

# 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° 16

**Juin 2022**



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° 16

JUIN 2022



## TABLE DES MATIÈRES

<b>RESUMÉ - CONCLUSION</b> .....	<b>5</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>9</b>
<b>CHAPITRE I : PANORAMA INTERNATIONAL - CHANGEMENT DE PARADIGME OU CONTINUITÉ ?</b> .....	<b>11</b>
1.1    UNE VISION DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE EN MUTATION.....	11
1.1.1 <i>L'évolution des réacteurs depuis les débuts de l'énergie nucléaire</i> .....	11
1.1.2 <i>L'amorce d'un changement de paradigme</i> .....	11
1.2    DANS LE MONDE ANGLO-SAXON, UN FOISONNEMENT D'ÉTUDES .....	12
1.3    EN RUSSIE ET EN ASIE : LA POURSUITE D'UNE STRATÉGIE DE SOUVERAINETÉ .....	13
1.4    DANS L'UNION EUROPÉENNE (HORS FRANCE), DES AVANCÉES SUR LA GESTION DES COMBUSTIBLES USÉS CONSIDÉRÉS COMME DÉCHETS.....	14
1.5    LE CAS DES PAYS PRIMO-ACCÉDANTS.....	14
1.6    CONCLUSION : LES GRANDS PRINCIPES GUIDANT LES CHOIX NATIONAUX.....	15
<b>CHAPITRE II : LES NOUVEAUX RÉACTEURS ET LES CYCLES DU COMBUSTIBLE</b> .....	<b>17</b>
2.1    INTRODUCTION : LA STRATÉGIE FRANÇAISE EN MATIÈRE DE RÉACTEURS ET DE CYCLE .....	17
2.2    ÉTAT DES LIEUX DES ÉTUDES DE RÉACTEURS NUCLÉAIRES EN FRANCE .....	18
2.2.1 <i>Les études de réacteurs en cours en France ou avec participation française</i> .....	18
2.2.2 <i>Conclusions et recommandations de la Commission sur les études de réacteurs</i> .....	20
2.3    LES STRATÉGIES DE GESTION DU CYCLE .....	20
2.3.1 <i>A l'étranger, deux grandes options pour la gestion du cycle</i> .....	20
2.3.2 <i>En France, une stratégie de gestion du cycle devenue hésitante</i> .....	21
2.3.3 <i>Des cycles à inventer pour certains types de réacteurs</i> .....	22
2.3.4 <i>Les conclusions et recommandations de la Commission sur la gestion du cycle en France...</i>	22
2.4    LES INSTALLATIONS INDUSTRIELLES DU CYCLE.....	23
2.4.1 <i>A l'étranger, des outils industriels encore peu développés</i> .....	23
2.4.2 <i>En France, des installations en attente d'une décision majeure</i> .....	23
2.4.3 <i>Les conclusions et recommandations de la Commission sur l'outil industriel</i> .....	24
<b>CHAPITRE III : LES DÉCHETS ET LEURS FILIÈRES DE GESTION</b> .....	<b>25</b>
3.1    INTRODUCTION .....	25
3.2    LES DÉCHETS HAVL .....	25
3.2.1 <i>Le stockage géologique : le projet Cigéo</i> .....	25
3.2.2 <i>La question des entreposages d'attente</i> .....	27
3.2.3 <i>L'entreposage de longue durée n'est pas une alternative au stockage géologique</i> .....	28
3.2.4 <i>La transmutation n'est pas une alternative au stockage géologique</i> .....	28
3.3    LES DÉCHETS MAVL .....	30
3.4    LES DÉCHETS FAVL .....	31
3.5    LES DÉCHETS TFA.....	33
3.5.1 <i>Les opérations d'assainissement et démantèlement : rappel des recommandations de la Commission</i> .....	33
3.5.2 <i>Les perspectives d'extension des capacités de stockage des déchets TFA</i> .....	33
3.5.3 <i>Les recherches conduites ou à conduire pour réduire le volume des déchets TFA</i> .....	34
<b>CHAPITRE IV : FORMATION, EXPERTISE ET COMPÉTENCES</b> .....	<b>35</b>
4.1    INTRODUCTION .....	35
4.2    LA FORMATION UNIVERSITAIRE ET LA RECHERCHE EN RELATION AVEC LA STRATÉGIE DE LA FILIÈRE.....	35
4.3    LE VEROU DES INSTALLATIONS POUR LA RECHERCHE .....	36
4.4    LA DYNAMIQUE DE LA FILIÈRE NUCLÉAIRE, UNE CONDITION NÉCESSAIRE POUR MAINTENIR ET DÉVELOPPER LES COMPÉTENCES .....	37

