

# 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°20

**Juin 2026**



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° 20

JUIN 2026



## TABLE DES MATIÈRES

<b>RÉSUMÉ – CONCLUSION</b> .....	<b>7</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>9</b>
<b>CHAPITRE 1. L'APPROVISIONNEMENT DU PARC ÉLECTRO-NUCLÉAIRE EN MATIÈRES COMBUSTIBLES</b> .....	<b>11</b>
1.1. UN CONTEXTE FORTEMENT ÉVOLUTIF.....	11
1.2. SÉCURISATION DE NOUVELLES RESSOURCES EN URANIUM.....	12
1.2.1. <i>Potentiel global des ressources conventionnelles</i> .....	12
1.2.2. <i>Potentiel global des ressources secondaires</i> .....	12
1.2.3. <i>Du besoin de mieux connaître nos ressources</i> .....	13
1.3. DÉVELOPPER LA CAPACITÉ À UTILISER PLUS EFFICACEMENT L'URANIUM.....	14
<b>CHAPITRE 2. L'AVAL DU CYCLE DU COMBUSTIBLE : SITUATION ACTUELLE</b> .....	<b>15</b>
2.1. GRANDES DONNÉES DE LA GESTION DU COMBUSTIBLE.....	15
2.2. ÉVOLUTION DES ASSEMBLAGES COMBUSTIBLES.....	16
2.3. EXTENSION DE L'UTILISATION DU MOX.....	16
2.4. LA NÉCESSITÉ D'UN RECYCLAGE SOUVERAIN DE L'URANIUM DE RETRAITEMENT (URT).....	16
2.5. LA MODULATION DU PARC ÉLECTRONUCLÉAIRE ET SES CONSÉQUENCES.....	17
2.5.1. <i>Contraintes liées à l'augmentation de la production d'électricité prévue par la PPE3</i> .....	17
2.5.2. <i>La modulation, un mode de gestion de plus en plus sollicité</i> .....	18
2.5.3. <i>Leviers utilisables pour faire face à l'accroissement de la modulation</i> .....	18
2.5.4. <i>Une R&amp;D sur les combustibles soumis à la modulation à consolider</i> .....	18
2.6. L'ENTREPOSAGE DES ASSEMBLAGES COMBUSTIBLES.....	19
2.6.1. <i>Des risques de saturation maîtrisés pour l'aval du cycle actuel</i> .....	19
2.6.2. <i>Perspectives de l'entreposage</i> .....	20
2.6.3. <i>Impact éventuel de la modulation sur les piscines BK</i> .....	20
2.7. TENUE DES COMBUSTIBLES EN ENTREPOSAGE.....	20
2.7.1. <i>Programme de R&amp;D</i> .....	20
2.7.2. <i>Programme de surveillance</i> .....	21
2.8. PROGRAMME « PÉRENNITÉ-RÉSILIENCE » DES USINES DU RETRAITEMENT.....	21
<b>CHAPITRE 3. VERS LA FERMETURE DU CYCLE</b> .....	<b>23</b>
3.1. LE MRREP ET LES SCÉNARIOS DE FERMETURE DU CYCLE.....	23
3.2. LES USINES DE LA HAGUE 2.....	24
3.2.1. <i>Melox 2</i> .....	25
3.2.2. <i>Ateliers de retraitement</i> .....	25
3.2.3. <i>Avancement de la R&amp;D sur le procédé Pumas</i> .....	26
3.2.4. <i>Conclusion et recommandations à propos des études de « l'Aval du futur »</i> .....	27
3.3. MOYENS NÉCESSAIRES À LA R&D POUR LA FERMETURE DU CYCLE.....	28
<b>CHAPITRE 4. STOCKAGE DES DÉCHETS HA ET MAVL : LE PROJET CIGÉO</b> .....	<b>29</b>
4.1. RAPPORT DE LA COMMISSION SUR LE DOSSIER DE DAC : CONCLUSION GÉNÉRALE.....	29
4.2. PRINCIPALES RECOMMANDATIONS DE LA COMMISSION.....	29
4.2.1. <i>Concernant la phase industrielle pilote</i> .....	29
4.2.2. <i>Concernant la poursuite de la R&amp;D</i> .....	31
4.3. PRÉCISIONS COMPLÉMENTAIRES SUR QUELQUES POINTS DU RAPPORT.....	31
4.3.1. <i>Au sujet de la maturité du dossier d'autorisation de création de Cigéo</i> .....	31
4.3.2. <i>Au sujet de la prise en compte par l'Andra des recherches conduites à l'étranger et de leurs résultats</i> .....	32
4.3.3. <i>Au sujet des effets du changement climatique, à savoir s'ils sont correctement pris en compte dans Cigéo.</i> .....	32

4.3.4. Au sujet de la « marge temporelle » entre le temps de décroissance de la radioactivité des radionucléides les plus mobiles et leur temps de transfert depuis le COx jusqu'à la biosphère.....	33
4.3.5. Au sujet de l'étude par la Commission de la solubilité du sélénium .....	33
4.3.6. Au sujet de la structure observée sous l'emplacement envisagé du quartier HA, pour laquelle la Commission affirme qu'elle n'a pas d'incidence sur les propriétés du COx.....	34
4.3.7. Au sujet de la flexure de la couche du COx .....	34
4.3.8. Au sujet du risque de criticité.....	34
<b>CHAPITRE 5. ASSAINISSEMENT ET DÉMANTÈLEMENT (A&amp;D).....</b>	<b>37</b>
5.1. OPÉRATION D'ASSAINISSEMENT-DÉMANTÈLEMENT CHEZ EDF, ORANO ET AU CEA .....	37
5.1.1. EDF.....	37
5.1.2. Orano.....	37
5.1.3. Le CEA .....	37
5.2. STRATÉGIES ET ACTIVITÉS D'ASSAINISSEMENT ET DÉMANTÈLEMENT .....	38
5.2.1. EDF.....	38
5.2.2. Orano.....	38
5.2.3. Le CEA .....	39
5.2.4. Synthèse.....	39
5.3. FINANCEMENT DES OPÉRATIONS D'A&D .....	40
5.3.1. EDF.....	40
5.3.2. Orano.....	40
5.3.3. Le CEA .....	40
5.3.4. Synthèse.....	41
5.4. LA R&D EN APPUI DES OPÉRATIONS D'ASSAINISSEMENT ET DÉMANTÈLEMENT .....	41
<b>CHAPITRE 6. LE STOCKAGE DES DÉCHETS FAVL ET TFA.....</b>	<b>43</b>
6.1. DÉCHETS FAVL .....	43
6.2. DÉCHETS TFA .....	44
6.2.1. État d'avancement de l'extension du CIREs (projet ACACI) .....	44
6.2.2. Valorisation des matériaux et réduction du volume de déchets produits.....	45
6.2.2.1. Aciers .....	45
6.2.2.2. Terres et gravats .....	45
6.2.2.3. Déchets fluides organiques et inorganiques .....	46
6.2.3. Règlements française et européenne sur la réutilisation des matériaux et notion de seuil de libération .....	46
<b>CHAPITRE 7. LE BESOIN DE PÉRENNISATION DE LA R&amp;D NUCLÉAIRE SUR LE LONG TERME.....</b>	<b>49</b>
7.1. RÔLE ET PLACE DE LA NOUVELLE AGENCE DE PROGRAMME ÉNERGIES DÉCARBONÉES (APED) .....	49
7.2. INTERROGATION SUR LES PERSPECTIVES DE FINANCEMENT À MOYEN TERME.....	50
7.3. ENJEU DES MOYENS EXPÉRIMENTAUX ET D'ESSAIS.....	50
<b>CHAPITRE 8. PANORAMA INTERNATIONAL .....</b>	<b>51</b>
8.1. INTRODUCTION.....	51
8.2. CONCEPTS DE STOCKAGE .....	51
8.2.1. Suède .....	51
8.2.2. Finlande .....	51
8.3. PROCÉDURES DE DÉLIVRANCE DES AUTORISATIONS DE CONSTRUCTION.....	52
8.3.1. Procédures de test des installations .....	52
8.3.2. Récupérabilité.....	52
8.3.3. Réversibilité .....	53
8.3.4. Surveillance.....	53
8.4. RETOURS D'EXPÉRIENCE .....	53
8.5. AUTRES PAYS QUE SUÈDE, FINLANDE ET FRANCE .....	53
8.5.1. Canada.....	53
8.5.2. États-Unis.....	54

8.5.3. Suisse .....	54
8.5.4. Allemagne.....	54
<b>GLOSSAIRE .....</b>	<b>57</b>
<b>ANNEXE I. COMPOSITION DE LA COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION .....</b>	<b>63</b>
<b>ANNEXE II. ACTIVITÉ DE LA COMMISSION.....</b>	<b>65</b>
<b>ANNEXE III. AUDITIONS RÉALISÉES PAR LA COMMISSION .....</b>	<b>67</b>
<b>ANNEXE IV. LISTE DES PERSONNES CONSULTÉES PAR LA COMMISSION .....</b>	<b>69</b>
<b>ANNEXE V. LISTE DES DOCUMENTS TRANSMIS À LA COMMISSION EN 2025-2026 .....</b>	<b>71</b>
<b>ANNEXE VI. LISTE DES RECOMMANDATIONS ÉMISES PAR LA COMMISSION DANS SON RAPPORT SUR LE DOSSIER DE DEMANDE D'AUTORISATION DE CRÉATION DE CIGÉO .....</b>	<b>73</b>







## RÉSUMÉ – CONCLUSION

La Commission a jugé utile cette année d'aborder dans son rapport l'ensemble des sujets relevant de sa compétence : la gestion des matières et des déchets nucléaires tout au long du cycle du combustible et les travaux de recherche et développement en appui à cette gestion.

### Les matières combustibles et les combustibles

Pour ce qui concerne l'approvisionnement de la France en uranium naturel, la Commission considère que les risques de rupture iront croissant dans la deuxième moitié de ce siècle. La Commission constate de plus que les ressources secondaires ne sont pas en mesure de constituer une alternative viable aux approvisionnements habituels à partir des ressources conventionnelles. L'uranium appauvri présent sur le sol français constitue un stock stratégique souverain de matières énergétiques valorisables et doit être géré comme tel.

De même, la réserve de matière fissile que représente l'uranium de retraitement doit pouvoir être valorisée au moyen d'une structure industrielle basée en France ou dans un pays affinitaire.

Par ailleurs, le pilotage du parc électronucléaire français est contraint de s'adapter à l'intermittence des énergies renouvelables dont la production est croissante. Les études menées par EDF lui ont permis jusqu'à maintenant de faire face à cette nécessité. Dans la perspective d'une augmentation du besoin de modulation, elles doivent être confortées par des études complémentaires portant sur les conséquences de cette modulation sur le comportement des combustibles en réacteur, sur les opérations d'entreposage et sur le traitement-recyclage des combustibles usés.

7

---

### Les usines du cycle

La Commission constate une montée en puissance significative du programme « Pérennité et résilience » des usines actuelles du cycle du combustible. Les études d'Orano devraient permettre d'aboutir fin 2026 à un diagnostic concernant la faisabilité du prolongement de ces usines au-delà de 2040. Prolonger le fonctionnement de ces usines dégagerait de la marge calendaire pour le programme « Aval du futur » et permettrait la mise en œuvre de procédés nouveaux, comme Pumas, qui seront utiles pour la fermeture du cycle avec les RNR.

### La R&D nécessaire au programme « fermeture du cycle du combustible nucléaire »

Le Conseil de politique nucléaire de mars 2026 a décidé l'élaboration d'un programme visant la fermeture du cycle du combustible nucléaire et incluant le développement d'une filière de réacteurs industriels à neutrons rapides. Ce programme devra être soutenu dans la durée et permettre le développement d'une filière industrielle ne dépendant plus d'importations d'uranium naturel.

Les besoins de R&D en soutien à ce programme doivent être consolidés par la direction du programme « Fermeture du cycle » et faire l'objet d'une stratégie de sécurisation des accès aux installations indispensables pour le mener à bien, en France ou dans des pays affinitaires.

Sur la base des premiers calendriers de faisabilité de ce programme, il conviendra de requestionner la pertinence du MRREP et de comparer ses avantages à ceux qu'apporterait un passage direct du monorecyclage dans les EPR2 au multirecyclage dans des RNR si les usines du cycle actuelles étaient prolongées et l'objectif de fermeture du cycle avancé. Dans ces hypothèses, le calendrier de prise en compte des MOX-RNR dans les usines du cycle devrait être accéléré.

## La gestion des déchets HA-MAVL : Cigéo

Les recherches conduites par l'Andra, exposées dans le dossier de DAC, ont permis d'élaborer un concept fiable pour un stockage géologique profond de déchets radioactifs à vie longue. La maturité du dossier est suffisante, au plan scientifique, pour permettre la délivrance de l'autorisation de création de l'installation.

Il est néanmoins indispensable de maintenir une capacité de R&D de haut niveau à l'Andra sur le stockage géologique profond, incluant des moyens d'expérimentation *in situ*, pendant toute la période d'exploitation de l'installation de stockage Cigéo. L'évaluation du besoin de R&D figurant dans le dossier de chiffrage de l'Andra, qui fonde l'arrêté du 30 mars 2026 relatif au coût de Cigéo, est insuffisante dans la mesure où elle ne prévoit plus d'activité de R&D au-delà de 2055.

## Les opérations d'assainissement-démantèlement

La législation française prévoit que les opérations de démantèlement sont effectuées dès que possible après l'arrêt de l'installation, selon le principe dit du « démantèlement immédiat ». Les ressources actuellement allouées au CEA pour les opérations d'A&D ne lui permettent pas de se conformer à ce principe.

## La gestion des déchets FAVL et TFA

La question du stockage des déchets FAVL n'a pas progressé significativement. Une intensification de la recherche de sites de stockage pour les déchets FAVL non éligibles au stockage sur le site de la Communauté de Communes de Vendevre-Soulaines est indispensable. Cette recherche doit se fonder sur la description des inventaires radiologiques et chimiques des déchets à stocker.

8

Pour ce qui concerne les déchets TFA, un cadre dérogatoire réglementaire a été mis en place pour la valorisation des substances métalliques. À ce titre EDF étudie une filière de recyclage des aciers sur le site de Fessenheim. Cette filière de valorisation diminuerait le volume de déchets TFA à stocker. Il convient d'instruire les possibilités de faire évoluer le cadre réglementaire pour les substances faiblement radioactives autres que métalliques, faute de quoi les efforts de R&D sur la caractérisation de ces substances et leur valorisation resteront inutiles.

## La pérennisation de la R&D dans le domaine nucléaire

Il serait très dommageable que les programmes de R&D accompagnant le programme « Fermeture du Cycle » soient en risque à l'issue des financements France 2030 actuels. Les modalités de financement de ces programmes au-delà de France 2030 doivent d'ores et déjà être identifiées.

## Panorama international : les projets de stockage en Finlande et en Suède

Malgré quelques difficultés passées, les projets de gestion des déchets nucléaires en Finlande et en Suède ont considérablement progressé. Ces pays identifient quatre facteurs de succès des projets. La concertation autour d'un sujet et le dialogue prennent certes le temps nécessaire, mais une décision prise est rarement remise en question. Par ailleurs, ces pays considèrent qu'il n'y a aucune valeur ajoutée à multiplier les groupes de travail pour conseiller le gouvernement ou les autorités de sûreté quant à leurs décisions. De plus, les gouvernements des deux pays délèguent les décisions concernant l'exécution des projets de stockage à l'Autorité de sûreté. Enfin, la Finlande applique depuis le début un processus décisionnel très rapide et efficace ; la Suède rattrape également son retard dans cette direction.





## 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 la gestion des matières et des déchets radioactifs. Elle remet ses recommandations au Parlement pour éclairer ses décisions. Son rapport annuel est transmis au Parlement puis rendu public. Tous les documents publiés par la CNE sont accessibles sur son site internet <https://www.cne2.fr>.

Instituée par la loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991, confirmée et élargie dans ses missions par la loi n°2006-739 du 28 juin 2006, cette Commission compte quatorze membres, conformément au Code de l'environnement, 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. L'annexe I donne la liste des membres à la date du 15 avril 2026.

La Commission a jugé utile cette année d'aborder dans son rapport l'ensemble des sujets relevant de sa compétence : la gestion des matières et des déchets nucléaires tout au long du cycle du combustible et les travaux de recherche et développement en appui à cette gestion.

Le rapport présente d'abord l'état des réflexions de la Commission sur la gestion des matières nucléaires. Le premier chapitre revient sur la disponibilité de l'uranium naturel pour alimenter les réacteurs électronucléaires français, sujet déjà abordé dans le rapport 19 de mai 2025, mais qui est crucial dans un contexte international incertain. Le deuxième chapitre fait le point des études conduites en vue d'optimiser la gestion des matières nucléaires et de prolonger le fonctionnement des usines actuelles du cycle. Le troisième chapitre aborde les travaux relatifs à la fermeture du cycle et aux usines du futur.

Le rapport présente ensuite la situation actuelle de la gestion des déchets radioactifs. Le quatrième chapitre rappelle les principales conclusions du rapport produit par la Commission sur le dossier de demande d'autorisation de création de Cigéo et apporte des précisions complémentaires.

Le cinquième chapitre examine les stratégies d'assainissement et démantèlement mises en œuvre par le CEA, EDF et Orano. Ces opérations produisent des déchets TFA et FAVL dont la gestion est examinée au sixième chapitre.

Le septième chapitre examine les évolutions récentes dans l'organisation de la recherche en France sur les questions nucléaires et souligne quelques aspects indispensables à sa souveraineté et sa pérennité. Enfin le panorama international de cette année propose au huitième chapitre un examen des projets de stockages de déchets HA en Suède et en Finlande, et de la manière dont ils sont conduits.

Pour ce rapport, la Commission a tenu compte des documents qui lui ont été transmis jusqu'au 15 avril 2026.



## CHAPITRE 1. L'APPROVISIONNEMENT DU PARC ÉLECTRO-NUCLÉAIRE EN MATIÈRES COMBUSTIBLES

Le présent chapitre aborde la question de la disponibilité sur le long terme des matières pour alimenter les réacteurs électronucléaires français, dans un contexte géopolitique incertain.

### 1.1. UN CONTEXTE FORTEMENT ÉVOLUTIF

Les 57 réacteurs REP du parc nucléaire français actuel consomment environ 7 000 à 8 000 t/an d'uranium naturel en considérant l'effet bénéfique du recyclage, sous forme de combustible MOX, du plutonium extrait des combustibles UNE usés d'une part, et du recyclage, sous forme d'URE, de l'uranium récupéré lors du retraitement des combustibles (URT) d'autre part<sup>1</sup>. La France ayant fermé ses dernières mines d'uranium en 1997 (Lodève), l'uranium naturel est aujourd'hui intégralement importé (sous forme commerciale de Yellow Cake) principalement du Kazakhstan, de Namibie, du Canada et d'Australie, et jusqu'il y a peu du Niger. Ces approvisionnements diversifiés reposent sur des partenariats et contrats de long terme (c'est notamment le cas pour les approvisionnements d'EDF auprès de fournisseurs étrangers – qui peuvent aussi se faire sous la forme d'assemblages de combustible UNE), voire des participations dans les sociétés exploitant ces mines (c'est notamment le cas pour Orano). Dans un monde globalisé tel qu'il a prévalu jusqu'à la fin de la décennie précédente, les échanges commerciaux restaient régis sur une base contractuelle. De ce fait, les approvisionnements en uranium étaient considérés comme suffisamment sécurisés de par la diversification des fournisseurs et des pays d'origine.

11

La conflictualisation grandissante des relations internationales conduit aujourd'hui à une fracturation de l'économie mondiale et notamment des marchés de matières premières dans un contexte de besoin mondial croissant. Bien loin du respect du droit des affaires, l'année 2025 a vu se développer des discours agressifs visant à s'accaparer les ressources de pays tiers. D'autres pays remettent en cause les conditions d'exploitation de leurs ressources naturelles. La récente nationalisation de fait par les autorités au pouvoir de la société des mines d'Arlit au Niger (filiale d'Orano) est un bon exemple du caractère imprévisible de ces évolutions. Dans ce contexte, des scénarios disruptifs conduisant à la sortie du marché de certains pays clés ne relèvent plus de la dystopie et ne peuvent être écartés sur le moyen terme, d'autant qu'à l'instar de ce qu'on observe pour l'ensemble des métaux critiques, l'uranium devient une ressource stratégique faisant l'objet d'une convoitise croissante de la part des pays possédant un parc nucléaire conséquent. Ce contexte amène à s'interroger sur les risques pesant sur les approvisionnements à moyen et long terme. Aussi, la France a besoin d'anticiper de possibles perturbations futures du marché de l'uranium et de sécuriser le fonctionnement de son parc nucléaire. À ce jour et comme décrit dans le rapport 19 de la Commission, la sécurisation de l'approvisionnement du parc nucléaire français repose :

- sur les réserves minières qu'Orano possède dans son portefeuille d'actif ;
- sur des stocks stratégiques d'uranium naturel présent sur le territoire national ;
- sur les stocks d'uranium appauvri (Uapp) provenant des opérations d'enrichissement et d'uranium de retraitement (URT) récupéré lors des opérations de traitement des combustibles usés, présents également sur le territoire national ;

Dans les paragraphes suivants la Commission aborde successivement ces différentes pistes.

---

<sup>1</sup> Le recyclage de l'uranium de retraitement a été interrompu au milieu de la décennie précédente mais a repris en 2023 pour les 4 réacteurs de la centrale nucléaire de Cruas.

