPÉTENCES

Après Rapsodie, Phénix et Superphénix, Astrid constitue la quatrième étape majeure des travaux du CEA et du nucléaire français sur les RNR.

Ce projet s'est déroulé pendant la décennie 2010, dans un contexte international qui ne comportait pas de menaces sur les approvisionnements en uranium naturel.

Un projet industriel nécessitant une intense R&D préalable

La loi du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique appelait au "*développement des technologies des réacteurs nucléaires du futur [...] et des technologies nécessaires à une gestion durable des déchets nucléaires*". A cet effet, à partir de 2007, le CEA et Areva ont lancé un programme de R&D sur les RNR, qui a débouché, en 2010, sur le programme Astrid², soutenu par des crédits du Programme d'Investissements d'Avenir (PIA). Le CEA a joué un rôle prédominant dans l'organisation de ce projet, assurant le pilotage stratégique, la conduite des

² Astrid - Advanced sodium test reactor for industrial demonstration.

projets R&D, la conception du cœur du futur réacteur, le rôle d'architecte industriel avec EDF et le pilotage opérationnel. Cette organisation ne serait pas pertinente pour un projet de réacteur industriel.

Quatorze partenariats industriels ont apporté les compétences nécessaires à la réalisation des études.

Devant initialement préparer la construction d'un RNR Na de Génération IV, Astrid s'est vu donner comme objectifs prioritaires, par rapport à Superphénix, réacteur de Génération II, l'amélioration de la sûreté et de l'opérabilité. Le volet relatif au cycle du combustible a porté sur la faisabilité du recyclage du plutonium issu du retraitement du MOX usé et de la transmutation des actinides mineurs en ouvrant la possibilité d'irradiations expérimentales.

Afin que les technologies développées puissent être extrapolées à un réacteur de grande puissance, celle d'Astrid a été fixée à 600 MWe. Comme pour ses devanciers, le circuit primaire a été intégré et le circuit intermédiaire dévolu au sodium.

Le projet Astrid comportait plusieurs innovations majeures. Le cœur à faible vidange devait permettre de réduire sa réactivité en cas de vidange du sodium. Les accidents graves devaient être pris en compte dès la conception, à la fois en prévention et en mitigation. Un récupérateur de corium devait permettre, en cas de fusion du cœur, de cantonner le corium en résultant au fond de la cuve, et de le refroidir. Pour éviter les réactions potentielles avec le sodium du circuit secondaire, le générateur en eau-vapeur actionnant le turbogénérateur devait être remplacé par un système de transmission de la chaleur du sodium à de l'azote sous pression qui, en se détendant dans les turbines, les aurait fait tourner pour produire de l'électricité.

La réduction des ambitions avec New Astrid

L'Avant-Projet Sommaire d'Astrid a été défini au cours de la période 2010-2015. L'Avant-Projet Détaillé était en cours en 2017. A cette date, il est apparu que la qualification des nouvelles technologies nucléaires requises par l'Autorité de sûreté exigeait des financements additionnels et pouvait nécessiter, au minimum, 5 à 10 ans de réalisation.

Les pouvoirs publics ont, dès 2017, été saisis de cette situation par le CEA, qui a proposé des amendements au projet initial. Astrid a alors été transformé en *New Astrid*. Pour simplifier le projet en raison des contraintes financières, la puissance de *New Astrid*, divisée par quatre, a été fixée à 150 MWe. Le recours à la simulation a également été renforcé.

New Astrid s'est vu assigner des priorités plus limitées que celles d'Astrid : l'étude des combustibles relatifs au multi-recyclage, l'inspection en service, la manutention, la validation des outils de calcul scientifique, les méthodes de conception des RNR Na et de leur validation par les autorités, ainsi que la préservation des compétences.

La conception de l'architecture du *New Astrid*, réalisée en 6 mois, a bénéficié de l'expérience d'Astrid. Des travaux de développement et de faisabilité industrielle ont été réalisés, en particulier par Framatome.

Néanmoins, Astrid a été écarté de la PPE2 2019-2028. Le renoncement à la construction de *New Astrid* n'efface pas, pour autant, les résultats scientifiques et techniques du programme, qui sont soigneusement capitalisés.

ANNEXE VII : DESCRIPTION SYNTHÉTIQUE DES PROJETS DE NOUVEAUX RÉACTEURS EXAMINÉS PAR LA COMMISSION FIN 2024

La Commission s'est donné pour objectif d'examiner, en plus de projets de nouveaux réacteurs conduits à l'étranger, tous les projets de réacteur innovants qui ont été lauréats de l'appel à projets lancé dans le cadre de France 2030. C'est ainsi que dans ses rapports 17 et 18, elle a rendu compte des auditions consacrées aux projets suivants :

- 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 ;
- le projet de réacteur à gaz haute température (neutrons thermiques) Xe100 (X-energy) ;
- le projet de réacteur calogène proposé par la société Calogéna ;
- le projet de réacteur calogène à haute température proposé par la société Blue Capsule ;
- le projet de réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium de la société Hexana ;
- le projet de réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium de la société Otrera ;
- le projet de réacteur à sels fondus de la société Stellaria.