<b>GLOSSAIRE .....</b>	<b>39</b>
<b>ANNEXE I : COMPOSITION DE LA COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION .....</b>	<b>43</b>
<b>ANNEXE II : ACTIVITÉ DE LA COMMISSION .....</b>	<b>45</b>
<b>ANNEXE III : AUDITIONS REALISÉES PAR LA COMMISSION .....</b>	<b>47</b>
<b>ANNEXE IV : LISTE DES PERSONNES AUDITIONNÉES PAR LA COMMISSION.....</b>	<b>49</b>
<b>ANNEXE V : PRÉSENTATIONS ET VISITES DE LA COMMISSION.....</b>	<b>51</b>
<b>ANNEXE VI : LISTE DES DOCUMENTS TRANSMIS À LA COMMISSION EN 2021-2022 .....</b>	<b>53</b>
<b>ANNEXE VII : SAISINE DE LA CNE PAR L'OPECST .....</b>	<b>55</b>
<b>ANNEXE VIII : LES PRINCIPAUX TYPES DE RÉACTEURS EXISTANTS OU À L'ÉTUDE.....</b>	<b>57</b>
<b>ANNEXE IX : FICHES DE SYNTHÈSE PUBLIÉES PAR LA CNE EN MARS 2022.....</b>	<b>65</b>





## RESUMÉ - CONCLUSION

La stratégie française en matière de production électronucléaire a été définie pour l'essentiel dans les années 70 pour répondre à un objectif de souveraineté énergétique. Elle s'est matérialisée par le développement d'un parc de réacteurs à neutrons thermiques. Cette stratégie visait également la fermeture progressive du cycle du combustible, avec l'utilisation de réacteurs à neutrons rapides en recyclant le plutonium issu du retraitement des combustibles usés et l'uranium appauvri résultant du processus d'enrichissement. Cette stratégie française vient de subir deux inflexions :

- La première découle de l'objectif de maîtrise du coût de l'électricité dans un contexte de disponibilité de l'uranium à faible prix sur les marchés. Elle a conduit à repousser le déploiement de réacteurs à neutrons rapides au siècle prochain.
- La seconde est liée aux impératifs de lutte contre le changement climatique et à l'augmentation attendue des besoins en énergie électrique. Il est nécessaire de disposer d'une énergie pilotable, faiblement émettrice de gaz à effet de serre, pour favoriser la transition vers un mix énergétique décarboné. Le déploiement de nouveaux réacteurs, avec leur cycle du combustible associé, pourrait constituer une réponse adaptée.

De nouvelles orientations se dessinent peu à peu au travers des impulsions données par la puissance publique. Elles engageront les industriels et la R&D pour plusieurs dizaines d'années. C'est pourquoi la Commission a jugé utile de consacrer ce rapport à un panorama de l'état des études et recherches le plus large possible. Il débute par une revue du contexte international pour mieux éclairer les décisions à venir.

### UN CHANGEMENT DE PARADIGME AU NIVEAU MONDIAL

La stratégie développée par le monde anglo-saxon repose sur deux objectifs. Le premier, essentiellement d'ordre économique, concerne la conquête du marché ouvert par l'urgence climatique, qui comprend en particulier le remplacement des centrales électriques à charbon. Le second, d'ordre géopolitique, vise à concurrencer la Chine et la Russie auprès de nouveaux pays désireux de se doter d'une capacité nucléaire pour la fourniture d'énergie. Dans les deux cas, les réacteurs envisagés sont principalement de faible puissance et modulaires. Pour ce qui concerne l'aval du cycle, les pays anglo-saxons ont tous choisi un cycle ouvert : les combustibles usés sont maintenus en entreposage et destinés au stockage direct.

La Russie et les principales puissances asiatiques poursuivent prioritairement des objectifs de souveraineté énergétique, sans exclure une certaine ambition commerciale. Cet objectif majeur les conduit à rechercher la fermeture du cycle du combustible pour valoriser le contenu énergétique des combustibles usés. En ce qui concerne les petits réacteurs modulaires, la Russie a déjà réalisé deux réacteurs sur barge de 35 MWe qui sont opérationnels.

L'Europe privilégie le soutien à la fusion nucléaire par rapport à la fission. Cette région du monde est par ailleurs la seule où des avancées réelles sont obtenues sur le stockage des déchets de haute activité à vie longue. Les travaux sur les réacteurs innovants basés sur la fission n'y dépassent guère les études et recherches très amont.

La Commission retient de ce panorama trois observations majeures. D'abord, il existe une dynamique importante autour de la conception de petits réacteurs modulaires et éventuellement innovants. Ensuite, les enjeux liés au cycle du combustible sont notoirement absents, en cohérence avec une politique de cycle ouvert. Enfin, l'augmentation de la demande d'énergie électronucléaire pourrait annoncer un accroissement significatif de la consommation globale d'uranium. Les principales sources d'approvisionnement sont en Australie, en Amérique du Nord, en Asie centrale et en Afrique. La Commission estime que l'évolution de la demande en uranium naturel est susceptible de remettre en question l'hypothèse d'une matière abondante et bon marché.