## 1.2. SÉCURISATION DE NOUVELLES RESSOURCES EN URANIUM

La Commission constate que les risques systémiques pesant sur l'approvisionnement d'uranium à long terme qui avaient été identifiés dans le rapport 19 (2025) se sont accrus avec l'augmentation de la conflictualité et la régionalisation des marchés.

### 1.2.1. Potentiel global des ressources conventionnelles

Les réserves d'uranium naturel correspondent à la part des ressources qui sont exploitables compte tenu de la technologie (extraction et concentration) et des conditions de marché. Elles dépendent donc fondamentalement du cours de l'uranium qui, en augmentant, permet non seulement à des gisements de plus en plus coûteux de devenir rentables, mais conduit également les entreprises à augmenter leurs dépenses d'exploration pour découvrir de nouveaux gisements. À ce jour, les réserves d'uranium accessibles pour un coût de recouvrement inférieur à 130 US\$/kgU sont estimées par l'Agence de l'énergie nucléaire de l'OCDE à 5,9 Mt, et à 7,9 Mt pour un coût inférieur à 260 US\$/kgU, dont 60 % sont considérées comme raisonnablement identifiées (Reasonably Assured Resources, RAR), et 40 % seulement soupçonnées (Inferred Resources, IR). Le coût d'extraction de l'uranium ne représentant qu'une très faible part du prix du MWh électrique nucléaire (de l'ordre de 2 à 3 euros, soit 5 % de 60 €/MWh), même les ressources les plus coûteuses sont susceptibles d'être utilisées sans impact majeur sur le coût de l'électricité nucléaire.

La consommation du parc nucléaire mondial a été en 2025 d'environ 69 000 tonnes d'uranium naturel. Elle augmente régulièrement du fait de l'augmentation de ce parc nucléaire mondial, notamment du fait de la connexion régulière de nouveaux réacteurs en Chine. Comme montré dans le rapport 19, les prévisions de consommation d'uranium d'ici le milieu du siècle présentent de forts écarts selon les hypothèses retenues mais conduisent *a minima* à un doublement de la consommation d'ici 2050. À plus long terme, l'OCDE/AEN estime que les besoins pourraient consommer l'ensemble des ressources identifiées (RAR et IR) d'ici la décennie 2080 dans les scénarios de forte croissance du nucléaire, ou au début du siècle prochain en cas de scénario de développement moins rapide. Cela nécessitera dans tous les cas des investissements conséquents dans l'exploration minière. En revanche, la même OCDE/AEN estime que les réserves non découvertes restent importantes. Ces perspectives confirment l'intérêt d'investir dans l'exploration de nouvelles ressources.

*Dans un contexte géopolitique de plus en plus incertain, la Commission recommande que soit poursuivie une politique énergétique de réduction des besoins du parc électronucléaire en uranium naturel, et de sécurisation des importations nécessaires.*

### 1.2.2. Potentiel global des ressources secondaires

Au-delà des ressources conventionnelles décrites précédemment, il existe également des ressources non conventionnelles d'uranium à très basse teneur, tel que l'uranium co-produit d'autres ressources comme les terres rares, le cuivre ou les phosphates, ou l'uranium de l'eau de mer.

Les évaluations menées par le CEA sur l'estimation du stock disponible dans les phosphates montrent que les valeurs historiquement publiées d'une vingtaine de millions de tonnes sont en fait surévaluées. Elles sont estimées actuellement autour de 4 Mt du fait d'une réactualisation des ressources de phosphates. De plus, cette même étude montre que si l'uranium était récupéré comme co-produit sur l'ensemble des installations de production d'acide phosphorique, cela ne représenterait qu'une dizaine de milliers de tonnes par an, ce qui serait largement insuffisant pour faire face à la croissance rapide des besoins. En ce qui concerne la production en co-produits de

métaux comme le cuivre (exemple : Olympic Dam), la Commission n'a pas identifié de nouvelles opportunités qui conduiraient à augmenter significativement ces réserves.

Par ailleurs, le stock d'uranium contenu dans le charbon est évalué à 200 000 tonnes. La récupération de cet uranium dans les cendres de charbon pourrait représenter au maximum 700 t/an, soit environ 1 % de la consommation annuelle mondiale.

Enfin, bien que la quantité d'uranium présent dans l'eau de mer représente une ressource très significative d'environ 4 500 Mt, sa récupération reste à ce jour un défi technologique et économique majeur du fait des très faibles concentrations (environ 3,3 µg/l). Néanmoins, ce sujet fait l'objet d'une attention croissante des pays asiatiques, notamment de la Chine, et le sujet donne lieu à un nombre croissant de publications scientifiques internationales, plus de 800 en 2025 sur le sujet. Les méthodes les plus pertinentes semblent être l'utilisation d'adsorbants à forte affinité pour l'uranium susceptibles d'être greffés sur des feutres, des filtres ou des filets pouvant être posés au fond de l'eau ou tirés derrière des bateaux. Le gigantisme des volumes d'eau à traiter du fait de la très faible concentration rend économiquement prohibitive toute option de pompage pour récupération. De la même manière, les volumes traités pour le dessalement de l'eau de mer sont insuffisants pour permettre une production annuelle significative. Les coûts de production annoncés, sans qu'il soit possible à ce stade de les évaluer précisément, se situeraient entre 500 et 1 800 US\$/kgU, bien au-delà des prix actuels du marché. À ce jour, cette option n'est donc pas économiquement viable mais les efforts des pays travaillant sur ce sujet méritent d'être suivis.

La Commission constate que les ressources secondaires ne sont pas en mesure de constituer une alternative viable aux approvisionnements habituels à partir des ressources conventionnelles du fait soit des faibles flux accessibles annuellement, soit de leur coût d'accès qui reste prohibitif.

*La Commission recommande que le CEA maintienne une veille des études menées par certains pays pour des approvisionnements alternatifs d'uranium naturel, dont la récupération dans l'eau de mer par des systèmes passifs, afin d'identifier une éventuelle rupture technologique.*

### **1.2.3. Du besoin de mieux connaître nos ressources**

Selon la base de données de l'UDEPO, le potentiel en uranium de la France reste compris entre 74 et 217 milliers de tonnes, sans préjuger des gisements plus profonds méconnus à ce jour. Le retour sur le devant de la scène politique de la question des approvisionnements en métaux stratégiques a conduit le gouvernement français à déployer une politique publique renforcée pour sécuriser ses approvisionnements, qui passe notamment par une mise à jour de l'inventaire national des ressources minérales du sous-sol français (IRM) financée par France 2030 et confiée au BRGM. Dans le cadre de cet IRM, il semble donc opportun d'intégrer l'uranium dans les métaux recherchés, d'autant que le suivi de la radioactivité du sous-sol est l'une des techniques géophysiques clés de prospection. Cela permettrait de profiter de l'effet de levier que représente cette mobilisation collective et des outils mis en place pour l'accompagner.

*La Commission recommande d'intégrer la ressource uranium dans la politique de sécurisation des métaux stratégiques, en particulier dans le cadre de l'inventaire national des ressources minérales (IRM) en cours de réalisation sur une partie du territoire français.*

### 1.3. DÉVELOPPER LA CAPACITÉ À UTILISER PLUS EFFICACEMENT L'URANIUM

La France disposait à fin 2024 d'un stock considérable de 352 000 tonnes d'uranium appauvri (inventaire Andra) qui sert à ce jour comme matrice pour les combustibles MOX à raison d'une centaine de tonnes par an. Cet uranium contient également encore du  $^{235}\text{U}$  à hauteur de 0.3 % en moyenne et peut à ce titre, être à nouveau enrichi pour fabriquer des nouveaux combustibles UOX utilisables dans les réacteurs REP actuels. Néanmoins, cet enrichissement est d'autant plus énergivore (et donc coûteux) que la teneur de départ en  $^{235}\text{U}$  est faible, ce qui limite son intérêt économique ; il peut toutefois constituer une solution de secours en cas de crise à moyen terme.

L'isotope  $^{238}\text{U}$  possède également un potentiel énergétique pour peu qu'il puisse être mis dans un flux de neutrons plus rapides qui permette de fertiliser l' $^{238}\text{U}$  en le transformant en  $^{239}\text{Pu}$  fissile. Cette transformation se produit avec un faible rendement dans les réacteurs REP où elle est responsable de la production de  $^{239}\text{Pu}$ . En revanche, elle se produit de manière maîtrisée dans des réacteurs à neutrons rapides qui sont ainsi susceptibles de consommer efficacement du  $^{238}\text{U}$  pour produire de la chaleur convertible en électricité. C'est le principe de base des réacteurs à neutrons rapides que la France a contribué à développer depuis les années 60 avec la filière des réacteurs Rapsodie (1967-1983), Phénix (1973-2010), Super-Phénix (1984-1997), puis avec le projet ASTRID (2006-2020). Depuis le Conseil de politique nucléaire de mars 2026, la France a officiellement relancé un programme de fermeture du cycle qui vise à valoriser cette ressource énergétique d'ores et déjà extraite du sous-sol, purifiée et pleinement souveraine. Ce programme fait l'objet de commentaires plus détaillés dans le chapitre 3 de ce rapport. En effet il joue un rôle central dans la sécurisation de l'approvisionnement du parc nucléaire pour la seconde moitié de ce siècle.

La Commission considère que les risques de rupture d'approvisionnement en uranium naturel iront croissant dans la seconde moitié de ce siècle et que les réserves d'uranium appauvri présentes sur le sol français constituent un stock stratégique souverain de matières énergétiques valorisables déjà extraites du sous-sol et purifiées.

14

*La Commission recommande que l'uranium appauvri soit dorénavant systématiquement considéré comme une matière énergétique valorisable.*

Au même titre que l'uranium appauvri (Uapp), l'uranium issu du retraitement des combustibles usés à La Hague (URT) représente un stock de matière qui doit être valorisé. Cette question est abordée en détail au § 2.4.

Plus généralement, la Commission rappelle que le recyclage du plutonium permet d'extraire plus d'énergie de l'uranium que la simple utilisation de l'uranium naturel enrichi. L'énergie de fission potentielle contenue dans l'uranium naturel est de l'ordre de 1 000 GWj/t. Dans un REP alimenté avec du combustible UOX enrichi à 4 % en  $^{235}\text{U}$  exploité sans recyclage, on extrait quelques GWj/t de l'uranium ; dans un REP mono-recyclant du plutonium sous forme de MOX-REP (Uapp avec environ 9 % de Pu), on en extrait quelques dizaines de GWj/t et dans un RNR iso-générateur multi-recyclant son propre combustible usé (Uapp avec environ 20 % de Pu), on extrait quelques centaines de GWj/t à chaque passage en réacteur. Plusieurs recyclages en RNR suffisent pour valoriser entièrement le potentiel énergétique de l'uranium naturel, les valeurs exactes dépendant des bilans matières des réacteurs et de leur conduite.

## CHAPITRE 2. L'AVAL DU CYCLE DU COMBUSTIBLE : SITUATION ACTUELLE

La filière nucléaire civile française, dont la finalité est la production souveraine d'électricité, repose, depuis l'origine, sur la maîtrise des technologies et de la construction des réacteurs d'une part et la maîtrise de l'ensemble des usines du cycle d'autre part, notamment celles permettant le recyclage du combustible nucléaire.

Depuis le discours du Président de la République à Belfort, le 10 février 2022, la relance de la filière est actée. Cette relance comprend la construction de 6 EPR2 et l'objectif de s'affranchir de l'importation d'uranium naturel en fermant le cycle du combustible, ce qui implique la construction de nouvelles usines de fabrication et de retraitement. Cette ambition majeure est pour le long terme et implique de mettre en œuvre un programme intitulé « l'Aval du Futur ». L'aval du cycle du combustible actuel constitue le socle sur lequel ce programme doit se construire. Il convient donc de le maintenir à son meilleur niveau et de le pérenniser.

Grâce au traitement-recyclage des combustibles nucléaires usés réalisé dans les usines de La Hague, il est d'ores et déjà possible de réutiliser une fois les matières fissiles des assemblages combustibles usés : le plutonium produit par capture neutronique dans les combustibles MOX (Mixed Oxide Fuel) et l'uranium de retraitement (URT) dans les combustibles URE. Le recyclage du plutonium dans les combustibles MOX permet aujourd'hui de réduire les importations d'uranium naturel de 10 % et le recyclage de l'URT pourrait permettre également d'économiser de l'ordre de 10 % supplémentaires comme il a été montré dans les années 2010.

Avant leur traitement-recyclage, les combustibles usés sont entreposés durant plusieurs années en piscine pour permettre leur refroidissement et la décroissance des radionucléides à vie courte. Leur tenue et le bon dimensionnement des capacités d'entreposage ont donc une grande importance. Après plus de quatre décennies de fonctionnement des différents ateliers de La Hague, il est nécessaire d'engager des travaux de rénovation pour pérenniser ces ateliers jusqu'à leur remplacement.

15

### 2.1. GRANDES DONNÉES DE LA GESTION DU COMBUSTIBLE

L'objet manipulable est l'assemblage combustible (AC). Les AC neufs UNE du parc EDF sont fournis par Westinghouse ou Framatome. Ils alimentent totalement ou partiellement 31 des 32 réacteurs de 900 MWe, les 20 réacteurs de 1 300 MWe, les 4 réacteurs N4 de 1 450 MWe et le réacteur EPR de 1 650 MWe de Flamanville.

Depuis 1987, le MOX est utilisé en France, afin de recycler la totalité du plutonium extrait des assemblages de combustibles usés (ACU) UOX recyclés. Le mélange MOX comprend de l'uranium appauvri, co-produit de l'enrichissement de l'uranium naturel, et du plutonium issu du retraitement, dont la teneur maximale autorisée est de 9,8 %, et la teneur moyenne de 8,65 %. Les AC MOX sont utilisés dans 22 réacteurs 900 MWe sur les 24 réacteurs dont la conception le permet. Dans ces réacteurs, les AC MOX représentent 30 % des assemblages, les autres étant des AC UNE classiques. La gestion par quart de cœur de ces AC s'effectue par des déchargements et des rechargements de 28 AC UNE et 12 AC MOX par an. Le programme CAMOX a pour objectif de réduire la fréquence des arrêts de tranche. À l'horizon 2028, le temps entre rechargements d'AC en réacteur devrait ainsi passer de 12 mois à 16-18 mois pour les 22 réacteurs actuellement moxés.

## 2.2. ÉVOLUTION DES ASSEMBLAGES COMBUSTIBLES

L'amélioration des performances d'exploitation et de sûreté des AC est un objectif constant de la R&D des deux fournisseurs d'EDF, Framatome et Westinghouse. Des travaux ont été conduits pour remplacer le Zircaloy 4, matériau de gainage historique, par le M5 de Framatome et l'Optimized Zirlo de Westinghouse. Des matériaux de squelette des AC ont été étudiés pour atteindre de meilleures performances en fluage sous irradiation et réduire leurs déformations en réacteur. De même, pour tenir compte du retour d'expérience, l'ajout de grilles de renfort en bas d'assemblage a été étudié pour renforcer le maintien des crayons. Les plaquettes externes des grilles de mélange peuvent également être modifiées pour réduire les risques d'accrochage des assemblages en manutention. D'autres études visent à limiter les conséquences d'éventuels accidents graves dans le cadre du concept "Accident Tolerant Fuels" (ATF) adopté internationalement.

*La Commission recommande la poursuite de la R&D sur les assemblages combustibles, afin d'améliorer leurs performances et pour être en mesure de se conformer aux conditions de la taxonomie européenne sur les combustibles ATF, si elles étaient durcies à l'avenir.*

## 2.3. EXTENSION DE L'UTILISATION DU MOX

L'utilisation du MOX devrait être étendue à tous les autres réacteurs 900 MWe d'ici 2035 et commencer dans les réacteurs 1 300 MWe vers 2035 pour maintenir la consommation de MOX après l'arrêt des premiers réacteurs 900 MW.

Le nombre des AC MOX chargés en réacteur reste dimensionné par la capacité de fabrication de l'usine Melox. Afin d'atteindre une optimisation des besoins de production sur les 15 prochaines années, Orano investit dans Melox à Marcoule 300 millions d'euros dans le programme GoMOX pour sécuriser la production de MOX jusqu'en 2040. Le chantier s'appuie également sur la montée en compétences des opérateurs et l'école des métiers, inaugurée en 2024 à Melox, qui joue un rôle clé dans cette dynamique.

L'usine Melox produit des AC MOX pour les besoins d'EDF mais aussi pour le Japon. Elle est aujourd'hui la seule installation industrielle de cette ampleur en activité. Fragilisée par l'adoption du procédé de fabrication du MOX avec de l'UO<sub>2</sub> (issu de l'Uapp) préparé par voie sèche, la production de Melox a baissé à 60 tML en 2022, pour une autorisation de 145 tML. Grâce à la mise en service d'un nouvel atelier de fabrication d'UO<sub>2</sub> par voie humide à Malvézi, la production se rétablit progressivement. Elle a atteint 100 tML en 2025.

*Compte-tenu de l'objectif de réduction des importations d'uranium naturel, la Commission accorde une grande importance au retour à la capacité nominale de la production de MOX à Melox dans les prochaines années et recommande à Orano de poursuivre ses efforts à cet effet.*

## 2.4. LA NÉCESSITÉ D'UN RECYCLAGE SOUVERAIN DE L'URANIUM DE RETRAITEMENT (URT)

Le retraitement des ACU UNE permet de récupérer 95 % du combustible sous forme d'URT. Sa teneur en <sup>235</sup>U est de 0,8 %, mais il contient aussi du <sup>236</sup>U et des traces de produits de fission. Le recyclage en réacteur de l'URT sous forme d'URE a été réalisé entre 1994 et 2013 dans les réacteurs REP 900 MWe de Cruas, dont les 4 unités sont autorisées à l'utiliser. La conversion préalable de l'URT en fluorure ainsi que son enrichissement étaient réalisés en Russie par Tenex,

et la fabrication des AC en France, à Romans. Le recyclage de l'URT a été suspendu en 2013 en raison de la baisse du prix de l'uranium naturel.

Aujourd'hui, alors que le prix de l'uranium a recommencé à croître et que les tensions géostratégiques se multiplient, l'objectif d'EDF est de mieux utiliser les matières fissiles issues du retraitement afin de réduire la dépendance extérieure en uranium naturel. Par ailleurs, EDF souhaite maîtriser l'évolution de son stock d'URT (34 900 tML fin 2024).

La filière URT, relancée en 2023, est de nouveau opérationnelle. La conversion est toujours assurée par Tenex en Russie, qui détient la seule usine capable de la réaliser. L'enrichissement pour sa part peut être réalisé en Russie par Rosatom ou aux Pays-Bas par Urenco, Orano ne disposant pas d'une ligne d'enrichissement de l'UF<sub>6</sub> issu de l'URT. L'utilisation de l'URE en réacteur a repris à Cruas : une première recharge a été livrée en 2023 et, fin 2025, les quatre réacteurs de la centrale sont partiellement chargés en URE.

Le chargement des réacteurs 1 300 MWe en URE est également prévu à partir de leur quatrième visite décennale. Aujourd'hui quatre tranches 1 300 MWe, situées à Nogent et Saint-Alban, sont identifiées pour recevoir des recharges URE. La première recharge URE 1 300 MWe est planifiée pour 2028. À terme, une dizaine de réacteurs 1 300 MWe pourraient participer à la valorisation de l'URT.

L'encours d'URT représente une réserve stratégique. La situation géostratégique actuelle impose de repenser la filière de fabrication de l'URE. À cet égard, EDF et Westinghouse sont en discussion pour la construction d'une installation de conversion en Europe. Afin de réduire les coûts élevés prévisibles, une extension des installations existantes est envisagée, par exemple à Springfield au Royaume-Uni. Une autre solution serait une extension d'installation sur le site du Tricastin (Orano). La réalisation d'un tel projet aurait une durée de l'ordre de 10 ans.

*La Commission considère que la réserve de matière fissile que représente l'URT est un atout stratégique qui doit pouvoir être valorisé par une structure industrielle pérenne et résiliente basée en France ou dans un pays affinitaire, en particulier pour la conversion de l'URT en UF<sub>4</sub> et UF<sub>6</sub>, ainsi que pour son ré-enrichissement. La Commission demande à EDF de lui présenter régulièrement l'avancement de ces projets.*

---

17

## 2.5. LA MODULATION DU PARC ÉLECTRONUCLÉAIRE ET SES CONSÉQUENCES

### 2.5.1. Contraintes liées à l'augmentation de la production d'électricité prévue par la PPE3

La troisième Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE3) fixe la stratégie énergétique de la France pour la période 2026-2035, et trace la trajectoire vers la neutralité carbone à l'horizon 2050. Elle assigne des objectifs ambitieux pour la production d'électricité à l'horizon 2035 : 380-420 TWhe de production électronucléaire (363 TWhe en 2024), 67-98 TWhe de production photovoltaïque (25 TWhe en 2024), 80-91 TWhe d'éolien terrestre (43 TWhe en 2024) et 59 TWhe d'éolien marin (4 TWhe en 2024). La production de l'éolien et du photovoltaïque augmenterait donc considérablement, anticipant une augmentation forte de la demande d'électricité dans les années à venir. Or celle-ci, avec un niveau de 449 TWhe en 2024, n'a toujours pas retrouvé son niveau des années 2011 à 2019 autour de 480 TWhe.