La Commission a achevé ce travail cette année avec l'audition des sociétés GenF et Thorizon. Les deux fiches et le tableau de synthèse de la présente annexe complètent ceux figurant dans les rapports 17 et 18. La Commission souligne que ces informations, obtenues à des dates différentes, ne doivent pas être comparées sans précaution.

Porteur du projet – partenaires

Gen F est une société créée par le groupe Thalès.

Technologie du réacteur

Taranis est un projet de réacteur utilisant la fusion nucléaire produite par confinement inertiel à l'aide de lasers.

Utilisations envisagées :

Production d'électricité.

82

Puissance :

Objectif : 1000 MWe.

Combustible

Capsule de mélange deutérium/tritium solide ou liquide de 2 mm environ de rayon.

Gestion du combustible utilisé

Sans objet.

Date de mise en service visée

Non précisé - Preuve de concept (qui devrait atteindre un gain supérieur à 1) vers 2035.

Avancement du processus de certification

Non initiée.

Commentaires

La fusion est obtenue par attaque directe du mélange DT par les lasers avec l'objectif de consommer 20 à 30 % du mélange dans la réaction de fusion.

Objectif : rendement de 15 par rapport à l'énergie électrique apportée.

Porteur du projet – partenaires

Thorizon est une start-up franco-néerlandaise, spin-off de l'institut nucléaire néerlandais NRG.

Bureaux à Amsterdam et Lyon.

Technologie du réacteur

Réacteur à neutrons rapides et sels fondus.

Utilisations envisagées

Production d'électricité et secondairement de chaleur industrielle (550°C).

84

Puissance

100 MWe.

Combustible

Sel fondu contenant du plutonium, de l'uranium appauvri et du thorium.

Gestion du combustible utilisé

Recyclage du combustible utilisé - Travail en cours avec Orano sur le cycle du combustible.

Date de mise en service visée

Thorizon envisage la construction du premier réacteur vers 2030.

Avancement du processus de certification

Revue préparatoire en cours avec l'ASNR, conjointement avec l'ANVS (autorité de sûreté néerlandaise).

Commentaire

L'originalité du concept est le conditionnement du combustible dans des cartouches interchangeables.

Le principe de fonctionnement du cœur est la circulation du sel fondu grâce à une pompe située dans chaque cartouche. En cas d'arrêt des pompes, le cœur redevient naturellement sous-critique.

TABLEAU SYNTHETIQUE DES PROJETS DE REACTEURS INNOVANTS EXAMINES PAR LA CNE FIN 2024

Produit	Antériorités scientifiques et technologiques	Utilisation	Puissance	Combustible	Gestion du combustible utilisé	Avancement certification	Mise en service	Coût de l'énergie visé	Commentaire
Réacteurs utilisant le principe de la fusion nucléaire									
GEN F	travaux du NIF et du laser mégajoule	Production d'électricité	1000 MWe	mélange deutérium+tritium liquide ou solide encapsulé	sans objet	non commencé	non indiqué	non indiqué	rendement élevé attendu du principe de confinement par laser (rendement de 1,5 par rapport à l'énergie électrique apportée) Preuve de concept prévue vers 2035
Réacteurs à sels fondus et spectre rapide									
Thorizon	travaux historiques sur les sels fondus (NRG)	Production d'électricité	100 Mwe	Sel fondu contenant du plutonium, de l'uranium appauvri et du thorium.	études en cours sur retraitement avec Orano	Revue préparatoire en cours avec l'ASN, conjointement avec l'ANYS (autorité de sûreté néerlandaise)	Non indiqué construction du premier réacteur vers 2030	60 euros/MWh	Concept original de conditionnement du combustible dans des cartouches interchangeables production secondaire de chaleur industrielle (550°C)

COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION

Membres de la Commission Nationale d'Évaluation :

Michel DUBOIS
Christophe FOURNIER
Philippe GAILLOCHET
Jean-Paul GLATZ
Saida LAÂROUCHI-ENGSTRÖM
Vincent LAGNEAU
Virginie MARRY
Jose-Luis MARTINEZ
Jean-Paul MINON
Catherine NOIRIEL
Céline PERLOT-BASCOULES
Aude POMMERET

Président honoraire

Jean-Claude DUPLESSY

Conseillers de la Commission

Robert GUILLAUMONT
Maurice LEROY

Secrétaire général & Conseiller scientifique :

Frédéric LAUNEAU

Secrétariat administratif :

Véronique ADA-FAUCHEUX
Florence LEDOUX

COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION

Président : **Vincent LAGNEAU**

Secrétaire général & Conseiller scientifique : **Frédéric LAUNEAU**

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

www.cne2.fr

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

ISSN : 2257-5758