## LES NOUVEAUX RÉACTEURS ET LES CYCLES DU COMBUSTIBLE EN FRANCE

Les réacteurs de petite taille présentent de nombreux avantages en matière de sûreté. La France cherche sa place dans le foisonnement international de développement des petits réacteurs modulaires en poursuivant deux voies.

La première concerne les petits réacteurs à neutrons thermiques (projet NUWARD). La Commission soutient ce projet et recommande de le mener à bien dans les meilleurs délais. La Commission suggère néanmoins de simplifier au maximum la conception de NUWARD en s'appuyant exclusivement sur des technologies matures. Elle recommande par ailleurs que l'on conduise une étude de l'impact de tels réacteurs sur le cycle du combustible en France.

La deuxième voie est principalement l'étude de petits réacteurs modulaires à neutrons rapides refroidis au sodium. Elle combine les avantages des petits réacteurs en matière de gain de sûreté et la valorisation de l'expérience acquise par la France dans cette filière. La Commission recommande d'amplifier la mobilisation des acteurs pour aboutir à un projet concret dans le cadre de France 2030. La Commission considère enfin que le niveau de maturité technologique très modeste des projets de microréacteurs et de réacteurs à sels fondus rend peu crédibles les calendriers ambitieux qui sont annoncés.

S'agissant de la gestion du cycle du combustible, deux options sont possibles : celle de la fermeture à terme du cycle et celle de l'abandon du recyclage du combustible. Le choix doit être fait au plus tard lorsque les usines du cycle nécessiteront des décisions d'investissements significatifs, c'est-à-dire bien avant 2040. Il s'agit d'un arbitrage de priorité entre la souveraineté énergétique d'une part, et la limitation des investissements à consentir et donc du coût de l'électricité d'autre part, sous réserve de disposer d'uranium accessible et à bas prix. La Commission recommande que ce choix stratégique soit arbitré au plus tôt, pour orienter l'ensemble des efforts dans la direction souhaitée. Le devenir des installations industrielles découlera directement du choix du scénario pour l'aval du cycle du combustible.

6

Si la stratégie de fermeture du cycle est réaffirmée, alors il faut poursuivre l'étude de petits réacteurs à neutrons rapides. Dans le cas contraire, il convient d'étudier le stockage des combustibles usés et l'impact que ce changement de stratégie aurait sur Cigéo. Dans les deux cas, la Commission ne voit pas d'intérêt significatif à l'étape intermédiaire du multi-recyclage en réacteur à eau pressurisée (REP).

## LES DÉCHETS ET LEURS FILIÈRES DE GESTION EN FRANCE

Il est essentiel d'établir à l'appui de toute décision concernant l'évolution du parc électronucléaire une politique claire définissant les entreposages intermédiaires et le stockage pour accueillir de façon pérenne les déchets ultimes.

S'agissant des déchets de haute et moyenne activité à vie longue, toutes les conditions scientifiques et techniques sont réunies pour un dépôt sans délai de la demande d'autorisation de construction (DAC) de l'installation de stockage Cigéo.

L'entreposage dit pérenne n'est pas passif. Il exige une surveillance continue et un reconditionnement périodique des déchets. Il transfère aux générations futures la charge de protéger l'homme et l'environnement, en présupposant qu'elles conserveront la capacité technique et financière pour gérer les déchets. Aucune solution d'entreposage ne peut constituer une alternative au stockage géologique.

A ce jour, il n'existe aucune alternative crédible au stockage géologique des déchets de haute et moyenne activité à vie longue. Les alternatives invoquées s'appuient en réalité sur différentes stratégies de transmutation de certains actinides mineurs, à des niveaux de développement peu avancés. La transmutation ne permet pas de s'affranchir d'un stockage géologique. Elle pourrait

cependant offrir une opportunité de réduire l'emprise des stockages géologiques en diminuant la puissance thermique des colis de déchets de haute activité. Cela supposerait de lever de nombreux verrous technologiques et de maintenir pendant plusieurs siècles un parc de réacteurs nucléaires approprié.

L'entreposage d'attente pour refroidissement est une étape industrielle transitoire dans la chaîne de gestion du combustible. La Commission recommande que les études sur le vieillissement des combustibles et sur les infrastructures d'entreposage soient renforcées afin de garantir que les combustibles pourront être repris et manipulés, que cela soit pour être retraités ou stockés.

Les déchets de faible activité et à vie longue sont des déchets athermiques de faible nocivité, de natures variées et en volume important. Leur faible radiotoxicité conduit l'Andra à envisager leur stockage à quelques dizaines de mètres de profondeur. Au-delà de quelques dizaines de milliers d'années, la vérification des fonctions de sûreté repose sur l'utilisation de scénarios conventionnels qui devront être définis en concertation avec l'autorité de sûreté.

La plus grande partie des déchets de très faible activité (TFA) est produite par les opérations d'assainissement et démantèlement (A&D) d'installations nucléaires. La Commission encourage les opérateurs à renforcer leur coopération sur les opérations d'A&D pour gagner en efficacité. Le volume de déchets TFA à l'arrêt du parc actuel dépassera les capacités disponibles des sites de stockage. Les projets d'extension de sites existants et de création de nouveaux sites doivent être engagés avec des marges calendaires suffisantes pour éviter tout ralentissement des opérations de démantèlement.