La Commission estime qu'en raison des investissements lourds qui seront nécessaires à l'avenir, l'électrification accrue des usages, notamment dans les transports et l'industrie, n'interviendra que progressivement. Dans l'attente d'une telle électrification, les épisodes de surproduction et de prix négatifs de l'électricité, déjà constatés, devraient donc se multiplier. Dès à présent, il revient au parc électronucléaire d'assurer une part importante de l'équilibre du réseau en fréquence et en

tension ; le développement de l'intermittence dans la production électrique complique considérablement cette double mission.

### 2.5.2. La modulation, un mode de gestion de plus en plus sollicité

Depuis quelques années, EDF est contraint de moduler la puissance électrique du parc de REP au-delà de la gestion courante qui nécessite des arrêts en plus des tests de puissance réglementaires. L'année 2024 correspond à un tournant dans la modulation, qui a dépassé 30 TWh (environ 10 % de la production) en raison d'une demande d'électricité atone et d'une place accrue de l'éolien et du photovoltaïque dans la production électrique nationale. Ce niveau de modulation représente une évolution sans précédent dans le fonctionnement des REP, jamais observée dans aucun pays au monde.

Les REP ont été conçus pour fournir de l'électricité en base, c'est-à-dire en continu, une capacité de modulation ayant toutefois été prévue pour permettre par exemple de stabiliser la fréquence du réseau. Les règles de gestion des réseaux définies par l'Union européenne conduisent à privilégier l'appel des énergies renouvelables intermittentes sur le réseau, alors que l'électricité est un vecteur d'énergie non stockable. EDF a dû adapter les modes de conduite de ses réacteurs pour permettre une modulation de la puissance électrique produite dans la plage de 100 % à 20 % de la puissance maximale du réacteur. En complément, EDF peut également procéder à la déconnexion d'unités de production du réseau électrique ("arrêt Équilibre Offre-Demande" (EOD)). En 2024, EDF a procédé à 3 000 variations de charge pour modulation sur l'ensemble du parc des réacteurs REP.

Cependant, pour des raisons de sûreté, EDF ne peut faire varier la puissance d'un REP dans les limites 100 % à 20 % que deux fois par jour pendant les deux premiers tiers du temps entre deux arrêts de tranches successifs. Le retour à la puissance nominale du REP est rapide, mais ne peut être réalisé qu'après quelques heures à basse puissance, car la baisse de puissance induit dans le REP des phénomènes neutroniques transitoires empêchant son redémarrage immédiat (présence transitoire de xénon neutrophage). Après un arrêt EOD, le re-couplage d'un REP demande *a minima* 24 heures.

### 2.5.3. Leviers utilisables pour faire face à l'accroissement de la modulation

La modulation a conduit à une réduction de 35 TWh de la production électrique nucléaire en 2025. Dans un contexte de demande atone et compte tenu des objectifs de la PPE, la Commission estime que le besoin de modulation pourrait doubler dans les prochaines années. La totalité des réacteurs en capacité de moduler pourrait être mobilisée, avec une généralisation à deux du nombre de modulations quotidiennes, en fonction des besoins du réseau.

Deux leviers permettent de faire face à l'augmentation de la modulation. La diminution du nombre d'assemblages combustibles neufs par recharge est particulièrement utile pour la gestion des cœurs associés à des cycles annuels et celle de la demande saisonnière. L'espacement des arrêts constitue un autre levier.

### 2.5.4. Une R&D sur les combustibles soumis à la modulation à consolider

La première conséquence de la modulation, qui a été évaluée par EDF, est la réorganisation nécessaire du pilotage de l'ensemble des REP. EDF a publié un rapport de retour d'expérience sur les impacts structurels et organisationnels de ce nouveau mode de gestion du parc. La deuxième conséquence, non encore chiffrée, est économique, en raison de la sous-utilisation du parc.

La modulation a d'autres conséquences. La diminution de puissance d'un REP s'accompagne de distorsions du flux neutronique dans le cœur et de variations de température dans les AC et dans

les circuits primaire et secondaire. Les gradients de température créés génèrent des contraintes thermomécaniques et thermochimiques sur les matériaux des réacteurs. L'interaction pastille-gaine due à une dilatation différentielle entre la céramique  $UO_2$  et le matériau de gainage (oxydes-zircaloy) devient répétitive et la répartition des produits de fission dans les oxydes ainsi que leur microstructure est affectée. La modulation entraîne aussi une consommation accrue de composés chimiques ( $H_3BO_3$ ,  $LiOH$ ) et d'eau. Il s'ensuit une augmentation du volume d'effluents d'exploitation à traiter, conduisant à une augmentation des déchets solides (résines) et des rejets à l'environnement contenant du tritium, dans le respect des autorisations de rejets en vigueur.

Autre complication, les assemblages combustibles UNE ou MOX neufs ont des caractéristiques bien définies pour que leur taux de combustion atteigne une valeur donnée au déchargement et qu'ils puissent être mis en entreposage. Cette règle générale doit être respectée en cas de modulation. En cas de difficulté de gestion, EDF pourrait décharger, avec l'autorisation de l'ASNR, des assemblages qui n'auraient pas atteint leur taux de combustion prédéfini. Ces assemblages seraient plus riches en matière fissile que les assemblages n'ayant pas subi de modulation, avec des compositions isotopiques et des microstructures différentes du combustible usé et des contraintes induites sur les opérations ultérieures de traitement-recyclage à La Hague.

*Les études menées par EDF lui ont permis jusqu'à maintenant de faire face aux contraintes associées à la modulation. Dans la perspective d'une augmentation du besoin de modulation, la Commission recommande que les résultats actuellement acquis soient confortés par des études complémentaires portant sur les conséquences de cette modulation sur le comportement des combustibles en réacteur, sur les opérations d'entreposage et sur le traitement-recyclage des combustibles usés.*

## 2.6. L'ENTREPOSAGE DES ASSEMBLAGES COMBUSTIBLES

19

Après irradiation, les ACU UNE sont d'abord entreposés dans la piscine BK de désactivation sur le site du réacteur pendant 3 à 4 ans. L'entreposage des ACU, une fois déchargés, est une étape incontournable, puisque leur refroidissement est indispensable avant leur transport et retraitement.

### 2.6.1. Des risques de saturation maîtrisés pour l'aval du cycle actuel

Plusieurs dispositions sont prises pour réduire le risque de saturation : densification des piscines centralisées de La Hague avec l'utilisation de nouveaux paniers et mise en service du troisième entreposage de RBM (Rebuts Boîtes MOX). La mise en service des nouveaux paniers sur la période 2025-2030 pour les deux piscines actuelles permet, à elle seule, de conserver une marge d'une année. EDF estime que les risques de saturation sont couverts jusqu'en 2040 grâce à la densification de ces piscines.

Des parades complémentaires sont également développées pour éloigner ce risque. D'ici 2027, il serait possible d'augmenter la durée d'utilisation de combustibles MOX dans les REP 900 MWe, en portant le nombre d'assemblages MOX dans chaque recharge à 16 au lieu de 12. À partir de 2028, la gestion CAMOX conduirait à des marges supplémentaires avec des rechargements tous les 16 à 18 mois. De plus, comme solution de secours en cas de nécessité imprévue, les combustibles usés peuvent être entreposés à sec dans des conteneurs TN Eagle d'Orano pour une durée limitée à 30 ans, avant d'être replacés en piscine. Dix conteneurs (d'une capacité unitaire de 26 AC) ont été réceptionnés dans l'INB 117 de La Hague, leur mise en service pouvant intervenir après la modification en cours du dossier réglementaire de cette INB.

## 2.6.2. Perspectives de l'entreposage

Le projet de piscine centralisée à La Hague porté initialement par EDF a laissé place au projet d'Orano de construction de trois piscines de 6 500 tML dans les nouvelles installations prévues par le programme ADF dont la première phase opérationnelle en 2040 est l'Atelier de déchargement et d'entreposage des combustibles (ADEC).

*La Commission estime que, compte-tenu des incertitudes sur le calendrier de déploiement des installations du programme « Aval du Futur », il serait prudent de disposer de marges pour l'entreposage en poursuivant le programme de densification des piscines actuelles, afin de pallier toute saturation dont la conséquence serait de perturber le cycle du combustible dans sa totalité.*

## 2.6.3. Impact éventuel de la modulation sur les piscines BK

La densification des piscines d'entreposage des ACU est en cours à La Hague pour atteindre une capacité de 15 600 tML. De son côté, EDF n'envisage pas d'étendre la densification aux piscines BK dans lesquelles sont déchargés les ACU des centrales nucléaires. Leur capacité globale est d'environ 5 400 tML.

Certaines méthodes de gestion de la modulation pourraient toutefois obliger EDF à infléchir sa position. Une forte modulation se traduit en effet par la mise en piscine BK de divers types d'assemblages combustibles insuffisamment épuisés. Même si certains AC sont destinés à être rechargés, EDF indique qu'en conséquence, sauf à évacuer ces combustibles, il existe un risque d'encombrement des piscines BK.

*La Commission demande à être informée des scénarios d'évolution des taux d'occupation des piscines BK en fonction de l'amplitude de la modulation et du devenir des AC partiellement usés.*

## 2.7. TENUE DES COMBUSTIBLES EN ENTREPOSAGE

### 2.7.1. Programme de R&D

La durabilité de l'entreposage sous eau est étudiée depuis plusieurs dizaines d'années par EDF dans des projets internes souvent inclus dans le cadre de programmes internationaux. Le projet PRECCI mené par le CEA depuis la fin des années 1990 a permis une étude détaillée et exhaustive de l'évolution du combustible utilisé en toutes conditions, notamment en entreposage.

Les études ont notamment porté sur l'évolution attendue de la gaine des crayons des AC qui assure la première barrière de confinement. En piscine, celle-ci reste à basse température et le principal risque concerne donc une éventuelle rupture induite par la corrosion, d'autant que la pression interne des crayons reste importante. Les études ont montré que les différents phénomènes de corrosion restent limités et maîtrisés, qu'il s'agisse de la corrosion généralisée, de la corrosion par piqûre ou de celle sous contrainte qui pourrait être induite par la présence d'iode sur la face interne des gaines. La résistance mécanique du gainage reste également bonne malgré la présence accrue d'hydrogène dans le matériau (hydruration induite par l'irradiation). Enfin, la production continue d'hélium liée aux décroissances alpha dans la pastille ne conduit pas à une surpression créant un risque de rupture, la pression interne restant, dans tous les cas, inférieure à 70 MPa.

En cas de rupture, les expériences menées sur des tronçons de combustible confirment l'absence de risque de propagation de la fissure sur toute la hauteur du crayon sous l'effet de la formation de phases gonflantes.

Enfin, la reprise des combustibles en entreposage sollicite toutes les structures de l'ACU. De la même manière que pour la gaine, les dégradations potentielles de leurs propriétés mécaniques sont surtout liées à la corrosion. Dans une eau correctement conditionnée, ces phénomènes sont bloqués.

*La Commission considère que les études d'EDF ont montré que l'entreposage sous eau, dans les conditions actuelles, ne modifie pas les matériaux, leurs propriétés mécaniques restant similaires à celles avant l'entreposage et permettant la manipulation des ACU. La reprise est possible, les risques de rupture sont associés aux situations accidentelles qui font l'objet de recherches actives.*

### 2.7.2. Programme de surveillance

Malgré l'ensemble des résultats obtenus dans des programmes de recherche qui montrent que les ACU ne se dégraderont pas au cours de l'entreposage sous eau, EDF a mis en place un programme de surveillance. Il s'agit essentiellement d'une surveillance dimensionnelle et visuelle ; des examens sont pratiqués tous les dix ans et comprennent les éléments suivants :

- contrôles d'étanchéité (ressuage) ;
- examens télévisuels ;
- examens dimensionnels : distance entre embouts, distance entre crayon et embout (supérieur ou inférieur), espace inter-crayons, longueur crayons (programme PADEC, à partir de 2000, programme DIVA) ;
- mesures de l'épaisseur de la couche d'oxyde (sonde Fischer, à partir des années 2000 programme SABRE).

Aucune évolution des matériaux étudiés n'a été détectée lors des examens de surveillance. Les programmes internationaux « Extended Storage Collaboration Program » sous la tutelle de l'AIEA et « Cladding Integrity Project » sous la tutelle OCDE/AEN confirment les études françaises.

*Le programme de surveillance mis en place par EDF depuis plusieurs dizaines d'années confirme les résultats du programme de R&D qui ont montré que l'entreposage sous eau ne modifie pas les propriétés mécaniques des matériaux des ACU. Du fait de l'évolution des combustibles et de la proportion croissante du plutonium dans les MOX, et par ailleurs des effets possibles de la modulation, la Commission considère que ce programme de surveillance reste indispensable pour le suivi de l'entreposage.*

## 2.8. PROGRAMME « PÉRENNITÉ-RÉSILIENCE » DES USINES DU RETRAITEMENT

En parallèle à la conception des usines du futur, le programme « Pérennité-résilience » d'Orano vise à prolonger les usines actuelles jusqu'en 2060, au moins pour La Hague et l'atelier TU5 du Tricastin, usine permettant de convertir le nitrate d'uranyle en oxyde d'uranium.

Les objectifs sont d'assurer jusqu'à cette échéance la production nominale et d'anticiper d'inévitables aléas techniques par des redondances permettant de garantir la production nécessaire pour assurer la transition vers la mise en service des nouvelles usines. Depuis 2024, les effectifs travaillant sur les études et les investigations des équipements de l'ensemble des

installations ont été multipliés par dix. Elles devraient permettre de définir courant 2026 une première liste d'équipements prioritaires nécessitant un plan d'action pour fonctionner au-delà de 2040. Une feuille de route des actions industrielles à conduire d'ici 2040 sera présentée à EDF par Orano, pour l'établissement d'un nouveau contrat.

Les investigations actuelles concernant les matériels et appareils existants reposent sur l'analyse des documents à disposition (impacts des écarts à la construction et des conditions d'exploitation sur la durée de vie) et sur la reconnaissance visuelle du matériel lorsqu'elle est possible. Des équipements essentiels (et donc prioritaires) sont identifiés, avec les risques liés à leur vieillissement, qui peuvent être, par exemple, la corrosion, la fatigue thermique ou mécanique, l'augmentation de leur radioactivité et de la dosimétrie associée, leur encrassement ou encore leur obsolescence.

Les équipements identifiés comme essentiels dont la défaillance est envisagée avant 2060 feront l'objet d'un programme de jouvence ou de remplacement.

La définition des actions destinées à prolonger la durée de vie des équipements situés en zones inaccessibles à l'homme nécessite des examens approfondis rendus possibles grâce au développement d'outillages spécifiques innovants. Ces outillages doivent être capables d'effectuer des mesures précises et fiables en présence de débits de dose élevés.

La R&D du programme « Pérennité » porte en priorité sur la compréhension des phénomènes entraînant le vieillissement des matériaux (fatigue, corrosion, irradiation), qui comprend aussi les appareils de contrôle non destructifs et l'analyse de données. Des développements concernent également la robotique (téléopération assistée par ordinateur, simulation 3D), le contrôle nucléaire des procédés, la vitrification (encrassement, gestion des fines) et les outils de simulation.

Les études menées dans le cadre du programme « Pérennité » sont utilisées pour identifier les risques de défaillance, à partir desquels sont construits des scénarios de défaillance dans le cadre du programme « Résilience ». Des mesures correctives (redondances ou substitution d'équipements, variantes d'exploitation) seront engagées afin de rendre les installations plus robustes aux aléas.

*La Commission constate une montée en puissance significative du programme « Pérennité-résilience » des usines actuelles du cycle du combustible, avec un fort renforcement de son organisation et des effectifs travaillant sur le programme. Actuellement, les calendriers des études sont respectés et devraient permettre d'aboutir fin 2026 à un diagnostic concernant la faisabilité du prolongement des usines de l'aval du cycle au-delà de 2040, selon les attentes du dernier CPN.*

*La Commission recommande de pousser le plus possible les études de « Pérennité-résilience » afin de dégager de la marge calendaire au programme « Aval du futur » pour permettre la mise en œuvre de procédés nouveaux, tels que le procédé de séparation Pumas, qui seront utiles pour la fermeture du cycle avec les RNR.*

## CHAPITRE 3. VERS LA FERMETURE DU CYCLE

La réaffirmation des objectifs de poursuite du recyclage du plutonium et de l'uranium et de fermeture du cycle du combustible implique la construction de nouvelles usines. En effet, les usines de l'aval du cycle vieillissent. Elles ne devraient plus être opérationnelles vers le milieu du siècle sans des opérations importantes de jouvence.

Orano et les industriels du cycle ont présenté à la Commission l'articulation des programmes en cours pour atteindre ces objectifs : « Pérennité-résilience » et « Aval du futur » (ADF). Le premier étudie la possibilité de faire fonctionner l'usine Melox (fabrication du MOX) jusqu'en 2040, et les ateliers de retraitement du combustible UOX usé à La Hague jusque vers 2060 (voir chapitre précédent), le second vise à concevoir et construire des nouvelles usines du complexe « La Hague 2 ». Il comprend deux grandes étapes : dans un premier temps la mise en service en 2040 des ateliers de fabrication des combustibles (Melox 2), de l'atelier d'entreposage du plutonium, des ateliers de déchargement des combustibles (ADEC) et de la première piscine d'entreposage des ACU (6 500 tML) et, dans un second temps, celle des ateliers de retraitement de tous types de combustible usé. Cela pourrait être vers 2055-2060, si le fonctionnement des usines de retraitement actuelles est effectivement prolongé. Cette décision importante est à l'étude. Les nouvelles usines seront conçues pour durer 80 ans.

La feuille de route de la PPE3, publiée par décret le 13 février 2026, établit notamment la composition du mix énergétique français pour les dix ans à venir (2025-2035) et identifie les jalons technologiques et décisionnels permettant la mise en place d'un parc de RNR. Les industriels ont formalisé, par l'intermédiaire du Comité stratégique de la filière nucléaire (CSFN) l'intégration du multirecyclage en REP (MRREP) dans la feuille de route comme une étape de transition vers les RNR, avec l'objectif de commencer à recycler les combustibles MOX usés et de fabriquer un nouveau combustible MOX, le MOX-MR, selon un concept proche du MOX classique. La qualification du MOX-MR (premières irradiations prévues vers 2030 sur une tranche 1 300 MWe) ne devrait *a priori* pas poser de problème particulier.

### 3.1. LE MRREP ET LES SCÉNARIOS DE FERMETURE DU CYCLE

Les combustibles MOX usés contiennent plus de plutonium mais de moindre qualité fissile que les combustibles UOX usés. Le MRREP est présenté par les industriels comme une transition vers la fermeture du cycle en permettant la gestion de flux accrus de Pu dans les usines du cycle. Selon les exploitants, le MRREP présenterait l'avantage d'assurer la montée en compétence des acteurs de la filière dans ce domaine, en attendant l'avènement des nouvelles technologies qui seront nécessaires pour le traitement des MOX-RNR usés. Par ailleurs, la mise en place du MRREP permettrait d'économiser de l'Unat par rapport au monorecyclage et de piloter les inventaires de combustible MOX usés afin d'optimiser les capacités d'entreposage du site de La Hague.

Plusieurs scénarios de gestion des combustibles qui considèrent la mise en œuvre ou non du MRREP ont été présentés par le CEA. Ils reposent sur l'hypothèse d'un déploiement de 30 EPR2 d'ici 2065 concomitamment à la décroissance du parc actuel, et sur le déploiement de RNR de puissance à partir de 2095, pour atteindre un parc exclusivement constitué de RNR en 2165.

Deux scénarios (S1 et S2) incluent le MRREP et diffèrent sur le nombre d'EPR2 moxés avec des MOX-MR (combustibles MOX issus en partie de combustibles MOX usés) : dans le scénario S1, 7 EPR2 sont moxés à 50 % avec du MOX-MR et 5 EPR2 à 30 % avec du MOX ; dans le scénario S2, 15 EPR2 sont moxés à 50 % avec du MOX-MR. Ces scénarios sont comparés entre eux et avec le scénario de monorecyclage (S0). Ils montrent que la quantité de combustible usé en entreposage atteindrait un pic de 19 000 tML avant de décroître, contre 24 000 tML dans le cas du monorecyclage. Ils confirment aussi les résultats de précédents scénarios concernant les flux de matières et déchets et les économies en uranium naturel.

Par ailleurs, contrairement au scénario S0 pour lequel les capacités de traitement des MOX usés et de fabrication de MOX-RNR devraient avoir atteint l'échelle industrielle en 2090, les scénarios impliquant le MRREP (S1 et S2) nécessiteront une capacité de traitement des combustibles usés à teneur en Pu supérieure à celle des UOX usés dès la construction des nouvelles usines au milieu du siècle, embarquant des évolutions technologiques du point de vue des procédés (*a minima* amélioration, au mieux remplacement) et la prise en compte des enjeux de sûreté et de radioprotection. Au moment du déploiement des RNR, de nouveaux ateliers devront être construits pour fabriquer et retraiter spécifiquement les MOX-RNR qui se distinguent par une forte teneur en Pu.

La Commission constate que le CEA a mis au point une méthodologie et des outils de calcul performants pour l'étude de scénarios. Elle reconnaît que ces études sont indispensables pour estimer les besoins futurs (capacité des usines, capacités d'entreposage, disponibilité des ressources). Elle observe néanmoins que les hypothèses retenues pour ces scénarios sont volontaristes (construction de 30 EPR2 d'ici 2065, et obtention en temps voulu de la pleine capacité des usines de l'aval du cycle).