## FORMATION, EXPERTISE ET COMPÉTENCES

La formation et le développement de l'expertise scientifique et technologique sont des conditions *sine qua non* pour garantir une gestion sûre et performante du parc. Elles le sont aussi pour conduire des études et recherches sur des projets concrets et innovants. Pour attirer de nouveaux talents vers la filière et la R&D, il est indispensable d'afficher une ambition claire de poursuite du développement d'une industrie nucléaire dans le mix énergétique décarboné.

Pour l'élaboration et le déploiement d'une stratégie électronucléaire, la Commission recommande de prêter une attention égale à la disponibilité des ressources humaines, à celle des infrastructures de recherche, notamment des moyens d'irradiation, et enfin à la dynamique industrielle. Les trois calendriers qui en résultent et les financements associés doivent être cohérents sous peine de mettre en danger les objectifs assignés à la filière nucléaire.







## INTRODUCTION

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

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

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

\*\*\*

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

La Commission évalue les recherches et formule des recommandations (*cf.* annexe 2). Pour cela, elle auditionne régulièrement les acteurs de la recherche, organise des visites techniques (*cf.* annexes 3, 4 et 5) et analyse les documents portés à sa connaissance (*cf.* annexe 6).

De nouvelles directions stratégiques se dessinent peu à peu au travers des impulsions données par la puissance publique (plan France relance, programme France 2030, soutien au projet NUWARD, annonce concernant de nouvelles tranches EPR, ...). Ces choix, s'ils sont confirmés, engageront les acteurs industriels et la R&D pour plusieurs dizaines d'années et tous les sujets relatifs au cycle des matières et des déchets radioactifs seront impactés. La Commission a jugé utile de présenter une évaluation de l'état des études et recherches la plus large possible, en s'appuyant sur une synthèse des principales recommandations formulées au cours de ces cinq dernières années (*cf.* annexe 9).

Le premier chapitre (complété par l'annexe 8) propose une vision synthétique des stratégies et des mutations engagées par les pays disposant d'installations électronucléaires dans le monde. Les ambitions sont diverses et les modalités déployées pour les atteindre reposent sur des leviers très différents selon les pays. Ce panorama international appelle un regard critique sur les objectifs poursuivis et les travaux engagés par notre pays.

Le deuxième chapitre consacré au cas de la France met en perspective la variété des projets de réacteurs proposés au regard de leurs implications sur le cycle du combustible.

Dans le troisième chapitre, la Commission rappelle qu'il est essentiel d'établir une politique claire sur la gestion des déchets, avant toute décision concernant l'évolution du parc électronucléaire. Il convient en effet de définir les exutoires dans le respect de valeurs éthiques : les entreposages intermédiaires, le recyclage des matières valorisables, le stockage accueillant de façon sûre et pérenne les déchets ultimes.

Le quatrième chapitre souligne l'importance de disposer de chercheurs et ingénieurs bien formés et créatifs pour mettre en œuvre une gestion durable et responsable des matières et déchets radioactifs. Il est tout aussi important de bénéficier d'un parc d'infrastructures de recherche pour le volet expérimental inhérent au développement de toute filière industrielle, et enfin d'un écosystème attractif de PME et ETI proposant des projets innovants aux jeunes talents.

L'année 2022 a également été marquée par la préparation du 5<sup>ème</sup> plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR) dont la gouvernance a significativement évolué. Ce sujet a fait l'objet de deux auditions de la Commission par l'OPECST (le 25 novembre 2021 et le 18 janvier 2022) et d'un rapport parlementaire<sup>1</sup>.

Un autre rapport parlementaire consacré à l'étude des conséquences de l'arrêt du projet de réacteur de 4<sup>ème</sup> génération<sup>2</sup> est à l'origine d'une saisine de la Commission par l'OPECST (cf. annexe 7) : l'Office a demandé que la Commission évalue dorénavant *l'impact des réacteurs innovants et des scénarios d'évolution du parc électronucléaire sur le cycle des matières et des déchets radioactifs*.

Pour ce 16<sup>ème</sup> rapport, la Commission a tenu compte des documents qui lui ont été transmis jusqu'à la date du 15 avril 2022.

---

<sup>1</sup> Rapport au nom de l'OPECST de Mme Émilie CARIOU, députée, et M. Bruno SIDO, sénateur, sur la préparation de la cinquième édition du plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR), 3 mars 2022, n° 5144 (Assemblée nationale) et n° 560 (Sénat.)

<sup>2</sup> Rapport au nom de l'OPECST de M. Thomas GASSILLOUD, député, et M. Stéphane PIEDNOIR, sénateur, sur l'énergie nucléaire du futur et les conséquences de l'abandon du projet de réacteur nucléaire de 4e génération « Astrid », 8 juillet 2021, n° 4331 (Assemblée nationale) et n° 758 (Sénat.)

# CHAPITRE I : PANORAMA INTERNATIONAL - CHANGEMENT DE PARADIGME OU CONTINUITÉ ?

## 1.1 UNE VISION DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE EN MUTATION

### 1.1.1 L'évolution des réacteurs depuis les débuts de l'énergie nucléaire

Les premiers réacteurs électronucléaires, dérivés des réacteurs dédiés à la propulsion navale, ont été conçus dans les années 1950 et 1960 et sont entrés en service avant 1970. Ce sont les réacteurs dits de génération I dont le rôle principal était de démontrer la viabilité et le potentiel industriel de la production d'électricité à partir de l'énergie de fission libérée dans un combustible à uranium. Dans les années 1970, suite notamment aux différents chocs pétroliers et dans le but de diminuer la dépendance au pétrole, la production d'électricité d'origine nucléaire augmente rapidement ainsi que la puissance des réacteurs. La filière à neutrons thermiques (RNT) où l'eau légère joue le rôle de modérateur et de caloporteur (eau pressurisée, REP, ou eau bouillante, REB) s'impose dans la plupart des pays. Les réacteurs de cette filière, de génération II, constituent la majeure partie des réacteurs en service aujourd'hui. Les accidents survenus à Three Mile Island (1979), Tchernobyl (1986) et Fukushima (2011), ont motivé de nouveaux développements visant à améliorer de façon significative la sûreté des réacteurs : utilisation de systèmes passifs en toutes circonstances, prise en compte des accidents graves dès la conception, et résistance accrue des combustibles aux accidents. Les réacteurs en résultant, de génération III et III+, sont les seuls à être construits aujourd'hui. Leur robustesse pourrait aussi permettre par conception une durée d'exploitation plus longue.

Les concepts des prochains réacteurs, dits de génération IV, sont élaborés de manière à améliorer encore la sûreté et assurer la maîtrise du cycle de combustible, tant en amont qu'en aval des réacteurs. Ces réacteurs sont à neutrons thermiques, comme la majorité des réacteurs actuels, ou à neutrons rapides (RNR). Selon leur puissance, le choix du combustible et celui du caloporteur, ils sont destinés à produire de l'électricité, de la chaleur, ou éventuellement de l'hydrogène.

Les réacteurs de générations III et III+ ont atteint pour la plupart leur maturité technologique entre la fin des années 1990 et le début des années 2020, c'est-à-dire en trente ans, au prix d'un grand effort de la part des opérateurs. Les réacteurs de génération IV devraient atteindre leur maturité technologique au plus tôt entre 2030 et 2040.

### 1.1.2 L'amorce d'un changement de paradigme

Depuis 1988, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) analyse les travaux de recherche qui concernent le changement du climat de la Terre et formule des recommandations à destination des décideurs politiques. Dans son rapport publié le 8 octobre 2018, le GIEC examine de nombreux scénarios visant à limiter le réchauffement moyen de la Terre à 1,5°C par rapport à l'ère préindustrielle. Dans ce cadre, l'électrification de nombreux secteurs de l'industrie, du transport et des services domestiques et une numérisation croissante du monde sont des facteurs clés. Une telle évolution exigera un accroissement important et rapide de la capacité de production d'électricité. Le rapport du GIEC publié le 4 avril 2022 considère que le recours à l'énergie nucléaire est un des moyens à disposition pour limiter le réchauffement climatique.

Le 2 février 2022, considérant que l'énergie nucléaire est une énergie de transition décarbonée permettant de réduire les émissions de gaz à effet de serre, la Commission européenne a pris un acte délégué ayant pour but notamment d'inclure l'énergie nucléaire dans la taxinomie verte de l'Union. Dans ce cadre, l'énergie nucléaire peut être utilisée pour la production d'électricité et/ou de

chaleur, ou encore d'hydrogène (électrolyse haute température par exemple). Cette décision, qui est actuellement soumise à l'examen du Parlement et des États membres, est toutefois assortie des conditions suivantes : présenter les plans pour disposer d'ici 2050 d'une installation de stockage géologique des déchets de haute activité, et d'ici 2025, de combustibles nucléaires tolérants aux accidents.

Le recours à l'énergie nucléaire ne se conçoit que dans une optique de stabilité économique et de long terme. En effet, l'énergie électronucléaire, telle que déployée aujourd'hui, en particulier dans les pays à économie de marché, nécessite des investissements privés initiaux importants avec une rentabilité faible et tardive ce qui rend les investisseurs réticents. Il est donc impératif d'innover pour développer des technologies nucléaires compétitives sur le marché de l'énergie, moins exigeantes en investissements, plus flexibles et plus rapides à déployer que le « nucléaire d'hier », tout en maintenant un haut niveau de sûreté.