*La Commission recommande que, dans la mesure du possible, ces nouveaux scénarios soient accompagnés d'études de sensibilité à leurs paramètres d'entrée. Elle recommande par ailleurs d'étudier une hypothèse plus prudente, en particulier quant à la vitesse de déploiement du parc EPR2 et à la montée en cadence des nouvelles usines de l'aval du cycle.*

*De plus, il convient de préciser clairement dans les scénarios les possibilités de retraitement des MOX-RNR qui sont la clé de l'existence d'un parc de RNR, y compris dans les hypothèses d'accélération du déploiement de ce parc.*

24

Le CPN du 12 mars 2026 a notamment chargé EDF, Framatome, Orano et le CEA d'élaborer d'ici fin 2026 un programme de travail et une organisation industrielle pour atteindre la fermeture du cycle du combustible nucléaire dans la deuxième moitié du siècle.

La Commission s'interroge sur l'impact d'un rapprochement de l'objectif de fermeture du cycle sur les scénarios précédents. En particulier, le développement du MRREP comme étape transitoire vers les RNR présentera moins d'avantages dans l'hypothèse du déploiement industriel des RNR avant la fin du siècle.

*La Commission recommande, sur la base des premiers calendriers de faisabilité du programme « fermeture du cycle » lancé par le CPN, de requestionner la pertinence du MRREP. En effet il convient de pouvoir comparer les avantages de ce multirecyclage à ceux qu'apporterait un passage direct du monorecyclage en REP au multirecyclage en RNR si les usines du cycle actuelles étaient prolongées et l'objectif de fermeture du cycle avancé.*

### 3.2. LES USINES DE LA HAGUE 2

Dans l'hypothèse d'un cheminement vers un parc de RNR d'ici la fin du siècle, avec ou sans passage par le MRREP, les nouvelles usines devront être capables de traiter et fabriquer des combustibles ayant une teneur en Pu plus importante (MOX, MOX-MR, MOX-RNR usés).

Orano a conçu un schéma industriel modulaire et séquencé pour la conception de ses nouvelles usines de fabrication de MOX et de traitement des combustibles usés, capable *a priori* de s'adapter aux différents scénarios d'évolution du parc. Les schémas d'implantation et leurs différentes étapes

temporelles présentés par Orano, décrits dans le précédent rapport de la Commission (rapport 19) étaient : Melox 2 opérationnel en 2040 et le premier module de traitement à La Hague 2 vers 2045, sans sortir du périmètre du site de La Hague actuel. Ces dates étaient fixées dans l'hypothèse d'une non-prolongation des usines actuelles au-delà de 2040.

Les années 2026 et 2027 seront déterminantes pour dérouler le processus réglementaire du programme ADF, avec la réalisation des avant-projets sommaires (APS) des ateliers devant être opérationnels en 2040 (ateliers de déchargement et d'entreposage des combustibles - ADEC, avec le premier des trois bassins d'entreposage d'une capacité de 6 500 tML initiale chacun, nouvel atelier de fabrication du MOX, et atelier d'entreposage du plutonium), le démarrage des avant-projets détaillés (APD) de ces ateliers et l'instruction de leurs dossiers d'options de sûreté (DOS). Le Conseil de politique nucléaire (CPN) du 12 mars 2026 a confirmé la labellisation Grand chantier et la mobilisation des services de l'État pour mettre en œuvre des mesures d'accélération des procédures et de simplification. Cela devrait permettre en particulier d'anticiper les travaux « réversibles » de génie civil (excavations). Ces années seront aussi cruciales pour l'élaboration de l'esquisse des ateliers de l'usine de retraitement.

### 3.2.1. Melox 2

Les principales fonctions de l'usine de fabrication des MOX, Melox 2, ont été définies par Orano. Le procédé MIMAS voie humide déjà utilisé dans Melox sera reconduit. Hormis la fabrication et la mise en assemblage des aiguilles combustible MOX-RNR, toutes les fonctions existent déjà dans Melox. La capacité en MOX REP visée est de 170 tML/an, avec en plus une ligne pilote pour la fabrication de combustibles MOX-RNR pour une capacité de 10 tML/an et la possibilité d'une extension ultérieure pour monter les capacités en MOX REP à 255 tML/an. La nouvelle usine sera conçue pour que deux campagnes de fabrication puissent être conduites simultanément pour le combustible MOX REP.

25

### 3.2.2. Ateliers de retraitement

Les évolutions à venir (innovations technologiques, types de combustibles à traiter, augmentation des capacités, contraintes réglementaires, concertation) doivent être anticipées. Les améliorations (nouveaux procédés à embarquer ou à faire évoluer par la suite) doivent être définies.

La présentation faite par Orano à la Commission indique que l'élaboration de l'esquisse de la nouvelle usine s'appuie sur le retour d'expérience des usines actuelles. Elle prend en compte des dispositions pour la faire évoluer durant sa vie en veillant à faciliter la maintenance en exploitation, faciliter le remplacement des appareillages, et permettre l'implantation de technologies futures. L'usine vise à exploiter les progrès en automatisation, robotique et intelligence artificielle. Jusqu'à mi-2027, Orano se laisse la possibilité de faire émerger des options de conception innovantes, tout en évaluant ces options sur le plan technique et économique, dans le but de converger vers 2 ou 3 schémas d'usines avant le démarrage des études détaillées de l'usine de retraitement et le débat public.

Pour rappel, l'usine de La Hague actuelle permet de retraiter le combustible usé UOX, mais le traitement des combustibles MOX, bien que déjà réalisé en petite quantité, est limité par la quantité de Pu insoluble (créant un risque de criticité). Pour traiter les combustibles MOX usés, il faut tout d'abord augmenter l'acidité pour améliorer la cinétique de dissolution et allonger la durée de la dissolution, ce qui réduit les cadences, d'où le besoin d'un dissolvant à roue de plus grande capacité et d'augmenter le nombre de lignes de dissolution. Par ailleurs, la durée des campagnes de traitement doit être diminuée afin d'augmenter la fréquence de récupération des précipités contenant du Pu et la fréquence des rinçages. La voloxydation, qui consiste à oxyder l'ensemble du combustible après cisailage (voir rapport 18 de la Commission), est un nouveau procédé qui permettrait *a priori* d'accélérer la dissolution.

Concernant la séparation Pu/U avec le procédé Purex actuel, le ratio Pu/U en entrée des cycles d'extraction est limité pour des raisons de sûreté et de criticité ( $Pu/U < 2,19\%$  pour les MOX), ce qui oblige à diluer le Pu en traitant des mélanges MOX/UOX. Concernant la ligne de purification de Pu, le flux est multiplié par 6 lorsqu'on traite des MOX-REP, avec des cadences limitées par la capacité de certains équipements. Il faudra donc optimiser Purex dans les nouvelles usines, ou passer au nouveau procédé Pumas en cours de développement. Ce procédé serait plus performant que Purex du point de vue de la séparation (utilisation d'un monoamide plus sélectif que le TBP), plus compact, et moins coûteux (suppression d'un cycle de purification de l'U). Il permettrait une gestion simplifiée de la sûreté (suppression de l'étape redox avant le second cycle de purification) tout en supprimant les déchets phosphatés et en diminuant les rejets nitrés. La R&D concernant Pumas et sa montée en maturité technologique se poursuit de manière active (cf. § 3.2.3).

Dans tous les cas, l'isotopie du Pu des combustibles MOX usés engendrera une augmentation de la puissance thermique résiduelle et du débit de dose dont le dimensionnement de l'usine devra tenir compte.

L'augmentation de la teneur en actinides mineurs impactera la production des colis de déchets vitrifiés (CSD-V). Comme pour l'étape de dissolution, une dilution est envisagée en mélangeant des produits de fission (PF) et des actinides mineurs issus des MOX et des UOX usés afin de respecter la borne alpha maximale. De même, les coques issues de MOX et UOX usés seront mélangées pour diminuer les émissions alpha issues de ces déchets.

La Commission observe que le traitement des MOX usés avec le procédé Purex exige une étape de dilution liée au taux de Pu. Si le traitement des MOX REP est envisageable par ce procédé, il n'est pas applicable au traitement du MOX-RNR à l'échelle industrielle. Ce dernier nécessitera un nouveau procédé de traitement tel que Pumas.

### 3.2.3. Avancement de la R&D sur le procédé Pumas

26

Orano travaille étroitement avec le CEA pour faire monter en maturité technologique le procédé Pumas. La R&D s'articule autour de 3 axes (voir rapport 19 de la Commission) : l'axe 1 concerne l'acquisition de données de base pour la modélisation et la mise en œuvre du procédé, l'axe 2 la validation des performances du schéma de procédé et l'axe 3 l'aptitude du procédé à être industrialisé.

Concernant l'axe 1, les acquisitions se poursuivent, en particulier sur l'impact du diluant et des produits de dégradation du solvant. Pour l'axe 2, les expériences sur la chaîne blindée procédés (CBP) à Atalante ont débuté en 2025 pour la validation du schéma du cycle principal sur des solutions issues d'un combustible MOX usé et se poursuivent en 2026.

Concernant l'axe 3, l'étude de la dégradation du solvant par radiolyse et hydrolyse progresse avec l'identification des produits de dégradation et la comparaison des stabilités radiolytiques sous irradiation gamma et alpha. Des solutions de gestion des différents produits de dégradation sont établies ou en cours de qualification et doivent encore être extrapolées à l'échelle industrielle. L'impact des produits de dégradation qui ne pourraient être éliminés a été étudié et de nouvelles acquisitions sont en cours pour étudier l'effet des monoamides secondaires sur une baisse du facteur de séparation U/Pu. Par ailleurs, des essais d'endurance du procédé vis-à-vis de ces produits de dégradation sont en cours ou prévus sur la boucle MARCEL (module avancé de radiolyse dans les cycles d'extraction-lavage). Deux installations sont utilisées : MARCEL-G1 (radiolyse gamma, avec gestion du solvant optimisée) et les chaînes blindées C17 et CBP d'Atalante (en moyenne et haute activité avec solvant pré-dégradé).

Concernant la montée en maturité technologique de la synthèse du monoamide, les spécifications vis-à-vis de sa pureté ont été définies. Il reste à étudier comment assurer l'approvisionnement des matières premières et à optimiser son coût de synthèse. Concernant les appareils nécessaires à la mise en œuvre industrielle de Pumas, il faut encore consolider l'utilisation de colonnes pulsées en lien avec la viscosité plus élevée du solvant utilisé (comparé à celui utilisé dans Purex). Les essais hydrodynamiques mono- et diphasiques avec des colonnes de diamètre 25 mm (et garnissage

disque-couronne) en régime laminaire sont terminés et les essais avec des diamètres de 100 mm en régime turbulent devraient débuter en 2026 et 2027. Les données ont en particulier permis de valider les codes de calcul aux différentes échelles (CFD et CoHySE) et le chaînage entre eux, nécessaire pour l'extrapolation à l'échelle industrielle. Les essais avec transfert de matière sont prévus dès 2027 sur les colonnes de 25 mm de diamètre et en 2030 sur le pilote Orano à une échelle proche de 1. Pour l'opération de concentration du Pu plus particulièrement, le choix devra être fait courant 2026 entre la colonne pulsée et l'extracteur centrifuge de type ECRAN, lequel permettrait de gagner en place et de limiter la dégradation par hydrolyse. Il faut valider ses performances. Les essais effectués jusqu'ici sont encourageants ; d'autres essais sont prévus, en particulier sur un extracteur multi-étages en construction en 2027 (et plus tard sur le pilote Orano).

En conclusion, le procédé Pumas présente, comparé au procédé Purex, de nombreux avantages. Il reste encore à diminuer le coût de production de la molécule de monoamide en liaison avec les fournisseurs et, surtout, à amener le procédé à sa maturité industrielle dans un temps limité. À cette fin, un pilote représentatif de l'échelle industrielle est à l'étude : l'APS du pilote pour le cycle U/Pu se termine et l'esquisse du pilote pour le cycle Pu démarre. L'étape intermédiaire à l'échelle ½ a été abandonnée en raison de la nécessité de disposer d'un pilote opérationnel début 2030 pour valider le procédé avant le début de l'APS de la nouvelle usine début 2031. Orano cherche encore à optimiser le planning de construction du pilote à une échelle optimale pour permettre la validation industrielle du procédé Pumas.

La commission note que la qualification industrielle du procédé Pumas avance bien et que l'APS/APD d'un pilote à une échelle optimale devrait bientôt aboutir.

### 3.2.4. Conclusion et recommandations à propos des études de « l'Aval du futur »

*La Commission recommande que l'objectif du traitement des MOX-RNR soit pris en compte à l'échelle industrielle dès la conception des prochaines usines. En effet, il ne faut pas que le calendrier de déploiement des RNR soit dès l'origine contraint par la capacité de traitement de ces usines. Ces aspects doivent être pris en considération dans les études sur la fermeture du cycle lancées par le CPN de mars 2026.*

*Dans ce contexte, le développement industriel du procédé Pumas est indispensable. La Commission souligne l'intérêt que présenterait un prolongement des usines actuelles en permettant de relâcher la pression temporelle sur l'intégration de ce procédé dans les nouvelles usines.*

*Par ailleurs, la Commission demande que lui soient présentés les nouveaux éléments de R&D et de montée en TRL de procédés dont les nouvelles usines pourraient aussi bénéficier, comme par exemple la voloxydation. La Commission recommande que soit étudiée la possibilité d'intégrer certains de ces procédés postérieurement à la mise en service des nouvelles usines, en tirant parti de leur conception modulaire.*

### 3.3. MOYENS NÉCESSAIRES À LA R&D POUR LA FERMETURE DU CYCLE

Au vu du rôle que joue le nucléaire dans le mix énergétique, le CPN de mars 2026 a décidé l'élaboration qu'un programme visant la fermeture du cycle et incluant le développement d'une filière de réacteurs industriels à neutrons rapides. Ce programme devra être soutenu dans la durée et permettre le développement d'une filière industrielle ne dépendant plus d'importations d'uranium naturel.

La réalisation de ce programme nécessitera des travaux de R&D à long terme qui ne pourront être réalisés qu'en s'appuyant sur un certain nombre d'infrastructures spécifiques.

*La Commission recommande que les besoins associés au programme de fermeture du cycle soient consolidés et qu'une stratégie de sécurisation des accès aux installations indispensables en France ou dans des pays affinitaires pour mener ce programme soit élaborée. En particulier, la Commission recommande que la direction du programme « Fermeture du cycle » instruisse la question des infrastructures de recherche indispensables, notamment un outil d'irradiation en spectre rapide et un réacteur pilote, pour mener à bien ce programme.*

## CHAPITRE 4. STOCKAGE DES DÉCHETS HA ET MAVL : LE PROJET CIGÉO

### 4.1. RAPPORT DE LA COMMISSION SUR LE DOSSIER DE DAC : CONCLUSION GÉNÉRALE

Comme la Commission l'a rappelé dans son rapport n°15 de juin 2021, un entreposage de très longue durée ne peut pas constituer une alternative au stockage profond.

La stratégie française de gestion des déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue prévoit leur stockage géologique en application du principe énoncé à l'article L542-1-2 du Code de l'environnement : « Après entreposage, les déchets radioactifs ultimes ne pouvant pour des raisons de sûreté nucléaire ou de radioprotection être stockés en surface ou en faible profondeur font l'objet d'un stockage en couche géologique profonde. »

L'Andra a déposé en janvier 2023 une demande d'autorisation de création d'un tel stockage dénommé Cigéo situé sur les territoires de la Meuse et de la Haute-Marne. Conformément à l'article 1<sup>er</sup> de la loi n° 2016-1015 du 25 juillet 2016, codifié à l'article L542-10-1 du Code de l'environnement, la demande d'autorisation de création de Cigéo (DAC) donne lieu à un rapport de la Commission nationale d'évaluation (CNE), qui est joint à l'avis de l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR) et au compte-rendu des débats publics de 2005 et de 2013 organisés par la Commission nationale du débat public (CNDP). Ces documents sont examinés par l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST).

La Commission a produit le rapport demandé et l'a présenté à l'OPECST le 4 décembre 2025. La conclusion générale de ce rapport est la suivante :

« La Commission considère que les recherches conduites par l'Andra, exposées dans le dossier de DAC, ont permis d'élaborer un concept fiable pour un stockage géologique profond de déchets radioactifs à vie longue. Le choix du site et l'ensemble des dispositions constructives sont de nature à isoler les déchets des phénomènes de surface et des actions humaines, et à limiter le transfert des radionucléides et des substances toxiques chimiques contenus dans les déchets jusqu'à la biosphère, en réponse aux deux principales fonctions de sûreté assignées à Cigéo ».

29

### 4.2. PRINCIPALES RECOMMANDATIONS DE LA COMMISSION

Dans son rapport sur le dossier de DAC, la Commission a émis un certain nombre de recommandations. La liste complète de ces recommandations est rappelée en annexe VI au présent rapport. Les principales recommandations concernent la phase industrielle pilote (Phipil) et la poursuite, dans la durée, de la R&D relative au stockage profond des déchets radioactifs.

#### 4.2.1. Concernant la phase industrielle pilote

La définition de la Phipil est importante dans le processus d'autorisation de création de Cigéo. Même si tous les détails de la procédure ne peuvent pas être fixés à l'avance, la Commission considère qu'il est très souhaitable que les modalités du déroulement de la Phipil et de l'évaluation de ses résultats soient définies au moins dans leurs grandes lignes avant le début des opérations concrètes. La Commission estime que les principaux critères pertinents pour apprécier la réussite de la phase industrielle pilote sont les suivants :

- Pour la période de construction de l'installation, les critères principaux sont la réussite des essais de qualification avec des colis inactifs, y compris les essais de récupérabilité, et

l'obtention de l'autorisation de mise en service limitée à la phase industrielle pilote, délivrée par l'ASNR.

- Pour la période de début d'exploitation, les critères principaux sont la réussite des essais avec des colis actifs, la validation en vraie grandeur des matériels, des procédures et de la qualification des personnels et l'atteinte d'une cadence de mise en stockage stabilisée permettant de stocker l'inventaire de référence au cours de la durée de vie prévue de l'installation.
- Par ailleurs, au cours de la Phipil, un fonctionnement satisfaisant de la gouvernance du stockage devra être atteint. L'Andra a proposé les modalités d'association et d'information des parties prenantes. La Commission rappelle qu'il est important que l'exploitant conserve la pleine responsabilité de la mise en œuvre opérationnelle du projet.

La Commission observe que la plus grande partie de ces critères figurent dans les propositions de l'Andra. Toutefois la démonstration de la cadence atteignable par l'installation n'y figure pas explicitement. La Commission souligne l'importance de la démonstration de la cadence atteignable en régime stabilisé. En effet, cette cadence conditionne la durée d'exploitation qui sera nécessaire pour stocker l'inventaire de déchets prévu. Cette durée devra être compatible avec la durée de vie des infrastructures et des équipements. La Commission estime donc nécessaire que la cadence atteignable en régime stabilisé soit démontrée pendant la phase industrielle pilote.

C'est pourquoi la Commission a émis dans son rapport sur le dossier de DAC les recommandations suivantes :

*« La Commission recommande que la procédure de fin de Phipil, incluant les critères de réussite et leur mode d'évaluation, soit fixée dans le décret d'autorisation de création. La Commission estime que les critères de réussite de la Phipil proposés par l'Andra sont pertinents. Elle recommande toutefois d'y ajouter la démonstration de la cadence atteignable par l'installation. »*

*La Commission recommande que le nombre de colis stockés pendant la phase industrielle pilote et la durée de celle-ci soient suffisants pour apprécier la capacité de l'installation à absorber des aléas (perturbations de livraison, pannes de l'installation, etc.) et en particulier démontrer que la capacité d'entreposage tampon sur site est suffisante. Compte tenu de la durée inhérente aux procédures administratives qui seront mises en œuvre après la parution du rapport de fin de Phipil, la Commission recommande de ne pas limiter le nombre de colis qui seront stockés au titre de la première autorisation de mise en service.*

*L'Andra propose de ne pas interrompre les opérations de mise en stockage pendant l'instruction du rapport de fin de Phipil. La Commission recommande que cette proposition soit acceptée afin que l'activité ne soit pas mise en sommeil pendant un laps de temps risquant d'être préjudiciable au maintien de la capacité opérationnelle de l'installation. »*

#### 4.2.2. Concernant la poursuite de la R&D

L'ensemble des travaux décrits dans le dossier de DAC valide scientifiquement la conception de l'installation. La configuration technique du stockage sera, pour autant, appelée à évoluer au cours de la durée d'ordre séculaire qui séparera le décret d'autorisation de création de la loi autorisant la fermeture de l'installation.

*« La Commission recommande fortement de maintenir une capacité de R&D de haut niveau à l'Andra sur le stockage géologique profond, incluant des moyens d'expérimentation in situ, bien au-delà de la mise en service du stockage et de la Phipil. »*

Il est en effet indispensable que toutes les évolutions de l'installation de stockage Cigéo, qu'elles soient voulues ou subies, soient instruites avec rigueur.

Postérieurement à la parution de son rapport sur la demande d'autorisation de création, la Commission a pris connaissance de l'arrêté du 30 mars 2026 relatif aux coûts afférents à la mise en œuvre de la gestion à long terme des déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue par stockage en couche géologique profonde (projet Cigéo), qui fixe le coût industriel de référence du projet à 33,36 Md€ aux conditions économiques de janvier 2025.

La Commission observe que ce coût de référence est fondé sur le dossier de chiffrage publié par l'Andra en mai 2025. Ce dossier comporte un document spécifique consacré aux coûts de R&D (pièce 17), lequel indique explicitement qu'aucun coût de R&D n'est pris en compte au-delà de 2055. Or, cette date, proche de la date prévisionnelle de mise en stockage du premier colis actif, est probablement antérieure à la fin de la Phipil et *a fortiori* à la construction du quartier HA. La Commission estime que l'évaluation du besoin de R&D est donc manifestement insuffisante.