## 1.2 DANS LE MONDE ANGLO-SAXON, UN FOISONNEMENT D'ÉTUDES

Les États-Unis ont pour politique de prolonger le plus possible la durée de vie des réacteurs existants. C'est ainsi que les premières prolongations d'exploitation à 80 ans viennent d'être autorisées. Parallèlement, ils cherchent à reconquérir une position dominante cédée de fait aux Russes et aux Chinois. A cette fin, ils misent sur l'innovation, développée dans un écosystème associant le dynamisme de start-ups financées par des investissements privés à un soutien technique et financier considérable des pouvoirs publics. Il en résulte un foisonnement d'études, de recherches et de projets de prototypes visant à mettre en œuvre une stratégie majoritairement économique et commerciale pour répondre au défi de l'intégration de l'énergie nucléaire dans un mix énergétique décarboné.

12

Les lignes directrices à la base de ces études et recherches sont les suivantes :

- Réduire la puissance unitaire du réacteur.
- Améliorer la sûreté, notamment en faisant appel au plan technique à des systèmes passifs, en diminuant les risques de défaillance et les conséquences des événements d'origine externe et en diminuant le terme source pour contenir les effets d'un accident à l'intérieur du périmètre de l'installation.
- Améliorer et faciliter la construction en rendant la fabrication, le transport et la mise en place des composants plus aisés.
- Diminuer la durée (et donc le coût) de construction par l'utilisation d'éléments modulaires fabriqués en série en usine.
- Faciliter le suivi de charge pour répondre aux variations des énergies intermittentes.
- Minimiser les déchets nucléaires.
- Se positionner sur les marchés de la chaleur, de la production d'hydrogène et du dessalement de l'eau de mer.
- Utiliser au mieux les ressources en uranium.

Les réacteurs envisagés sont pour la majorité d'entre eux de faible puissance<sup>3</sup> appelés SMR (*small modular reactors*), parmi lesquels certains de technologie avancée sont dits AMR<sup>4</sup> (*advanced modular reactors*) de types très variés (neutrons thermiques ou rapides, combustible solide ou liquide, caloporteurs également variés tels que l'eau, les métaux liquides, les sels fondus ou les gaz). Certains prototypes pourraient être réalisés vers la fin de la décennie (cf. annexe 8 basée sur des données de l'AIEA de 2020). Le Canada est partie prenante de la démarche lancée par les États-Unis avec un écosystème industriel très dynamique et une implication marquée des autorités

---

<sup>3</sup> 10 à 300 MWe

<sup>4</sup> Voir annexe 8

de sûreté de ces deux pays. Ceux-ci affichent une politique volontariste en matière d'exportation de SMR.

Pour remplacer ses réacteurs en fin de vie, le Royaume-Uni conduit également un programme ambitieux de construction à court terme de réacteurs de puissance (dont des EPR) et à moyen terme de SMR. En ce qui concerne les AMR, la filière des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na) est abandonnée au profit de la filière à neutrons thermiques haute température (HTR) ; un prototype à combustible solide (boulets), modéré au graphite et refroidi au gaz, est annoncé à l'horizon 2030.

Pour ce qui concerne l'aval du cycle, les pays anglo-saxons ont tous choisi un cycle ouvert : les combustibles usés sont maintenus en entreposage et destinés *in fine* au stockage direct, sans qu'on observe de progrès dans la démarche de réalisation de tels stockages. Par ailleurs, dans le foisonnement actuel des concepts de réacteurs modulaires à l'étude, dont le niveau de maturité est encore faible, peu d'attention a, jusqu'à présent, été accordée au cycle du combustible qui doit y être associé.

Bon nombre de concepts font appel à des combustibles haute densité (HALEU : *high-assay low enriched uranium*) enrichis entre 5 à 20 % en U235. Ce choix nécessitera le développement et la mise en place d'une chaîne de production industrielle de HALEU et d'une gestion des combustibles usés qui n'existent pas aujourd'hui.

### 1.3 EN RUSSIE ET EN ASIE : LA POURSUITE D'UNE STRATÉGIE DE SOUVERAINETÉ

La Chine, l'Inde, la Russie, et (à un moindre degré) le Japon, poursuivent la mise en œuvre de leur stratégie traditionnelle qui privilégie la souveraineté énergétique. Cet objectif majeur les conduit à rechercher la fermeture du cycle du combustible dans un but de valorisation du contenu énergétique des combustibles usés en recourant aux combustibles MOX, utilisant uranium et plutonium, pour les réacteurs à neutrons thermiques, puis, à terme, pour des réacteurs à neutrons rapides. Pour ces pays qui étudient (ou commencent à mettre en œuvre) le retraitement du combustible usé UOx pour utiliser le plutonium et l'uranium de retraitement, le développement industriel de nouveaux concepts de réacteurs et de combustibles va requérir la réalisation d'un outil industriel de gestion de l'aval du cycle.

Le développement de l'énergie nucléaire en Chine s'étend des réacteurs classiques à neutrons thermiques jusqu'à des recherches importantes sur la fusion, en passant par les SMR et les RNR. La Chine poursuit ses avancées volontaristes de construction de SMR de tous les types. Elle se positionne comme précurseur dans de nombreux domaines : réacteur haute température à combustible Triso (HTR-PM) qui a divergé fin 2021, construction en parallèle d'un SMR à eau pressurisée de 125 MWe (ACP-100) annoncé comme le premier SMR commercial au monde, d'un RNR-Na (CFR600) et de réacteurs à sels fondus de quelques MWe (TMSR-SF1 et TMSR-LF1).

L'Inde étend actuellement son parc électronucléaire avec des réacteurs à neutrons thermiques de conception russe (type VVER) ou des réacteurs modérés à l'eau lourde et refroidis à l'eau légère pressurisée de conception nationale (PHWR). Par ailleurs, elle développe un programme de RNR-Na et un réacteur avancé à eau lourde (AHWR) conçu pour un cycle de combustible au thorium.

La Russie conduit une recherche très active dans toutes les directions. Deux réacteurs RNR-Na de puissance sont en service et un réacteur à caloporteur plomb est en construction. Le réacteur expérimental (RNR-Na) BOR 60, en fin de vie, doit être remplacé par un nouveau réacteur de même technologie baptisé MBIR. Concernant des réacteurs plus petits, la Russie a déjà réalisé deux SMR de 35 MWe sur barges qui sont opérationnels, tandis qu'un MMR (micro-modular reactor) à sels fondus de 10 MWe est envisagé pour étudier la transmutation des actinides mineurs (cf. annexe 8).

## 1.4 DANS L'UNION EUROPÉENNE (HORS FRANCE), DES AVANCÉES SUR LA GESTION DES COMBUSTIBLES USÉS CONSIDÉRÉS COMME DÉCHETS

Au sein de l'Union européenne, on n'observe pas de renouveau des recherches sur l'énergie nucléaire comparable à ce qui existe ailleurs dans le monde, et il est trop tôt pour prévoir l'impact que pourra avoir l'acte délégué récent de la Commission européenne sur la taxinomie. Les travaux conduits dans les différents organismes scientifiques ne dépassent guère la veille technologique ou des recherches très amont.

En revanche, l'Europe est la seule partie du monde où des avancées réelles ont été obtenues sur le stockage des combustibles usés dans les pays où ils sont considérés comme déchets.

Il existe un large consensus au sein de la communauté scientifique internationale pour considérer comme une solution sûre et faisable le stockage en couches géologiques profondes des déchets de haute et moyenne activité. Toutefois, la mise en œuvre de cette solution bute sur de multiples obstacles essentiellement liés à la difficulté d'obtenir un consensus au sein de la société et à l'absence de processus de gouvernance appropriés. On peut aussi observer, à travers les rares exemples en cours de développement, que le retour d'expérience acquis est essentiel, et ce dès le début de la construction. Il permet de conforter progressivement un référentiel technique et organisationnel important pour les phases ultérieures de construction et d'exploitation. Ce constat témoigne de la nécessité de démarrer concrètement les projets.

En 2000, considérant que le stockage était la solution la meilleure et la plus réaliste pour isoler les combustibles usés de la biosphère, le gouvernement finlandais a décidé que le stockage géologique, appelé ONKALO, des combustibles usés finlandais serait construit près de la centrale nucléaire de Olkiluoto dans la municipalité de Eurajoki. Les travaux de construction d'ONKALO ont commencé en juin 2004 par la construction du tunnel d'accès jusqu'à une profondeur de 420 m ; ils se sont ensuite poursuivis jusqu'à une profondeur de 520 m afin d'étudier les caractéristiques de la roche. La demande d'autorisation du stockage a été déposée en 2012 et l'autorisation accordée en 2015. En 2020, environ 10 km de galeries, ainsi que des cavités, avaient été creusés pour déposer les colis de stockage. La phase d'exploitation devrait commencer vers 2023. En 2019, la construction de l'installation de mise en conteneur a débuté ; cette installation devrait être opérationnelle en 2023. Le parlement finlandais approuve à une large majorité les décisions prises par le gouvernement.

En Suède, après 40 ans de recherche et développement, près de 30 ans de dialogue avec les parties prenantes et 11 ans d'examen par les autorités de la demande de SKB de construire un stockage pour le combustible usé, le gouvernement a pris la décision, le 27 janvier 2022, d'autoriser la construction du stockage géologique profond. L'étape suivante du dossier consiste à fixer les conditions détaillées applicables à la construction et l'exploitation du stockage, ainsi qu'à l'installation de mise en conteneurs.

SKB travaille actuellement aux projets détaillés de construction en attente des permis et conditions d'exploitation. La construction devrait durer 10 ans.