*La Commission recommande que l'Andra réalise une évaluation des besoins en R&D couvrant toute la période d'exploitation de l'installation Cigéo et demande que les résultats de ce travail lui soient présentés.*

#### 4.3. PRÉCISIONS COMPLÉMENTAIRES SUR QUELQUES POINTS DU RAPPORT

La Commission a présenté son rapport sur la DAC de Cigéo à plusieurs instances parmi lesquelles l'OPECST, la DGEC, l'ASNR et le CLIS de Bure. À l'occasion de ces présentations, un certain nombre de sujets ont été abordés, qui incitent la Commission à préciser son analyse sur certains d'entre eux.

##### 4.3.1. Au sujet de la maturité du dossier d'autorisation de création de Cigéo

Certaines parties prenantes ont émis des inquiétudes quant au niveau de maturité du dossier présenté par l'Andra compte tenu du nombre de demandes complémentaires émises par l'ASNR et par ailleurs de la recommandation de la Commission de maintenir une capacité de R&D de haut niveau sur le sujet.

La Commission considère, comme elle l'a exprimé dans sa conclusion générale citée *supra*, que la maturité du dossier est suffisante, au plan scientifique, pour permettre la délivrance de l'autorisation de création de l'installation. Les recommandations émises par la Commission ne remettent pas en

cause la démonstration de la faisabilité du stockage proposé par l'Andra. La poursuite de la R&D est cependant jugée indispensable pour permettre d'instruire les évolutions que connaîtra inévitablement l'installation compte tenu de la durée séculaire du projet, incluant l'introduction d'innovations.

S'agissant des incertitudes qui subsistent à ce stade du projet, la démarche appliquée par l'Andra, et que la Commission a évaluée et validée, consiste à utiliser des conservatismes qui garantissent que les conséquences sur la santé humaine et l'environnement des doses efficaces radiologiques calculées compte tenu des performances de Cigéo sont assurément majorées.

La Commission, enfin, s'est prononcée sur l'ensemble des fondements scientifiques de l'analyse de sûreté et non sur la complétude de l'analyse elle-même, qui est de la compétence de l'ASNR. Il est donc normal que l'ASNR ait émis nettement plus de demandes que la Commission. Ces demandes ne remettent pas en cause les conclusions de la Commission quant à la maturité du dossier au plan scientifique.

#### **4.3.2. Au sujet de la prise en compte par l'Andra des recherches conduites à l'étranger et de leurs résultats**

Certaines parties prenantes ont estimé que l'Andra ne tient pas suffisamment compte des recherches conduites au plan international et de leurs résultats. La Commission ne partage pas cette appréciation. Au contraire, la Commission considère que l'Andra tient pleinement compte des résultats des programmes de recherches internationaux dans lesquels elle est d'ailleurs très active.

Les bases scientifiques sur lesquelles s'appuie l'Andra ont été en grande partie développées à l'échelle internationale, à partir des années 1980, avec la participation des principaux organismes chargés de la gestion de déchets nucléaires dans le monde. On peut à cet égard citer de grands programmes internationaux comme STRIPA et FUNMIG, qui traitaient de la migration des radionucléides, ou DECOVALEX sur la modélisation thermo-hydro-mécano-chimique. Ces projets étaient conduits sous l'égide de l'AEN ou de l'AIEA, ou simplement coordonnés de manière classique par une organisation académique. Par exemple, l'Andra coordonne actuellement le programme de recherche au niveau européen EURAD 2, après avoir mené à bien EURAD 1.

Il faut souligner que les résultats de la recherche doivent être appliqués dans le contexte particulier de chaque projet de stockage. Par exemple, le concept suédois a retenu un conteneur en cuivre pour encapsuler les combustibles usés. Ce conteneur en cuivre est nécessaire car l'installation de stockage suédoise sera placée dans une formation géologique granitique, qui comporte inévitablement des fissures qui permettent une circulation d'eau. Il serait inutile pour le concept français car, dans la formation argileuse où sera implanté Cigéo, le mouvement de l'eau est négligeable.

#### **4.3.3. Au sujet des effets du changement climatique, à savoir s'ils sont correctement pris en compte dans Cigéo.**

Dans son rapport sur la demande d'autorisation de création, la Commission a écrit :

« La Commission reconnaît la pertinence de la méthodologie adoptée par l'Andra pour l'évaluation et la prise en compte de l'impact des variations climatiques, qu'elles soient à court ou à long terme, sur le projet Cigéo. Cette approche s'appuie sur la simulation de deux scénarios d'évolution du climat, permettant ainsi de couvrir l'ensemble de la gamme des conditions climatiques susceptibles d'affecter la région de Meuse Haute-Marne au cours du prochain million d'années. »

La Commission observe que les travaux de l'Andra sont cohérents avec les résultats des programmes internationaux sur le climat.

L'impact du changement climatique est envisagé à deux périodes de temps : le court terme et le long terme. À court terme sont concernées principalement les installations de surface, qui doivent être conçues et dimensionnées pour résister à des aléas météorologiques dont l'intensité et la fréquence sont susceptibles d'augmenter en réponse au réchauffement global (ex : tempêtes, tornades, sécheresses). Les dispositions de conception sont, par exemple pour le Génie Civil, prises en compte par application des Eurocodes. À plus long terme est concernée la sûreté après fermeture. Le changement climatique aura un impact sur les vitesses d'érosion des surfaces continentales sur le prochain million d'années. Le modèle d'évolution géomorphologique étudié par l'Andra prend en compte à la fois les effets tectoniques et climatiques, suivant deux scénarios d'évolution climatique, dont un scénario anthropique qui intègre l'effet sur le cycle du carbone de la consommation de la totalité des ressources fossiles au cours des 325 prochaines années. Ces scénarios révèlent un impact sur le fonctionnement hydraulique des aquifères encaissant le COx qui n'affecte en aucune façon sa capacité de confinement, le transfert de radionucléides demeurant essentiellement diffusif.

#### **4.3.4. Au sujet de la « marge temporelle » entre le temps de décroissance de la radioactivité des radionucléides les plus mobiles et leur temps de transfert depuis le COx jusqu'à la biosphère.**

Les éléments les plus mobiles attendus par transfert diffusif aux limites du COx et jusqu'à la biosphère, à l'échéance de 400 000 ans environ selon les calculs de l'Andra, sont les ions chlorures, sélénates/sélénites et iodures. Les radionucléides associés :  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{79}\text{Se}$  et  $^{129}\text{I}$  sont des éléments à vie longue, de période respective égale à 301 000 ans, 327 000 ans, et 15,7 millions d'années. Sur cette base, on peut donc calculer qu'à l'échéance de l'arrivée à la biosphère, la décroissance radioactive du terme source de l'iode, du chlore et du sélénium sera faible, et qu'il n'est pas envisageable de considérer qu'il puisse y avoir une compétition entre décroissance radioactive et migration des radioéléments à vie longue. Le stockage n'a pas pour objet de confiner les radionucléides jusqu'à leur disparition par décroissance mais de limiter leur transfert jusqu'à la biosphère de telle sorte que leur concentration reste suffisamment faible pour que la dose efficace à l'individu critique reste dans la limite prescrite par la réglementation sur les évaluations de sûreté.

#### **4.3.5. Au sujet de l'étude par la Commission de la solubilité du sélénium**

La Commission s'est intéressée au sélénium, à sa solubilité (c'est-à-dire la concentration maximale que peut avoir l'élément en solution) et aussi à son comportement au sein des différentes barrières de confinement. Le  $^{79}\text{Se}$  fait partie avec le  $^{36}\text{Cl}$  et l'iode  $^{129}\text{I}$  des trois radionucléides sous la forme anionique qui sont attendus aux limites du COx à l'échéance de 400 000 ans. Les ions iodure ( $\text{I}^-$ ) et chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) sont très solubles et ont un comportement chimique assez simple en milieu aqueux, indépendant du pH et du potentiel d'oxydo-réduction (redox). En conséquence, ils vont migrer par diffusion dans le COx. La forme chimique (c'est-à-dire, la spéciation) sous laquelle le sélénium se trouve en milieu aqueux est plus complexe, car elle dépend à la fois du pH et du potentiel redox. Dans les déchets vitrifiés, le sélénium est sous une forme oxydée, donc ce sont les ions sélénates ( $\text{SeO}_4^{2-}$ ) ou sélénites ( $\text{SeO}_3^{2-}$ ) à l'état d'oxydation +VI ou +IV qui seront majoritaires une fois les matrices altérées et le sélénium mis en solution. Lorsque les ions arriveront au contact des eaux du COx, qui ont un pH voisin de 7 et sont réductrices, il est attendu que la spéciation du sélénium évolue vers l'état redox négatif -I ou -II, sous forme d'ion séléniure (séléniure d'hydrogène ( $\text{HSe}^-$ ) par exemple). L'ion séléniure, en présence du fer issu de la corrosion des aciers, va s'immobiliser majoritairement sous la forme d'un précipité solide  $\text{FeSe}_{2(s)}$  ; il est donc très peu soluble dans ces conditions avec des concentrations en solution extrêmement faibles, inférieures à  $10^{-9}$  mol/l. Cependant, le changement d'état redox peut être bloqué ou ralenti par des phénomènes cinétiques, comme le montre l'observation de sélénates dans des eaux réductrices alors qu'ils ne sont pas stables thermodynamiquement. Les sélénates sont plus solubles que les séléniures, leur concentration dans les eaux peut donc être plus élevée. Ce sont des anions qui ne vont pas avoir tendance à s'immobiliser mais à migrer par diffusion au travers des différentes barrières de confinement. Ces phénomènes sont bien pris en compte, de manière conservative, dans les modèles de transfert.

#### 4.3.6. Au sujet de la structure observée sous l'emplacement envisagé du quartier HA, pour laquelle la Commission affirme qu'elle n'a pas d'incidence sur les propriétés du COx

Une structure géologique particulière a été observée par méthode géophysique lors de l'interprétation du bloc sismique 3D sous le quartier HA. Elle affecte les couches du Trias, dont le dépôt s'est fait entre -250 et -200 millions d'années. Cela est visible en géophysique sur le réflecteur du Trias supérieur (dolomie de Beaumont). Les connaissances géologiques (issues de forages) du niveau des marnes grises à sel et anhydrite du Trias supérieur (Keuper moyen, entre -220 et -210 millions d'années) dans la région montrent qu'il y a eu des périodes de dissolution au cours du dépôt des faisceaux salifères, ce qui a engendré une subsidence par compaction différentielle des dépôts de couverture du sel qui avaient de ce fait une épaisseur variable. C'est une des explications à la structure observée. Une structure faillée (de faible rejet, environ 20 m) pourrait aussi expliquer le signal géophysique dans le Trias. Il existe donc plusieurs interprétations possibles de la structure observée sous le COx, mais dans tous les cas, elle n'affecte pas la géométrie des réflecteurs et donc des dépôts sus-jacents à celui du Trias supérieur. Les principes de superposition et de recoupement utilisés en chronologie relative montrent donc que, quel que soit le phénomène qui a affecté la formation du Trias supérieur, celui-ci est postérieur aux dépôts du Trias, mais antérieur aux dépôts du Lias et de tous les autres dépôts qui se sont succédé (dont le Callovo-Oxfordien âgé de 165 millions d'années environ). Il n'a donc pas d'incidence sur les propriétés du COx.

#### 4.3.7. Au sujet de la flexure de la couche du COx

La notion de flexure de la couche du COx est apparue à l'issue des traitements et de l'interprétation des données sismiques 3D réalisés lors de l'élaboration du dossier d'options de sûreté (DOS) de 2011. À cette époque, le traitement n'incluait pas les corrections statiques, et une anomalie au niveau des isochrones avait été observée dans le COx et interprétée comme une flexure (pli) d'une trentaine de mètres d'amplitude verticale et d'extension kilométrique. Elle était également perceptible sur les autres réflecteurs situés au-dessus du COx, ce qui n'était pas cohérent avec une explication géologique structurale ou sédimentaire qui aurait affecté la pile sédimentaire à partir du dépôt du Callovo-Oxfordien. L'Andra n'avait pas jugé utile de revoir rapidement le traitement des données. Les corrections statiques complètes ont été réalisées en 2018 et ont nettement amélioré la représentativité des isochrones. La comparaison entre les cartes de temps corrigées et non corrigées, appelée carte des statiques primaires, a mis en évidence *a posteriori* les formations de surface responsables de cet « effet de flexure », telles que les vallées de l'Orge et de l'Ormançon, et la présence locale de lentilles de sable d'âge Valanginien (observées sur les données des sondages carottés réalisés en même temps que la sismique réfraction 2D). Les connaissances acquises et les analyses menées par l'Andra depuis le DOS de Cigéo permettent d'exclure toute discontinuité de type flexure au sein de la ZIRA.

#### 4.3.8. Au sujet du risque de criticité

La Commission a été interrogée sur son appréciation de la gestion par l'Andra du risque de criticité dans Cigéo. Cette question est traitée dans la version préliminaire du rapport de sûreté dont l'évaluation ressortit à l'ASNR et non à la Commission. C'est pourquoi ce point n'a pas été exposé en détail dans le rapport de la Commission sur le dossier de DAC.

Le risque d'une incursion de criticité est étudié par l'Andra d'une part pendant la phase d'exploitation et d'autre part après fermeture :

- Pendant l'exploitation, la géométrie et l'intégrité des colis est conservée et le risque de criticité est géré par la quantité de radionucléides ( $^{235}\text{U}$  et  $^{239}\text{Pu}$ ) autorisée dans chaque colis par les spécifications d'acceptation et par la topographie de la disposition des colis dans les alvéoles.

- Après fermeture, il faut traiter la situation qui prévaut après la dégradation complète des colis et le relâchement total des radionucléides. Plusieurs configurations sont envisagées dont celle d'une accumulation de matière fissile dans des zones aux conditions physico-chimiques favorables. L'Andra a conduit les calculs en adoptant plusieurs hypothèses fortement conservatives : le  $^{239}\text{Pu}$  étant plus fissile que l' $^{235}\text{U}$ , l'Andra utilise une notion « d'équivalent Pu » pour convertir toute la matière fissile en  $^{239}\text{Pu}$  ; elle postule par ailleurs la présence d'eau ou de matières hydrogénées mais l'absence de poisons capteurs de neutrons lents comme certains produits de fission. La conclusion de l'analyse est que, compte tenu des quantités de matière fissile acceptées dans les colis, il est impossible d'accumuler en quelque endroit de Cigéo les quantités nécessaires au déclenchement d'une incursion de criticité.

La Commission estime que compte tenu des conservatismes retenus pour les calculs, l'Andra a démontré que l'exclusion du risque de criticité est justifiée.



## CHAPITRE 5. ASSAINISSEMENT ET DÉMANTÈLEMENT (A&D)

### 5.1. OPÉRATION D'ASSAINISSEMENT-DÉMANTÈLEMENT CHEZ EDF, ORANO ET AU CEA

Les opérations d'assainissement et de démantèlement (A&D) réalisées par les trois exploitants majeurs de la filière nucléaire que sont EDF, ORANO et le CEA se différencient par le type d'installations concernées, la stratégie de gestion et le mode de financement.

#### 5.1.1. EDF

EDF a en charge la gestion du combustible usé et des déchets radioactifs produits par les centrales en exploitation, mais aussi l'A&D des centrales nucléaires lorsqu'elles sont définitivement arrêtées. Au sein d'EDF, la direction des projets déconstruction et déchets (DP2D) est dédiée à ces opérations. Elle s'appuie sur une filiale, Cyclife, spécialisée dans les démantèlements nucléaires et la gestion des déchets.

#### 5.1.2. Orano

Orano a en charge l'A&D des installations minières et des installations industrielles de l'amont et de l'aval du cycle. Ces installations sont souvent situées sur des sites encore en exploitation. La destination industrielle des emprises sur lesquelles sont réalisées les opérations d'assainissement influe sur l'ampleur des opérations (certains bâtiments assainis peuvent par exemple être réutilisés et non déconstruits) mais aussi sur leur complexité en raison de la coactivité avec d'autres activités industrielles (à La Hague notamment). Les projets d'A&D bénéficient des actions conduites récemment par Orano (plan Boost transversal au niveau du groupe destiné à rendre l'exécution des projets plus robuste) pour améliorer les modalités du management des projets. Orano estime que les projets axés sur la gestion de la fin de cycle du combustible ont désormais atteint la phase de maturité.

#### 5.1.3. Le CEA

Le CEA a en charge l'A&D des installations nucléaires de recherche, tant civiles que de défense. Implantées sur plusieurs sites géographiques, ces installations sont extrêmement variées quant à leur taille, leur âge, leur technologie, leur statut (INB ou ICPE) et génèrent de ce fait des déchets tout aussi divers, ce qui complique la gestion des activités. De plus, pour quelques installations historiques, s'ajoutent des incertitudes sur leur état initial avant démantèlement. Sur certains sites, ces activités A&D à différents stades d'avancement se superposent à l'exploitation d'installations et à des travaux de jouvence. Le CEA doit donc adapter sa stratégie au cas par cas pour traiter des situations complexes uniques, et rechercher pour chacune une solution économiquement viable. L'organisation des activités A&D au CEA repose sur une maîtrise d'ouvrage interne, rattachée à l'administratrice générale, qui s'appuie sur une entité dédiée de la direction des énergies.

## 5.2. STRATÉGIES ET ACTIVITÉS D'ASSAINISSEMENT ET DÉMANTÈLEMENT

### 5.2.1. EDF

La stratégie d'EDF est de développer des méthodologies et technologies standardisées d'A&D pour le futur démantèlement de séries de réacteurs de même conception. EDF a 11 réacteurs en cours de démantèlement. Ils relèvent de quatre technologies différentes : réacteurs graphite-gaz UNGG, réacteur à eau lourde, réacteurs à eau pressurisée (REP) et réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na). Cela implique le développement de méthodologies adaptées. À titre d'exemple, un réacteur UNGG est un cas particulier très complexe pour lequel des procédures originales doivent être établies. Entre autres, il nécessite l'évacuation de vingt fois plus de matériaux qu'un REP. Afin d'éprouver et de valider les méthodes proposées, un hall d'essais démonstrateur industriel a été construit près de la centrale de Chinon.

Le premier REP français démantelé est celui de Chooz A, pour lequel les opérations sont très avancées et permettent de tirer des enseignements pour la déconstruction future du parc actuel, entièrement constitué de REP. EDF espère dégager des optimisations en exploitant l'effet d'échelle permis par un parc homogène. Le démantèlement des deux réacteurs de la centrale de Fessenheim, pour lequel EDF vient d'obtenir le décret, constituera la tête de série du démantèlement de ce parc. La durée moyenne de démantèlement d'un REP devrait être d'environ 15 ans.

### 5.2.2. Orano

La stratégie d'A&D d'Orano vise à réaliser les démantèlements complets sur une période aussi réduite que possible. Les opérations de reprise et conditionnement des déchets (RCD) sont priorisées, en accord avec l'ASNR, selon le principe de réduction du terme source mobilisable (TSM) et de maîtrise d'éventuelles pollutions.

La destination des terrains (voire des bâtiments) influe beaucoup sur la nature et l'ampleur des travaux d'assainissement. Les surfaces dégagées par les démantèlements d'Orano restent majoritairement destinées à un usage industriel dans la filière nucléaire, ce qui n'oblige pas nécessairement à un niveau d'assainissement aussi poussé que si les terrains étaient destinés à un usage public.

Une méthodologie générale d'assainissement des sols et structures a ainsi été développée. L'assainissement complet est d'abord étudié. S'il ne peut techniquement être mis en œuvre, des scénarios d'assainissement proportionnés aux enjeux sont proposés à l'ASNR avec leurs justifications. En attendant leur réutilisation, les sites assainis sont placés sous surveillance. Ces opérations s'inscrivent dans le contexte du programme « Aval du Futur » (ADF), pour lequel l'accélération des renouvellements d'installations et la création de nouveaux ateliers nécessitent une gestion rigoureuse du foncier.

La réduction du volume et de la toxicité des déchets dès leur production constitue un autre axe de la stratégie A&D d'Orano. Le recyclage des matériaux est privilégié si la rentabilité est démontrée et si la réglementation le permet.

Pour les déchets non éligibles à la filière d'évacuation des terres conventionnelles, des solutions particulières sont élaborées. Ainsi, un bâtiment de cimentation est construit pour traiter les déchets de faible granulométrie. Leur colisage est en cours de qualification par l'Andra.

Pour améliorer la communication avec l'ASNR sur ces projets, un outil de pilotage dynamique a été mis en place. Il offre une vue d'ensemble des différents lots de travaux et met en évidence les étapes intermédiaires et les livrables d'une période donnée. Cela conduit à la production d'un calendrier directeur détaillé sur cinq ans, assorti de jalons engageants. Ce calendrier glissant est remis à jour annuellement. Cet outil est également utilisé pour lutter contre la perte de motivation

observée chez les salariés en raison de la durée très longue des projets. L'outil de pilotage fournit des objectifs à un horizon plus court.

### 5.2.3. Le CEA

La stratégie d'A&D du CEA est d'entreposer le plus rapidement possible le TSM dans des conditions satisfaisantes de sûreté, conformément aux recommandations des autorités de sûreté, quitte à reporter le démantèlement et l'assainissement complets d'installations dès lors que la majeure partie du TSM qu'elles contiennent a été évacué. Les phases d'études et de réalisation sont découplées afin d'assurer plus de souplesse dans la gestion des opérations.

Pour définir les priorités des activités du CEA en matière d'A&D, une feuille de route et un calendrier de programmation des opérations ont été remis en 2016 aux autorités de sûreté ASN et ASND. Cette programmation a été acceptée en 2021.

L'ASNR a demandé au CEA, pour fin 2026, une mise à jour du dossier de stratégie pour les 15 prochaines années. L'ASNR demande, entre autres, un retour d'expérience technique, opérationnel et budgétaire des six dernières années, incluant les avancées réalisées et les difficultés rencontrées, dont le respect des calendriers et les difficultés de gestion contractuelle. L'ASNR demande également une mise à jour des projets, notamment de leur calendrier, pour chaque installation. La mise à jour doit de plus présenter une analyse de l'adéquation des installations et équipements support aux besoins et apprécier, pour les combustibles usés, les effluents et les matières, la robustesse de leur gestion et l'adéquation des moyens alloués.

Le CEA s'est de plus donné des priorités transverses comme le renforcement organisationnel, la caractérisation des sols pollués en attente d'évacuation, la construction d'installations de traitement et d'entreposage, ou le développement de solutions de transport et de caractérisation radiochimique.

En 2026, l'essentiel des TSM directement évacuables a été traité, mais cela représente moins de 10 % du TSM global présent en 2017 dans les installations à démanteler ; il reste à réaliser la mise en sûreté des TSM qui ne sont pas encore entreposables faute d'exutoires. Cette action va nécessiter d'importants investissements financiers à prévoir sur la prochaine décennie. La baisse réellement significative du TSM global est attendue à partir de 2040 lorsque les nouvelles installations seront opérationnelles.

La Commission souligne que les informations sur la programmation à moyen et long terme qui ont été présentées cette année par le CEA répondent de manière satisfaisante à la demande qu'elle avait formulée.

### 5.2.4. Synthèse

La Commission constate que les enjeux et les difficultés pour les acteurs en matière d'assainissement et de démantèlement diffèrent. EDF cherche à développer des procédures standardisées pour le démantèlement des centrales actuellement en service en tirant parti au maximum des effets d'échelle d'un parc homogène. Orano cherche à optimiser la gestion de son patrimoine foncier, dans la perspective de la réalisation des usines de « l'Aval du futur ». Le CEA doit gérer l'assainissement et le démantèlement d'installations très diverses, souvent anciennes et dont l'état initial avant démantèlement est parfois imparfaitement connu.

L'objectif général reste cependant commun, à savoir capitaliser des connaissances et du retour d'expérience, développer des technologies, tester et qualifier les solutions techniques.

La Commission souligne l'importance de la prise en compte des contraintes d'A&D dès la phase de conception des nouvelles installations sur la base du retour d'expérience des acteurs, afin de simplifier les opérations et d'assurer l'adéquation des exutoires.

Dans son rapport n° 19, la Commission avait recommandé que la stratégie à court et moyen terme du CEA pour l'A&D [...] soit complétée par une planification à long terme faisant apparaître le calendrier envisagé pour le démantèlement complet des installations. En réponse, le CEA a présenté à la Commission une planification à 20 ans.

*La Commission recommande que le CEA poursuive sa réflexion sur la planification des activités d'A&D en tenant compte de la capacité à réaliser effectivement les opérations compte tenu des moyens techniques, humains et financiers mobilisables.*

### 5.3. FINANCEMENT DES OPÉRATIONS D'A&D

En tant qu'exploitants, conformément à la loi, EDF et Orano doivent provisionner les coûts des opérations A&D sous forme d'actifs dédiés. La situation au CEA est différente, ce qui influe notablement sur la programmation et la conduite des opérations.

#### 5.3.1. EDF

Les provisions constituées par EDF couvrent la gestion du combustible usé, la gestion à long terme des déchets radioactifs, l'assainissement et démantèlement des centrales arrêtées et la gestion des derniers cœurs. Le montant global de ces provisions, en valeur actualisée, est de l'ordre de 60 Md€, dont 19 Md€ environ pour l'A&D des centrales nucléaires. Concernant les coûts liés au démantèlement des centrales, le provisionnement est dû dès l'installation du premier cœur, tandis que pour les déchets issus de l'exploitation des centrales, les coûts sont provisionnés progressivement au cours de l'exploitation.

40

#### 5.3.2. Orano

Pour Orano, le montant total des charges futures provisionnées, en valeur actualisée, est de l'ordre de 8,7 Md€. Sur ce total, 75 % concernent les installations de La Hague et 11 % celles du Tricastin (dont 8 % pour l'usine GB1). Les opérations de démantèlement proprement dites représentent 45 % et la reprise et le conditionnement des déchets 25 %, incluant la réalisation des aménagements nécessaires.

#### 5.3.3. Le CEA

Les modalités de financement des opérations d'A&D au CEA sont spécifiques en ce que la provision légale pour les installations datant d'avant 2012 est constituée par une créance sur l'État dont la liquidité est assurée par une dotation budgétaire annuelle (programme 190, action 15). Cette dotation s'élève actuellement à 780 M€ par an. Le plan à moyen et long terme du CEA de 2024 prévoit un maintien de ce montant en euros courants jusqu'à 2027 et une augmentation à 845 M€ par an à partir de 2028. Au vu du retour d'expérience des dernières années, la Commission s'interroge sur la mise en place effective de cette augmentation des ressources dans un contexte budgétaire tendu.

Cette contrainte financière conduit le CEA, pour privilégier la réduction du TSM, à reporter sans cesse les opérations d'assainissement et de démantèlement complet des installations. L'entretien inéluctable des bâtiments en attente de démantèlement entraîne des coûts très significatifs qui sont imputés sur l'enveloppe dédiée aux opérations d'A&D, dont ils consomment d'ores et déjà 41 %. Cette proportion ne peut que s'accroître avec l'arrivée de nouvelles installations en attente de démantèlement. Plusieurs projets majeurs, prêts à être lancés, ont déjà dû être repoussés et leur démarrage est suspendu à l'augmentation de la dotation annuelle. Par ailleurs, la contribution du

CEA à la construction de Cigéo est programmée sous la forme d'un flux de 19 M€/an jusqu'en 2035, soit sur les dix ans à venir. Au-delà de cette date, les besoins financiers annuels du projet Cigéo augmenteront significativement. L'examen de la pièce 20 du dossier de chiffrage de l'Andra, consacrée à l'échéancier des dépenses, montre que la dépense moyenne annuelle va plus que doubler sur la décennie 2036-2045 par rapport à la décennie précédente. La contribution du CEA à ce projet va donc devoir augmenter. Si celle-ci devait être imputée sur une subvention A&D constante, le rythme des démantèlements serait davantage réduit.

#### 5.3.4. Synthèse

Pour ce qui est du financement, EDF et Orano provisionnent les coûts des opérations A&D sous forme d'actifs dédiés, conformément à la loi. Le CEA, en revanche, ne dispose pour financer ces opérations que d'une dotation budgétaire annuelle constante en euros courants. Or, il apparaît depuis plusieurs années qu'un accroissement significatif des dépenses est nécessaire.

Dans son rapport n°19 la Commission avait déjà exposé les difficultés que rencontre le CEA à financer les projets A&D, devant en priorité maintenir en sûreté les installations en attente de démantèlement, ce qui grève l'enveloppe globale des opérations d'A&D et conduit à de nouveaux reports, avec pour conséquence d'augmenter significativement les coûts à terminaison. De plus, le manque de visibilité à moyen et long terme sur les ressources allouées à l'A&D du CEA compromet la robustesse du calendrier des opérations.

*La Commission rappelle que la législation française (loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte, dite « loi TECV ») prévoit que les opérations de démantèlement sont effectuées dès que possible après l'arrêt de l'installation, suivant le principe dit du « démantèlement immédiat ».*

*La Commission constate que les ressources actuellement allouées pour les opérations d'A&D ne permettent pas au CEA de se conformer à ce principe.*

#### 5.4. LA R&D EN APPUI DES OPÉRATIONS D'ASSAINISSEMENT ET DÉMANTÈLEMENT

La plus grande partie de la R&D associée aux opérations d'A&D est conduite par le CEA.

Les activités de R&D en appui des opérations d'A&D s'organisent autour de six axes en réponse aux besoins opérationnels, aux besoins de structuration de la filière et à ceux de valorisation à l'international : reprise et conditionnement, démantèlement, traitement, entreposage, transport et exutoires.

La R&D est multidisciplinaire. Elle est organisée en programmes centralisés et hiérarchisés selon les priorités, et planifiés à court, moyen ou long terme. Ces programmes sont définis d'après une collecte annuelle des besoins opérationnels particuliers remontés par les équipes en charge des activités d'A&D. Cette interface directe entre les projets d'A&D et de R&D permet de satisfaire les besoins concrets. Pour être au plus près des exigences, les industriels sont fortement impliqués dans la définition des actions de R&D (44 % d'ETPT en partenariat industriel). La collaboration avec les grands exploitants nucléaires se fait au travers de projets bilatéraux, programmes institutionnels nationaux et internationaux ou accords de coopération. Un ensemble de moyens expérimentaux à grande échelle, soit une dizaine de plateformes technologiques et des chantiers pilotes, permet de valider les solutions industrielles développées.

Comme illustration des réalisations méthodologiques et technologiques récentes du CEA, le système de tri automatisé pour la reprise des gaines magnésiennes avec reconnaissance par imagerie (caméras couplées à des spectromètres) basé sur le développement d'algorithmes

entraînés peut être mentionné. L'objectif est de tendre vers une cadence industrielle de traitement. Le conditionnement de ces gaines dans une matrice géopolymère développée spécifiquement est en cours de qualification par l'Andra.

Dans son rapport n°19, la Commission avait approuvé l'existence d'une R&D soutenue en appui aux programmes d'A&D du CEA. Elle avait recommandé que cette R&D soit intensifiée sur le traitement des déchets. La Commission note avec intérêt les programmes R&D menés par le CEA et exposés au cours des auditions de cette année. La Commission réitère ses encouragements à les poursuivre, notamment sur le sujet du traitement des déchets. Elle remarque que le financement des activités de R&D doit être clairement identifié pour en assurer la pérennité.

*La commission souligne l'intérêt des solutions industrielles développées par le CEA, qui pourraient être valorisées à l'international. Elle recommande de continuer à maintenir un niveau élevé de R&D étant données les spécificités des actions A&D du CEA.*

## CHAPITRE 6. LE STOCKAGE DES DÉCHETS FAVL ET TFA

Le chapitre précédent traite de l'A&D. La majorité des déchets produits par les opérations de démantèlement sont des déchets de faible activité à vie longue (FAVL) et de très faible activité (TFA). À ce jour, il n'existe aucune solution de stockage pour les déchets FAVL. Les déchets TFA sont stockés dans l'installation de surface du CIREs, seul centre en exploitation depuis 2003.

Le rythme de démantèlement n'est pas contraint par l'existence d'un exutoire pour les déchets dans la mesure où les déchets qui ne bénéficient pas d'un exutoire restent entreposés sur les sites de production en l'attente de solution de stockage. Cependant la Commission s'interroge sur l'adéquation entre les rythmes de démantèlement et les exutoires pour les déchets produits.

Les perspectives de réduction de la quantité de déchets produits, de recatégorisation de certains types de déchets, ou encore les perspectives de renouvellement et d'évolution du parc électronucléaire, ainsi que des installations du cycle, sont susceptibles également de modifier les quantités et flux de déchets estimés à l'horizon 2040 et au-delà.

Il semble important, notamment en lien avec une évaluation du coût de gestion de ces déchets, que leur calendrier de production puisse être mis en regard d'un calendrier de création des stockages, et de création des entreposages nécessaires, en particulier, en l'absence de stockage ou de capacité de ces stockages à absorber les flux de déchets produits.

*La Commission recommande d'évaluer les capacités de stockage nécessaires pour les déchets FAVL et TFA au-delà de 2040.*

### 6.1. DÉCHETS FAVL

Les déchets FAVL constituent une catégorie de déchets dont l'activité massique est comprise entre quelques centaines de Bq/g à un million de Bq/g et dont la typologie est variée. Ils incluent 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 déchets graphites (produits par le démantèlement des réacteurs UNGG), une partie des enrobés bitumés et certains déchets technologiques. Leur volume est, selon la mise à jour 2026 des Essentiels de l'Inventaire national publiée par l'Andra, de 125 000 m<sup>3</sup>. A terminaison, il est estimé à 218 000 m<sup>3</sup>. Ce volume pourrait atteindre 280 000 m<sup>3</sup> à la suite d'une éventuelle recatégorisation en FAVL de certains colis MAVL de responsabilité CEA et Orano respectivement.

A ce volume, il conviendra d'ajouter une partie des 383 000 m<sup>3</sup> de résidus de traitement de conversion d'uranium (RTCU) produits depuis 1959 sur le site de Malvési.

La loi de programme n° 2006-739 du 28 juin 2006 avait fixé 2013 comme jalon pour la mise en service d'un stockage à faible profondeur des déchets graphites et radifères, qui entrent dans la catégorie des déchets FAVL.

La question du stockage des déchets FAVL n'a pas progressé significativement et il n'existe à ce jour aucune solution de stockage pour ces déchets.

Le site de la Communauté de communes de Vendeuvre-Soulaines (CCVS), étudié par l'Andra, pourrait être approprié au stockage en subsurface de certains déchets radifères après élimination des sels (nitrates, sulfates, etc...) contenus dans ces déchets, dans la mesure où les capacités de sorption de la formation géologique des argiles tégulines sur laquelle se trouve le site d'étude sont

bonnes. La recommandation de la Commission à ce sujet dans le rapport 19 reste d'actualité ; elle était la suivante :

*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'élimination des sels dans les déchets radifères étant un préalable à un stockage sur le site de la CCVS, Solvay a présenté une feuille de route pour un programme de réduction des nitrates. L'élimination à 80 % de ces sels pourrait être envisagée après séchage résiduel à 20 % d'humidité. Cela conduirait également à une réduction de 50 % des volumes de déchets. Une installation industrielle pourrait être envisagée à l'horizon 2035-2040.

*La Commission recommande que l'Andra précise les conditions d'acceptation des déchets radifères sur le site de la CCVS.*

Le site de la CCVS s'est révélé non adapté pour accueillir les familles de déchets FAVL autres que radifères (déchets bitumés, déchets technologiques, déchets graphites) qui contiennent des radionucléides mobiles non susceptibles d'être retenus par sorption sur les argiles et qui peuvent donc migrer sous l'effet d'un gradient hydraulique.

*La Commission recommande une intensification de la recherche de sites de stockage pour les déchets FAVL non éligibles au stockage sur le site de la CCVS. Cette recherche doit se fonder sur la description des inventaires radiologiques et chimiques des déchets à stocker.*

44

Par ailleurs, la Commission sera particulièrement vigilante à la problématique du devenir des déchets FAVL de Malvési.

## 6.2. DÉCHETS TFA

Le volume de déchets TFA à fin 2024 est, selon la mise à jour de l'inventaire éditée par l'Andra en 2026, égal à 717 000 m<sup>3</sup>, dont 231 000 m<sup>3</sup> entreposés sur les sites des producteurs et 486 000 m<sup>3</sup> stockés au centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (CIRES), situé sur les communes de Morvilliers et de La Chaise (Aube). Ils représentent 36 % du volume de déchets produits et 0.0004 % de l'activité. La quantité de déchets TFA prévue à l'échéance 2030, 2040, et à terminaison, est de 926 000 m<sup>3</sup>, 1 385 000 m<sup>3</sup>, et 2 400 000 m<sup>3</sup>, respectivement.

### 6.2.1. État d'avancement de l'extension du CIRES (projet ACACI)

La capacité de stockage du CIRES est de 650 000 m<sup>3</sup> et son taux de remplissage a atteint 74 % à la fin 2024. Le projet ACACI qui a démarré en 2019 vise depuis à augmenter la capacité de stockage du CIRES de 300 000 m<sup>3</sup> grâce à une optimisation des modalités de gestion des terres excavées et à l'aménagement d'une nouvelle tranche d'exploitation de 9 alvéoles (tranche 3). La demande d'autorisation environnementale (DAE) a été déposée par l'Andra en avril 2023 et l'autorisation environnementale a été obtenue par arrêté préfectoral complémentaire en juillet 2024. L'exploitation du premier alvéole de la tranche 3 est attendue pour 2031.

Cette extension devrait couvrir les besoins de stockage TFA jusqu'en 2038. Les études présentées à la Commission en 2022 (rapport 16) montrent qu'un deuxième site d'une capacité de 1 000 000 m<sup>3</sup> pourrait être créé sur le site de la communauté de communes de Vendeuvre-Soulaines, le dépôt du dossier de demande d'autorisation de création étant prévu vers 2028.

*Dans la mesure où la capacité de stockage du CIREs sera atteinte en 2038, la Commission recommande que les études nécessaires à la création d'un deuxième site soient suffisamment anticipées pour éviter une rupture de continuité dans le stockage des déchets TFA.*

Les déchets TFA constituent la famille de déchets dont le volume est le plus considérable. Il existe donc un enjeu important à réduire le volume de déchets mis en stockage, la valorisation de ces derniers dans le domaine conventionnel étant une piste d'étude.

## **6.2.2. Valorisation des matériaux et réduction du volume de déchets produits**

Les principaux matériaux issus du démantèlement d'installations nucléaires et pouvant faire l'objet de valorisation sont les aciers, les terres et gravats, ainsi que des déchets fluides (lubrifiants, effluents). La valorisation des matériaux peut permettre de diminuer les volumes produits, et ainsi diminuer en aval la pression sur les centres de stockage. Néanmoins, leur valorisation est soumise à l'existence d'un exutoire possible pour ces matériaux. Elle dépend de la réglementation en vigueur et peut être conditionnée à l'existence de processus de libération pour une revalorisation dans le secteur conventionnel.

### **6.2.2.1. Aciers**

Les aciers proviennent du démantèlement d'équipements comme les générateurs de vapeur, tuyauteries, échangeurs et pompes. La quantité de métaux TFA produits en France est estimée à 500 000 t à terminaison. Le projet de recyclage des aciers au Technocentre de Fessenheim en four à arc électrique doit permettre d'économiser 450 000 m<sup>3</sup> de stockage TFA. Il prévoit la production de lingots de 20 kg de fonte ou d'acier satisfaisant aux exigences réglementaires du Code de la santé publique.

### **6.2.2.2. Terres et gravats**

Les terres et gravats TFA ont essentiellement des perspectives de valorisation en matériau de comblement ou de terrassement. Le tri granulométrique des terres par séparation sèche peut avoir un certain intérêt, les radionucléides se fixant préférentiellement sur les fractions fines. Seulement, le taux de tri est très dépendant du caractère hétérogène ou non de la contamination sur le site. Il n'a d'intérêt pour réduire les volumes que si un seuil de libération existe et que les matériaux soient réutilisables dans le domaine conventionnel, les besoins de la filière nucléaire pour ces matériaux étant largement inférieurs à la quantité disponible. Une étude a été réalisée sur la possibilité au CIREs du concassage de 3 600 à 4 500 m<sup>3</sup> par an de gravats TFA en substitution à des granulats non traités utilisés en couche de roulement dans les alvéoles de stockage. Cette étude a mis en évidence des contraintes en termes de prise en charge en amont pour les producteurs (caractérisation, tri, pré-conditionnement) et de mise en œuvre dans les alvéoles au regard de la concentration des poussières émises. Au bilan, cette option de valorisation n'a pas été jugée intéressante par l'Andra.

Les gravats ne sont pas bien adaptés à une intégration dans des bétons de haute performance majoritaires dans les installations nucléaires car les bétons de recyclage n'ont pas les propriétés mécaniques et de durabilité requises. De plus, le coût des matériaux étant très dépendant du transport, leur valorisation peut être également limitée si une étape de transport est requise.

Il existe également des enjeux associés à la mesure de la radioactivité sur les gravats. Orano développe un système d'intégration multi-capteurs de caractérisation radiologique et physico-chimique en ligne, capable d'identifier et de classer en temps réel les matériaux valorisables ou à évacuer et d'intégrer un traitement des incertitudes, de l'aide à la décision et du contrôle qualité. Un des enjeux essentiels associé à la mesure de la radioactivité sur des matériaux hétérogènes tels que les gravats tient également au fait que les contaminations peuvent être réparties de façon hétérogène.

A l'échelle du site, une cartographie préalable du risque de contamination en fonction des activités passées peut être une étape intéressante préalable pour identifier le potentiel de revalorisation des terres et gravats. Sans perspective d'obtention d'une dérogation permettant la réutilisation de ces matériaux hors de la filière nucléaire, il n'y a pas d'enjeu à développer des méthodes de mesures innovantes et à poursuivre de la R&D.

*La Commission recommande d'évaluer le bénéfice d'une approche cartographique préalable sur la capacité de tri des matériaux de type gravats et terres qui pourraient être exempts de contamination.*

### 6.2.2.3. Déchets fluides organiques et inorganiques

Les déchets fluides sont divers. On peut citer les lubrifiants perfluorés PFPE, pour lesquels il n'existe actuellement pas de filière de retraitement et dont l'acceptabilité au CIREs n'est pas garantie. Le projet D-perle évalue actuellement leur retraitement par épuration dans le CO<sub>2</sub> supercritique pour une réutilisation dans la filière nucléaire.

L'acide nitrique est utilisé dans le processus de dissolution des concentrés d'uranium lors de l'étape de conversion de l'uranium naturel réalisée sur le site de Malvésí. Il en résulte une production de liquides nitrates de 80 000 à 150 000 m<sup>3</sup>/an, représentant 10 000 m<sup>3</sup>/an après évaporation. Orano évalue la faisabilité de modifier son procédé de traitement des effluents afin d'arrêter le remplissage de ses bassins d'une capacité totale de 645 000 m<sup>3</sup> et dont le taux actuel de remplissage est de 62 %. Il existe un enjeu fort de risque d'arrêt de l'activité de conversion sur atteinte des gardes réglementaires, comme celui observé entre janvier et avril 2026 suite à un épisode pluvieux intense de type méditerranéen cumulant 300 mm environ. Dans une perspective de valorisation, Orano étudie la possibilité de concentrer les liquides nitrates d'un facteur dix en se fixant comme seuil une dose efficace ajoutée inférieure à 10 µSv/an. Cette valeur est indicative, puisque qu'il n'existe pas de cadre réglementaire applicable à ces matériaux.

### 6.2.3. Réglementation française et européenne sur la réutilisation des matériaux et notion de seuil de libération

Un seuil de libération est défini comme le niveau de radioactivité en dessous duquel un déchet n'est plus considéré comme radioactif, et peut être libéré dans l'industrie conventionnelle pour une réutilisation au même titre que tout autre matériau conventionnel.

La réglementation européenne via la directive 2013/59/EURATOM spécifie pour les déchets TFA les valeurs d'exemption générale (en activité massique, soit Bq/g) applicables à tous types de matières solides et toutes quantités de radionucléides artificiels et naturels, ainsi que les valeurs d'exemption (en activité totale (Bq) et massique) applicables pour les radionucléides se trouvant en quantité modérée dans tous types de matières. Ces dernières sont soumises à l'autorisation de l'autorité compétente. Si un seul radionucléide est présent, son activité massique ne doit pas dépasser une certaine limite ; si plusieurs radionucléides sont présents, la somme des activités massiques pondérées par les valeurs limites doit rester inférieure à un. Le principe de libération repose sur le respect d'une limite de dose efficace inférieure à 10 µSv/an. Cette valeur limite est également recommandée par l'AIEA.

La réglementation française est différente. Elle suit un principe de zonage de production possible des déchets nucléaires sur une installation, suivant l'arrêté du 7 février 2012 : tout matériau issu d'une INB et dont l'activité massique est inférieure à 100 Bq/g est qualifié de déchet TFA en fonction de sa localisation dans l'INB et non en fonction de son activité, qu'elle soit ou non détectable.

Ce principe de zonage apporte des avantages certains du point de vue de la radioprotection, la valorisation des matériaux ne pouvant se faire que sur le site d'une INB. Cependant, la contrepartie est que cela conduit à diriger une quantité importante de déchets dont l'activité peut être extrêmement faible, voire nulle, vers un centre de stockage dédié, la possibilité de valorisation sur une INB étant faible par rapport aux besoins. Cela est particulièrement vrai pour les gravats. La réglementation applicable en France ne permet donc pas l'utilisation de seuils de libération pour déterminer la filière de gestion des déchets produits. Le libre échange en Europe rend du reste la réglementation française partiellement inopérante, puisque les matériaux libérés dans les autres pays, dont la Suède (usine Cyclife Sweden AB du groupe Cyclife, filiale d'EDF) sont revendus sur le marché européen et mondial, incluant la France.

Cependant un cadre dérogatoire réglementaire, au travers des décrets 2022-174, relatif à la mise en œuvre d'opérations de valorisation de substances faiblement radioactives, et 2022-175, relatif aux substances radioactives éligibles aux opérations de valorisation mentionnées à l'article R. 1333-6-1 du Code de la santé publique, a été mis en place. EDF étudie actuellement la valorisation de substances métalliques faiblement radioactives dans une installation dite Technocentre sur le site de Fessenheim. La dérogation permettant la mise en service de cette installation reste à obtenir. Un arrêté daté du 14 février 2022 précise le contenu du dossier de demande de dérogation. Les lingots métalliques produits devront répondre aux exigences du Code de la santé publique et de la directive 2013/59/EURATOM. Ils seront libérables dans le secteur conventionnel.

La Commission observe que le cadre dérogatoire réglementaire envisagé pour le recyclage des aciers permettra leur valorisation *via* une filière de recyclage implantée sur le territoire, en s'alignant sur la réglementation européenne. Cette filière de valorisation diminuerait le volume de déchets TFA à stocker.

Ce cadre dérogatoire réglementaire est limité aux substances métalliques issues du démantèlement des installations du parc. Les travaux présentés à la Commission sur la valorisation d'autres substances ne pourront déboucher sur une réduction de la quantité de déchets en l'absence d'un cadre réglementaire les concernant.

*La Commission recommande que soient instruites les possibilités de faire évoluer le cadre réglementaire pour les substances faiblement radioactives autres que métalliques, faute de quoi les efforts de R&D sur la caractérisation de ces substances et leur valorisation resteront inutiles.*



## CHAPITRE 7. LE BESOIN DE PÉRENNISATION DE LA R&D NUCLÉAIRE SUR LE LONG TERME

### 7.1. RÔLE ET PLACE DE LA NOUVELLE AGENCE DE PROGRAMME ÉNERGIES DÉCARBONÉES (APED)

La période récente a été marquée par la création début 2024 à l'initiative du Président de la République (discours du 7 décembre 2023 lors de la réception pour l'avenir de la recherche française) de 7 agences de programme dont l'une est spécifiquement dédiée aux énergies décarbonées. L'agence de programme énergies décarbonées (APED) a ainsi été placée sous la responsabilité du CEA et vise à apporter une expertise aux services de l'État pour contribuer à l'élaboration de la stratégie nationale de recherche et d'innovation dans le domaine de l'énergie, dont le nucléaire. Ses principales missions sont :

- anticiper les grandes évolutions scientifiques, technologiques et sociétales du domaine ;
- construire et piloter des programmes de recherche associés au domaine de l'énergie afin de renforcer la position des équipes françaises dans leurs domaines d'excellence et de préparer une réponse aux futurs besoins d'innovation des filières industrielles ;
- participer à l'animation des communautés scientifiques et technologiques nationales tout en assurant la coordination avec les initiatives européennes ;
- accompagner la structuration des infrastructures de recherche sur l'ensemble des domaines de compétence de l'agence.

Cette agence hébergée au sein du CEA dispose d'une équipe d'une dizaine de personnes animée par un directeur exécutif. Sa gouvernance repose sur un comité de coordination présidé par le ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'espace, un comité des partenaires présidé par l'administratrice générale du CEA et un comité opérationnel présidé par le directeur des énergies du CEA.

À la demande du Gouvernement, un premier travail de réflexion prospective a été mené début 2025 pour identifier les thématiques de recherche orphelines devant faire l'objet de nouveaux programmes nationaux de recherche. C'est ainsi que l'APED a proposé 3 nouveaux programmes dont l'un dédié au nucléaire et intitulé « sciences amont pour le nucléaire de fission » qui a été accepté pour financement en juillet 2025. Ce programme vise à structurer et soutenir les activités de R&D fondamentales dont le programme de relance du nucléaire a besoin dans la durée. Coordonné par le CNRS et disposant d'un financement France 2030 de 18 M€, il vise à mobiliser la communauté académique autour des enjeux du nucléaire futur, notamment sur la modélisation des processus clés en renforçant l'attractivité auprès des jeunes générations.

Au-delà de ces nouveaux programmes, les agences de programme ont vocation à coordonner l'action des différents établissements nationaux de recherche, à coordonner les différents programmes nationaux de recherches menés dans leur thématique, à développer un travail de réflexion prospective et stratégique, à être force de proposition pour initier de nouveaux programmes nationaux, et à renforcer la coordination entre les infrastructures de recherche.

*La Commission prend note de la mise en place de la nouvelle agence de programme énergies décarbonées et des instances associées de concertation et de pilotage transverse aux différents acteurs de la recherche. La Commission demande à être informée des actions de recherche fondamentale lancées par ce nouveau dispositif, et notamment celles concourant au programme « Fermeture du Cycle ».*

## 7.2. INTERROGATION SUR LES PERSPECTIVES DE FINANCEMENT À MOYEN TERME

Au-delà du financement statutaire des équipes de recherche *via* les programmes 172 ou 190, la recherche amont et prospective a été largement soutenue depuis quelques années d'abord par le programme des investissements d'avenir (PIA), puis par le programme France 2030.

La commission s'interroge sur la pérennisation de ces financements et donc de ces programmes au-delà du véhicule actuel de financement, qui arrive à échéance.

*La Commission estime qu'il serait très dommageable que les programmes de R&D accompagnant le programme « Fermeture du Cycle » soient en risque à l'issue des financements France 2030 actuels. Elle recommande que les modalités de financement de ces programmes au-delà de France 2030 soient d'ores et déjà identifiées.*

## 7.3. ENJEU DES MOYENS EXPÉRIMENTAUX ET D'ESSAIS

La recherche dans le domaine nucléaire ne peut procéder et avancer sans installations expérimentales et d'essais adaptées, qui permettent d'acquérir de nouvelles données de base, de développer et qualifier des procédés ou des technologies, et de qualifier en conditions réelles les performances attendues. Bien que la France dispose encore d'installations expérimentales de premier plan comme les laboratoires chauds du CEA (Atalante, LECA-STAR), elle ne dispose plus à ce jour de moyens d'essais à grande échelle pour les usines du cycle ni de moyens d'irradiations jusqu'au démarrage du réacteur RJH, qui n'est pas attendu avant la prochaine décennie. Or, sans disposer d'un accès à de telles installations, il ne sera pas possible de concevoir et qualifier des nouveaux concepts de réacteurs ou de combustibles, ou de nouveaux procédés pour les usines. Il y va donc pour la France de sa capacité à assurer la souveraineté de son industrie et de ses choix nucléaires. Outre que ces installations deviennent de plus en plus rares au niveau européen, les tentatives récentes pour sécuriser l'accès à de telles installations à l'international *via* des partenariats dédiés n'ont pas été pour le moment couronnées de succès (par exemple, Smetana).

Dans ce contexte, la Commission s'interroge sur la capacité à assurer la pérennité sur la durée des moyens expérimentaux et d'essais nécessaires pour accompagner le renouveau du nucléaire et assurer la souveraineté des choix français dans ce domaine, voire dans certains cas à les reconstituer.

*La Commission insiste sur l'importance des moyens expérimentaux et d'essais pour mener à bien tous les programmes majeurs de renouveau du nucléaire incluant les études fines des effets de la modulation, l'extension de durée de vie du parc actuel, la mise en service des futurs réacteurs et la fermeture du cycle.*

## CHAPITRE 8. PANORAMA INTERNATIONAL

### 8.1. INTRODUCTION

Dans de nombreux pays, la gestion des déchets nucléaires de haute activité à vie longue est à l'ordre du jour depuis des décennies. Plus de 40 ans de collaborations internationales ont été consacrées à la recherche visant à développer les outils nécessaires pour évaluer la sûreté à long terme des déchets. Le stockage géologique profond des déchets de haute activité est la solution de référence adoptée par la communauté scientifique ; elle a été validée à ce jour par de nombreuses décisions dans divers programmes de gestion de déchets nucléaires. Le concept consiste essentiellement à conditionner les déchets dans des conteneurs appropriés, le choix de ces derniers étant en accord avec la formation géologique choisie. Les colis seront ensuite stockés à la profondeur requise pour assurer une sûreté à long terme. Le stockage géologique profond est conçu pour isoler les déchets de l'environnement humain pendant plusieurs centaines de milliers d'années.

Le défi principal concerne la sélection des sites pour le stockage, impliquant les décideurs à différents niveaux ainsi que le grand public, quelle que soit la nature des déchets radioactifs. Il s'agit d'un défi national dont la solution ne peut être que locale. Sur cet aspect, il existe des outils à adopter à partir des expériences des leaders dans ce domaine. La sélection de site basée sur le volontariat en est un exemple.

Ce chapitre résume l'état des programmes de stockage géologique profond en Finlande et en Suède. Ce sont les deux projets qui avancent le plus dans le monde, étant en phase d'instruction ou de construction. Quelques indications concernant d'autres pays sont données en fin de chapitre.

### 8.2. CONCEPTS DE STOCKAGE

#### 8.2.1. Suède

La Suède prévoit, de la même manière que la Finlande, le stockage direct du combustible usé encapsulé dans une formation géologique granitique, selon le concept KBS-3. En 2020, le gouvernement a délivré l'autorisation de construire et d'exploiter l'installation de stockage dans la municipalité d'Östhammar et une installation d'encapsulation dans la municipalité d'Oskarshamn. Le gouvernement a délégué la responsabilité de fixer les termes et conditions d'exécution du projet à l'autorité de sûreté et au tribunal de l'environnement. SKB, l'organisme responsable de la gestion des déchets nucléaires en Suède, prépare à présent les premiers creusements.

#### 8.2.2. Finlande

Après son programme de sélection de sites, la Finlande a choisi de lancer le projet Onkalo dans la municipalité d'Eurajoki, qui est un stockage dans une formation géologique granitique. Le concept technique choisi est KBS-3, développé principalement en Suède. Le combustible usé, qui est stocké directement sans retraitement, est placé dans un conteneur en fonte, lui-même encapsulé dans un conteneur en cuivre. Le colis ainsi constitué est placé dans un alvéole et entouré d'une barrière ouvragée de bentonite, à une profondeur de 400 à 430 mètres.

### 8.3. PROCÉDURES DE DÉLIVRANCE DES AUTORISATIONS DE CONSTRUCTION

Les procédures de délivrance des autorisations (*licencing*) de construction en Suède ont pris beaucoup de temps avant que le gouvernement ne donne son feu vert. La Finlande avait un processus de *licencing* plus concis : une première déclaration du gouvernement appelée décision de principe a permis un démarrage rapide et efficace de la construction. Dans les deux pays, une fois que le gouvernement a délivré l'autorisation pour construire et exploiter l'installation de stockage, il délègue presque entièrement le suivi de l'exécution à son autorité de sûreté et à son autorité environnementale.

Sur la base de cette expérience de l'instruction du stockage en Suède, le gouvernement suédois travaille actuellement sur des lois destinées à simplifier les procédures d'autorisation, car le temps nécessaire aux industries pour obtenir une licence est jugé trop long et peu efficace.

Quelques aspects importants dans la construction des stockages de déchets selon les procédures finlandaises et suédoises sont décrits ci-après. Les deux pays adoptent plus ou moins la même approche.

#### 8.3.1. Procédures de test des installations

La gestion du combustible nucléaire usé impliquera l'installation d'encapsulation, le transport des conteneurs et la mise en place des colis dans le stockage. Les deux pays prévoient des essais au sein des installations industrielles. Lors des essais, des éléments de combustible factice non radioactifs sont utilisés à la place du combustible nucléaire usé réel. Les opérations d'essai démontrent la fonctionnalité de l'ensemble du processus de stockage et la préparation du personnel à l'exploitation industrielle ultérieure. La Finlande termine actuellement ces tests qui ont commencé en août 2024. Les opérations de test comprennent :

- le transport du combustible usé vers l'installation d'encapsulation ;
- l'assemblage du conteneur et son transport vers la cellule d'encapsulation ;
- la mise en place du combustible usé à l'intérieur du conteneur ;
- la soudure et l'usinage du couvercle du conteneur ;
- le transport du conteneur vers le site de stockage (Onkalo pour la Finlande) ;
- le transfert du conteneur dans le tunnel au niveau de stockage ;
- la mise en place de la barrière ouvragée de bentonite ;
- la mise en place du conteneur à l'intérieur de l'alvéole de stockage ;
- le remblayage du tunnel après que les alvéoles du tunnel ont été comblés.

L'autorité de sûreté de chaque pays devra bien sûr s'assurer que toutes ces opérations sont maîtrisées par l'entreprise en charge du projet, Posiva en Finlande ou SKB dans le cas de la Suède. Ce n'est qu'alors que l'autorité de sûreté rendra sa décision concernant l'exploitation normale du stockage du combustible nucléaire usé.

Il n'existe pas de phase de Phipil comme en France et les tests durent quelques mois, comme on peut le constater actuellement en Finlande.

#### 8.3.2. Récupérabilité

Les deux pays ont démontré la faisabilité technique de récupérer les conteneurs après leur stockage. Cependant, il n'y a pas aujourd'hui d'intention pour les deux programmes de récupérer les déchets après les avoir stockés.

### 8.3.3. Réversibilité

La réversibilité est une exigence importante et nécessaire dans la phase d'exploitation du système de stockage. Pour toute raison concernant la sûreté d'un conteneur, l'opérateur doit démontrer qu'il est possible d'inverser le processus vers ce qu'on appelle, dans les activités nucléaires, une position sûre. La réversibilité n'est exigée que dans la phase d'exploitation de ces installations nucléaires.

### 8.3.4. Surveillance

La surveillance est une exigence dans la phase d'exploitation, comme c'est le cas pour toute installation nucléaire de base selon la loi en Finlande et en Suède. Le suivi n'est plus nécessaire par la suite car la loi exige un stockage géologique final qui ne nécessitera pas de contrôle institutionnel.

## 8.4. RETOURS D'EXPÉRIENCE

On constate que malgré quelques difficultés passées, les deux projets de gestion des déchets nucléaires en Finlande et en Suède ont considérablement progressé. Quelques aspects ont certainement contribué à ce progrès :

- La concertation autour d'un sujet a presque toujours pris beaucoup de temps et le dialogue devait prendre le temps nécessaire. Cependant, lorsqu'une décision est prise par le gouvernement ou l'autorité de sûreté, le sujet ne refait surface que si un événement majeur se produit.
- Le nombre des instances impliquées dans les concertations est restreint et stable. Au niveau national, à part le gouvernement, les autorités de sûreté et de l'environnement, le Conseil de la gestion des déchets nucléaires (l'homologue approximatif de la CNE2), les décideurs au niveau municipal et les groupes environnementaux, il n'existe pas de groupes de travail ni de comités pour conseiller les décideurs. Le gouvernement s'appuie sur ses autorités et son Conseil. Il est également intéressant de constater que les gouvernements des deux pays délèguent les décisions concernant l'exécution des projets de stockage à l'autorité de sûreté. Le gouvernement n'interviendra que pour décider d'une nouvelle phase majeure, comme la fermeture du stockage ou si des changements majeurs sur le concept de stockage se produisent. Il n'y a aucune valeur ajoutée à multiplier les groupes de travail pour conseiller le gouvernement ou les autorités de sûreté quant à leurs décisions.
- La Finlande applique depuis le début un processus décisionnel très rapide et efficace ; la Suède rattrape également son retard dans cette direction.

## 8.5. AUTRES PAYS QUE SUÈDE, FINLANDE ET FRANCE

La Suède, la Finlande et la France sont les pays les plus avancés dans la perspective de la mise en service d'un stockage géologique pour les déchets de haute activité à vie longue, concept adopté par tous. Les difficultés restent importantes pour les autres pays, pour des raisons politiques, sociétales ou financières.

### 8.5.1. Canada

L'organisation en charge de la gestion des déchets nucléaires, NWMO, a exploré plus de 20 sites potentiels différents au Canada à la recherche de communautés susceptibles de se porter

candidates pour accueillir un stockage géologique profond. NWMO a passé la dernière décennie à affiner cette liste jusqu'au site préféré. Le concept technique ressemble à KBS-3 utilisé en Suède et en Finlande.

La situation actuelle est que la Nation Ojibwée du lac Wabigoon et le canton d'Ignace ont été sélectionnés en novembre 2024 comme communautés hôtes pour le stockage proposé, cela après une approche fondée sur la participation volontaire des communautés qui avait commencé 14 ans plus tôt. Les activités préalables à la procédure d'autorisation, y compris l'engagement des parties prenantes et les examens préalables relatifs à l'environnement, sont en cours.

La construction de l'installation ne commencera qu'après le vaste processus réglementaire du gouvernement fédéral et le processus d'évaluation et d'approbation réglementaire dirigé par le gouvernement indépendant des indigènes, développé par la Nation Ojibwée du lac Wabigoon.

Le calendrier affiché fait apparaître une décision initiale attendue en 2030, ce qui permettrait de commencer la construction en 2032 et de passer en phase d'exploitation en 2042. La fermeture de l'installation est prévue après une cinquantaine d'années d'exploitation.

### 8.5.2. États-Unis

En 2008, le Département de l'énergie (DOE) a soumis une demande d'autorisation de construction à la Commission de régulation nucléaire (NRC) pour un stockage géologique profond de déchets de haute activité à vie longue sur le site de Yucca Mountain. L'administration a ensuite décidé d'abandonner le projet en raison d'une forte opposition politique du Nevada. Depuis, divers rebondissements se sont produits, avec pour résultat que le projet de stockage n'a pas été autorisé.

Le DOE a adopté une nouvelle stratégie basée sur la participation volontaire des communautés pour la sélection des sites. Il a été décidé d'essayer cette approche pour sélectionner un site destiné à un entreposage. L'idée était d'appliquer plus tard cette stratégie pour sélectionner un site pour un stockage géologique profond avec l'expérience acquise.

Deux propositions de sites pour un entreposage ont été examinées, mais les mêmes difficultés sont à nouveau apparues : opposition politique au niveau étatique et local, manque de continuité des politiques fédérales à long terme, obstacles juridiques au transport des déchets nucléaires et, enfin, manque de confiance du public.

### 8.5.3. Suisse

La Suisse en est à la phase finale du processus de sélection du site. Le plan de la Nagra prévoit un stockage combiné pour les déchets de haute, moyenne et faible activité à vie longue. Pour tous ces déchets, une demande d'autorisation générale a été soumise au gouvernement fédéral suisse en 2024 et doit être examinée d'ici 2027. Selon la planification actuelle, le Conseil fédéral statuera sur la demande en 2029 et le Parlement l'année suivante. Un référendum national de ratification devrait avoir lieu en 2031.

### 8.5.4. Allemagne

En Allemagne, il est considéré que tous les déchets radioactifs doivent être stockés en profondeur, seule solution qui garantit, selon ce pays, la sûreté à long terme.

L'ancienne mine de fer Konrad située à Salzgitter a été approuvée, sur la base du droit nucléaire allemand, comme site de stockage des déchets radioactifs de faible et moyenne activité. En 2030, le stockage de 300 000 m<sup>3</sup> à environ 1 000 mètres de profondeur devrait commencer.

Pour les déchets de haute activité à vie longue, la recherche d'un nouveau site de stockage est en cours, après l'arrêt en 2020 du projet de stockage dans l'ancienne mine de sel de Gorleben. Une première sélection de 90 zones ayant des conditions géologiques favorables sera suivie d'une proposition de régions pour l'exploration de surface en 2027, et la comparaison de différents sites devrait aboutir à la proposition d'un seul site en 2031.







## GLOSSAIRE

2D : deux dimensions

A&D : assainissement et démantèlement

AC : assemblage combustible

ACACI : projet visant à augmenter la capacité du CIREs

ACU : assemblage de combustible usé

ADEC : ateliers de déchargement des combustibles (du programme Aval du Futur)

ADF : programme Aval du Futur

AEN : agence de l'énergie nucléaire

AIEA : agence internationale de l'énergie atomique

Andra : agence nationale de gestion des déchets radioactifs

APD : avant-projet définitif (ou détaillé)

APED : agence de programme pour la recherche sur les énergies décarbonées

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"

ATF : « accident tolerant fuel »

BK : bâtiment combustible d'une centrale nucléaire, où se trouve la piscine de désactivation

BRGM : Bureau de recherches géologiques et minières

CAMOX : programme de cycle allongé du MOX

CBP : cellule blindée procédés d'Atalante à Marcoule

CCVS : Communauté de communes de Vendevre-Soulaines

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

CFD : calcul numérique de dynamique des fluides (computational fluid dynamics)

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-Saudron

CNDP : commission nationale du débat public

CNE : commission nationale d'évaluation

CNRS : centre national de la recherche scientifique

ColHySE : code de calcul « advanced column hydrodynamic-based model for solvent extraction »

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

CPN : Conseil de politique nucléaire

CSA : centre de stockage des déchets radioactifs de faible et moyenne activité à vie courte

CSD-V : colis standard de déchets vitrifiés

CSFN : comité stratégique de la filière nucléaire

CU UOX : combustible d'oxyde d'uranium usé

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

DAC : demande d'autorisation de création

DECOVALEX : programme international de recherches (« DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments »)

DGEC : direction générale de l'énergie et du climat

58

DGRI : direction générale de la recherche et de l'innovation du ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation

DIVA : dispositif immergeable pour la visualisation d'assemblage combustible irradié en piscine BK

DOE : ministère américain de l'énergie (« department of energy »)

DOS : dossier d'options de sûreté

DP2D : direction des projets déconstruction et déchets d'EDF

DUP : déclaration d'utilité publique

ECRAN : extracteur centrifuge monoétage type BXP Rousselet-Robatel

EDF : Electricité de France

EOD : arrêt réacteur pour équilibre offre/demande

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

EPR : réacteur à eau pressurisée de 3<sup>ème</sup> génération de 1 650 MWe (« european pressurized reactor » en anglais)

EPR2 : réacteur à eau pressurisée de 3<sup>ème</sup> génération de 1 650 MWe de conception simplifiée

ETI : entreprise de taille intermédiaire

ETPT : équivalent temps plein annuel travaillé

EURAD (1 et 2) : programme(s) de recherche européens (« European partnership on RADioactive waste management »)

FAVL : déchets de faible activité à vie longue

FMA-VC : déchets de moyenne activité à vie courte

FUNMIG : programme de recherches international (« FUNdamental processes of radionuclide MIGration »)

GoMOX : programme de modernisation des boîtes à gants de l'usine Melox

HAVL : déchets de haute activité à vie longue

ICPE : installation classée pour la protection de l'environnement

INB : installation nucléaire de base

IR : ressources d'uranium naturel seulement soupçonnées (« Inferred Resources »)

IRM : inventaire des ressources minérales mené par le BRGM

IRSN : institut de radioprotection et de sûreté nucléaire

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

KBS-3 : concept de stockage des combustibles usés développé par SKB

LECA-STAR : Laboratoire d'Examen des Combustibles Actifs (LECA) et Station de Traitement, d'Assainissement et de Reconditionnement (STAR) de Cadarache

MARCEL : module avancé de radiolyse dans les cycles d'extraction-lavage de Marcoule

MAVL : déchets de moyenne activité à vie longue

MIMAS : procédé de fabrication des pastilles cylindriques de MOX (« Micronized-MAster blend »)

MOX : combustible composé d'un mélange d'oxydes (« mixed oxides » en anglais, UO<sub>2</sub> et PuO<sub>2</sub>)

MOX-MR : combustible MOX pour multirecyclage en REP

MOX-REP : combustible MOX pour REP

MOX-RNR : combustible MOX pour réacteurs à neutrons rapides

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

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

NWMO : organisme national canadien chargé de gérer les matières et déchets radioactifs (« nuclear waste managemen organization »)

OCDE : organisation de coopération et de développement économiques

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

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

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

PADEC : poste amovible d'examen du combustible REP

PF : produits de fission

PFPE : perfluoropolyéther

Phipil : phase industrielle pilote de Cigéo

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 : programmation pluriannuelle de l'énergie

PRECCI : programme de recherche sur les colis de combustibles irradiés mené par le CEA

Pumas : procédé industriel de traitement des combustibles usés permettant d'extraire et de recycler l'uranium et le plutonium (« plutonium uranium monoamid 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)

60

R&D : recherche et développement

RAR : ressources d'uranium naturel identifiées (« Reasonably Assured Resources »)

RBM : rebut boîte MOX

RCD : reprise et conditionnement des déchets radioactifs anciens

REP : réacteur à eau pressurisée

REX : retour d'expérience

RJH : réacteur Jules Horowitz

RNR : réacteur à neutrons rapides

RTCU : résidus de traitement de conversion de l'uranium

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

SABRE : programme de contrôle des gaines de combustible REP

SCK-CEN : centre de recherche de Mol en Belgique

SKB : entreprise suédoise de gestion des déchets radioactifs

Smetana : « Sodium fast reactor Pu exMox Experimental Test and ANALysis »

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

STRIPA : programme de recherches mené par SKB dans l'ancienne mine de fer de Stripa en Suède

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

TECV : ( loi relative à la ) transition écologique pour la croissance verte

TFA : déchets de très faible activité

tML : tonne de métal lourd

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

TSM : terme source mobilisable

Uapp : uranium appauvri (issu de l'opération d'enrichissement de l'uranium naturel)

UDEPO : Uranium DEPOSIT database

UOX : oxyde d'uranium

UNE : uranium naturel enrichi

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

URE : uranium de retraitement ré-enrichi

URT : uranium de retraitement

ZIRA : zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie







## ANNEXE I. COMPOSITION DE LA COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION

---

*Commission en exercice en date du 15 avril 2026*

---

**Saida LAÂROUCHI-ENGSTRÖM** – présidente de la Commission nationale d'évaluation – ingénieur – ancienne vice-présidente de SKB - Suède.

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

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

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

**Virginie MARRY** – professeur des universités, chimie, Sorbonne université.

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

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

**Catherine NOIRIEL** – enseignante-chercheuse, géosciences & environnement, Université de Toulouse.

**Céline PERLOT-BASCOULÈS** – professeur, Génie civil et sciences des matériaux, Université de Pau et des Pays de l'Adour.

**Christophe POINSSOT** – directeur général délégué du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) - membre et vice-président du pôle énergie de l'Académie des technologies.

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

### Conseillers experts de la CNE :

**Jean-Claude DUPLESSY** – président honoraire 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.

**Emmanuel LEDOUX** - directeur de recherche honoraire à l'école des mines de Paris.



## ANNEXE II. ACTIVITÉ DE LA COMMISSION

Le rapport n°19 a été présenté :

- à l'OPECST le 3 juillet 2025 ;
- au Comité local d'information et de suivi (CLIS) du laboratoire de Bure le 2 février 2026.

Le rapport sur le dossier de demande d'autorisation de création du centre Cigéo a été présenté :

- à l'OPECST le 4 décembre 2025 ;
- au Comité local d'information et de suivi (CLIS) du laboratoire de Bure le 2 février 2026.

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

- 10 auditions plénières ;
- 8 auditions restreintes ;
- 2 ateliers thématiques organisés avec l'Andra afin d'éclairer la CNE sur le contenu du dossier de DAC du projet Cigéo.

On trouvera en annexe IV la liste des organismes auditionnés par la CNE parmi les différents opérateurs de la filière nucléaire.

La Commission s'est déplacée à 2 reprises pour un voyage d'études et des visites techniques :

- Voyage d'études en Suède/Finlande du 24 au 29 septembre 2025
- Visite du site EDF de Flamanville 3 le jeudi 26 mars 2026

La liste des documents pris en compte pour ce rapport (arrêtée au 15 avril 2026) est donnée en annexe V.



## ANNEXE III. AUDITIONS RÉALISÉES PAR LA COMMISSION

### AUDITIONS PLÉNIÈRES :

#### (10 auditions)

- 15 octobre 2025 : Andra – Dossier Cigéo
- 16 octobre 2025 : CEA – Avancement du plan d'action sur les déchets bitumés
- 19 novembre 2025 : Orano – TFA et valorisation des substances radioactives
- 10 décembre 2025 : EDF – Combustible REP
- 14 janvier 2026 : CNRS - Panorama sur la science amont pour l'énergie nucléaire
- 15 janvier 2026 : CEA – Assainissement et Démantèlement
- 04 février 2026 : Andra – Dossier FAVL
- 05 février 2026 : EDF – Fermeture du cycle
- 18 mars 2026 : CNE2 – Réunion d'information ASNR + BMPM, CEA, Veolia NS, ITER
- 19 mars 2026 : Orano – Aval du cycle et Aval du Futur

### AUDITIONS RESTREINTES :

#### (8 auditions)

- 17 septembre 2025 – matin : Orano – Actualités – Démantèlement Georges Besse I – enjeux Orano pour le débat public sur le PNGMDR – Point de situation Orano MED
- 17 septembre 2025 – matin : EDF – Point d'actualités cycle du combustible – démantèlement et déchets – enjeux du prochain PNGMDR et avancement Technocentre
- 17 septembre 2025 – après-midi : Framatome – Éléments d'actualités sur les activités RNR et combustible – coopération Framatome-JAEA/MHI-MFBR
- 18 septembre 2025 – matin : CEA – Actualités CEA, par l'administratrice générale du Commissariat à l'énergie atomique et par le directeur des énergies
- 18 septembre 2025 – après-midi : Andra – Points d'actualités – Cigéo – FAVL- TFA – point d'avancement TFA2
- 04 février 2026 – matin : Andra – Point d'actualités – Dossier FAVL
- 19 mars 2026 – après-midi : Orano et CEA – Pumas
- 07 avril 2026 – après-midi : EDF – Enjeux et perspectives de la modulation pour les cœurs des réacteurs électronucléaires et la cohérence du cycle – Trajectoires vers la fermeture du cycle

## *ATELIERS THÉMATIQUES AVEC L'ANDRA*

*(2 ateliers)*

19 septembre 2025 – matin : Les marges de sûreté en après-fermeture pour les alvéoles MAVL

14 octobre 2025 – après-midi : Suppression dans le COx

## ANNEXE IV. LISTE DES PERSONNES CONSULTÉES PAR LA COMMISSION

### *ORGANISMES AUDITIONNÉS :*

#### *Andra*

ALAVOINE Olivier  
ARMAND Gilles  
CANEL-QUOUILLAULT Maëva  
CORDIER Bérengère  
CORNISH-BOWDEN Isadora  
CROMBEZ Sébastien  
DOUHARD Séverine  
EVRARD Lydie  
FARIN Sébastien  
GERARD Fanny  
LANDREIN Philippe  
LEVIEUX Marine  
ROBINET Jean-Charles  
WASSELIN Virginie  
ZGHONDI Jad

#### *BMPM - Bataillon des Marins Pompiers de Marseille*

VILPELLET Christophe

#### *CEA*

BOUDERGUI Karim  
BUCCIERO Vivien  
ETIENVRE Anne-Isabelle  
GABRIEL Sophie  
GAVOILLE Pierre  
GLAIZETTE Thomas  
JOURDA Paul  
JACQUES Xavier  
KASSIOTIS Christophe  
LALLEMAN Sophie  
LE FLEM Marion  
LEPAPE Renaud  
LEYBROS Antoine  
NONNET Hélène  
PINET Olivier  
PHELIP Mayeul  
RAMBAUD Amélie  
SALUDEN Magali  
SOREL Christian  
STOHR Philippe

#### *CNRS*

ARBOR Nicolas  
DACHEUX Nicolas  
DEN AUWER Christophe  
BENEDICTO Antonio  
DE BILBAO Emmanuel  
KERVENO Maëlle  
MONCOFFRE Nathalie  
ROY Christelle  
THIOLLIERE Nicolas  
TILLEMENT Stéphanie

#### *EDF*

AMBARD Antoine  
COSTA Davide  
FABING Sandra  
GARABOL Laurent  
GIRAUD Olivier  
GIRON Gilles  
GRANET Sylvie  
JARLEGAN Éric  
KHATTOUT Farida  
KERKAR Nordine  
LAUGIER Frédéric  
LE MONIES DE SAGAZAN Henri  
MOATTI Marie  
MONFORT David  
NIEBEL Vincent  
PELISSIER Simon  
PRAUD Clément  
VAAST Guillaume  
VIETTE Arnaud

#### *FRAMATOME*

HAMY Jean-Marie  
REBEYROLLE Véronique

#### *ITER*

PERRIER Gilles

## *ORANO*

ALAMEDA Célia  
BLANC Véronique  
BON Julien  
BRAMATO Anthony  
CHAMBRETTE Pierre  
DARVEY Fabrice  
DELAMARE-LAVENU Marie-Pierre  
DUPIAS Victor  
EVANS Cécile  
GAGNER Laurent  
LE COADOU David  
LETOURNEL Sophie  
MARCELET Stéphane  
MITIFIOT Franck  
MOGGIA Fabrice  
PAOLI Aurélie  
ROMARY Jean-Michel  
SEROND Ana-Paula  
VIOLAS Céline  
TOUMOUCHE Yacine  
TRIBOUT-MAURIZI Anne

## *VEOLIA*

LUCAS-LAMOUREUX Christine

## *SOLVAY*

MATZ Pierre

## *AUTRES ECHANGES :*

70

---

## *ASNR*

BLANCHARDON Eric  
JAMBU Emilie  
SALMON Corine

## *HCEA*

BERGER Vincent

## ANNEXE V. LISTE DES DOCUMENTS TRANSMIS À LA COMMISSION EN 2025-2026

### *Andra*

- Newsletter du Mag de l'Andra – Juin 2025
- Newsletter du Mag de l'Andra – Juillet 2025
- Newsletter du Mag de l'Andra – Novembre 2025
- Newsletter du Mag de l'Andra – Décembre 2025
- Newsletter du Mag de l'Andra – Janvier 2026
- Dossier de chiffrage Cigéo édition Avril 2025
- Rapport d'activité 2024 – Octobre 2025
- Rapport d'avancement des travaux scientifiques, technologiques et supports réalisés au Centre de Meuse/Haute-Marne et ses alentours – 2024 – 12 septembre 2025
- Les essentiels 2026 de l'inventaire national des matières et déchets radioactifs

### *EDF*

- Études sur la modulation du parc nucléaire – Impacts industriels, organisationnels et sociaux – rapport du 16 février 2026
- Rapport de l'Inspecteur général pour la sûreté nucléaire et la radioprotection 2025

---

71

### *CEA*

- Rapport annuel d'activité 2025 de l'Inspection générale nucléaire – Avril 2026

### *Haut-Comité de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur*

- Rapport d'évaluation du CEA – Octobre 2025

La Commission s'est également appuyée sur les informations pertinentes disponibles dans la littérature ouverte.



## ANNEXE VI. LISTE DES RECOMMANDATIONS ÉMISES PAR LA COMMISSION DANS SON RAPPORT SUR LE DOSSIER DE DEMANDE D'AUTORISATION DE CRÉATION DE CIGÉO

*La Commission recommande que l'Andra achève la mise au point de son concept de scellement en programmant des démonstrateurs d'ensemble in situ.*

*La Commission recommande que l'Andra précise sa stratégie de monitoring et de surveillance avant la mise en service du stockage.*

*La Commission recommande que, dans une approche prudente, l'Andra établisse et teste des procédures de réparation des structures de génie civil endommagées.*

*La Commission observe que dans un cas au moins (dimensionnement thermique des alvéoles MAVL), les résultats des études ont conduit à remplacer une des hypothèses conservatives par une disposition supplémentaire de sûreté de nature organisationnelle. La Commission observe qu'il est dès lors essentiel de s'assurer de la pérennité de l'application effective de cette disposition pendant toute l'exploitation du stockage. La Commission recommande que cette disposition soit très précisément documentée et assortie d'un dispositif de contrôle robuste dans la durée.*

*La Commission estime que les critères de réussite de la Phipil proposés par l'Andra sont pertinents. Elle recommande toutefois d'y ajouter la démonstration de la cadence atteignable par l'installation.*

*La Commission recommande que le nombre de colis stockés pendant la phase industrielle pilote et la durée de celle-ci soient suffisants pour apprécier la capacité de l'installation à absorber des aléas (perturbations de livraison, pannes de l'installation, etc.) et en particulier démontrer que la capacité d'entreposage tampon sur site est suffisante.*

*La Commission recommande que la procédure de fin de Phipil, incluant les critères de réussite et leur mode d'évaluation, soit fixée dans le décret d'autorisation de création.*

*L'Andra propose de ne pas interrompre les opérations de mise en stockage pendant l'instruction du rapport de fin de Phipil. La Commission recommande que cette proposition soit acceptée afin que l'activité ne soit pas mise en sommeil pendant un laps de temps risquant d'être préjudiciable au maintien de la capacité opérationnelle de l'installation.*

*Compte tenu de la durée inhérente aux procédures administratives qui seront mises en œuvre après la parution du rapport de fin de Phipil, la Commission recommande de ne pas limiter le nombre de colis qui seront stockés au titre de la première autorisation de mise en service.*

*La Commission recommande que l'assurance de la capacité de récupérer un colis HA soit apportée par un essai dans un alvéole de longueur égale à celle qui sera retenue pour le quartier de stockage HA.*

*La Commission recommande de dissocier les études d'adaptabilité de l'instruction de la demande d'autorisation de création, qui ne porte que sur le stockage de l'inventaire de référence.*

*La Commission recommande fortement de maintenir une capacité de R&D de haut niveau à l'Andra sur le stockage géologique profond, incluant des moyens d'expérimentation in situ, bien au-delà de la mise en service du stockage et de la Phipil.*

*La Commission recommande la poursuite des actions de recherche conduites sur des matériaux innovants. Ces recherches prospectives peuvent alimenter des évolutions du concept si elles s'avèrent utiles.*

*La Commission recommande de poursuivre les études sur la production d'hydrogène dans les alvéoles HA en conditions d'exploitation en vue d'optimiser la maîtrise du risque de formation d'une atmosphère explosive.*

*La Commission recommande que les conservatismes soient réévalués lors de l'instruction des évaluations futures du stockage à la lumière de la progression des connaissances.*

*La Commission observe que les incertitudes sont abordées dans le dossier indépendamment paramètre par paramètre. À l'appui de la future mise en service, la Commission recommande de poursuivre les études en utilisant des méthodes de traitement multiparamétriques (de type Monte Carlo).*

*La Commission recommande que les évaluations de sûreté déterministes soient, notamment en vue des optimisations futures du système de stockage, enrichies par des évaluations probabilistes pour tout ou partie du stockage, en particulier en définissant les fonctions de densité de probabilité des paramètres dans leur domaine de variation.*

*La Commission estime que l'étude d'impact apparaît complète et convaincante. Elle recommande que les versions ultérieures adoptent autant que possible un format plus compact, limité aux rubriques du format imposé, afin d'améliorer sa lisibilité.*

# COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION

Membres de la Commission Nationale d'Évaluation :

**Christophe FOURNIER**

**Philippe GAILLOCHET**

**Jean-Paul GLATZ**

**Saida LAÂROUCHI-ENGSTRÖM**

**Virginie MARRY**

**José Luis MARTINEZ**

**Jean-Paul MINON**

**Catherine NOIRIEL**

**Céline PERLOT-BASCOULES**

**Christophe POINSSOT**

**Aude POMMERET**

Président honoraire

**Jean-Claude DUPLESSY**

Conseillers de la Commission

**Robert GUILLAUMONT**

**Emmanuel LEDOUX**

**Maurice LEROY**

Secrétaire général & Conseiller scientifique :

**Frédéric LAUNEAU**

Secrétariat administratif :

**Véronique ADA-FAUCHEUX**

**Florence LEDOUX**

# COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION

Présidente : **Saida LAÂROUCHI-ENGSTRÖM**

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

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

**[www.cne2.fr](http://www.cne2.fr)**

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

ISSN : 2257-5758