## 1.5 LE CAS DES PAYS PRIMO-ACCÉDANTS

Quelques réacteurs de puissance ont été construits ces dernières années ou sont en construction dans des pays primo-accédants (Émirats Arabes Unis, Bangladesh, Turquie,) par des pays fournisseurs de technologies nucléaires (cf. annexe 8). D'autres sont planifiés (Égypte, Jordanie, Pologne). Le nombre de pays susceptibles d'accéder à une capacité nucléaire pour divers usages va probablement augmenter du fait de l'émergence du concept de SMR. Cette tendance pourrait accroître l'influence géopolitique des pays fournisseurs, au premier rang desquels les États-Unis, la Russie ou la Chine.

La Commission ne dispose d'aucune information sur la manière dont seraient gérés les combustibles usés et les déchets nucléaires dans les pays concernés. Le sujet fait cependant l'objet de discussions dans le cadre des initiatives internationales INPRO (AIEA) et IFNEC (AEN) entre pays fournisseurs et pays primo-accédants.

## 1.6 CONCLUSION : LES GRANDS PRINCIPES GUIDANT LES CHOIX NATIONAUX

Dans chaque pays, les recherches sur les différents aspects de l'énergie nucléaire gagnent à s'inscrire dans une stratégie globale, claire et assumée sur le long terme.

Aujourd'hui, la stratégie développée par le monde anglo-saxon repose sur deux objectifs. Le premier concerne la conquête du marché ouvert par l'urgence climatique, qui comprend en particulier le remplacement des centrales électriques à charbon. Le second privilégie l'idée de concurrencer la Chine et la Russie auprès des nouveaux pays désireux de se doter d'une capacité électronucléaire. La Russie et les principales puissances asiatiques poursuivent principalement des objectifs de souveraineté énergétique, sans exclure une certaine ambition à l'exportation. L'Union européenne, de son côté, bien que prenant conscience du changement de paradigme en cours, ne dispose pas actuellement d'une stratégie commune, ni de moyens pour la mettre en œuvre.

Dans tous les cas, la rationalité voudrait que la stratégie envisagée :

- Soit équilibrée, c'est-à-dire traite de façon holistique les réacteurs, le cycle associé et la gestion des déchets.
- Soit considérée dans la durée, à l'échelle séculaire, voire pluriséculaire.
- Soit réaliste, compte tenu des innovations, développements et investissements requis.

15

Les obstacles et enjeux sont nombreux.

- Les capacités d'expérimentation pour réaliser des études et recherches innovantes ne sont plus suffisantes car les réacteurs expérimentaux et les installations disponibles dans le monde pour couvrir les besoins de la recherche ont, pour la plupart, été construits il y a 40 ou 60 ans. Leur nombre est en diminution constante depuis au moins deux décennies, en particulier dans les pays de l'OCDE. De plus l'expertise, la connaissance et le savoir-faire se raréfient également. Le maintien en activité des installations existantes et la mise sur pied d'initiatives, de préférence dans un cadre international, destinées à mettre en place de nouvelles capacités d'expérimentation sont absolument indispensables aux recherches et développements envisagés. Les moyens expérimentaux doivent être à la hauteur des ambitions des programmes.
- La construction d'installations pilotes et de démonstrateurs est un élément essentiel pour l'établissement de la confiance dans les nouvelles technologies et la confirmation de leur viabilité industrielle. Les instruments internationaux pour répondre à ces besoins existent, mais sont actuellement sous-utilisés (entreprises communes AEN/OCDE et EURATOM). En général, les investissements lourds restent à la charge des Etats.
- La mise en place d'un processus d'innovation efficient demande que toutes les parties prenantes soient impliquées suffisamment tôt pour porter les acquis de la recherche scientifique et technologique à un niveau de maturité industrielle. Cela implique d'intégrer les aspects réglementaires et techniques dès le début, en associant les acteurs de la recherche et de l'industrie ainsi que les autorités réglementaires dans le développement, les expériences et essais, la validation et la qualification des technologies. La capacité d'introduire une demande de (pré)autorisation d'un concept auprès des autorités réglementaires est un indicateur clé de son degré de maturité.

- Si les réacteurs à venir ne sont pas compatibles avec l'utilisation de combustibles produits dans les usines actuelles, notamment en matière d'enrichissement en uranium 235 (<5 %) et de géométrie, de nouvelles installations devront être construites. Le concept de certains réacteurs prévoit l'utilisation de combustible HALEU dont l'enrichissement est compris entre 5 et 20 %. Ce type de combustible, actuellement destiné aux réacteurs de recherche et à la production d'isotopes pour la médecine nucléaire, n'est pas produit à l'échelle industrielle. Il est obtenu par dilution d'uranium hautement enrichi issu des programmes de désarmement. Le développement des réacteurs faisant appel à ce type de combustible sera fortement limité si l'on ne dispose pas d'usines de fabrication à l'horizon 2030-2040 lorsque le stock d'uranium hautement enrichi aura été épuisé. Les enjeux liés aux risques de prolifération sont également à considérer et pourraient freiner l'essor de ces combustibles. Un point d'attention est la disponibilité, requise en Europe à partir de 2025, de combustible résistant aux accidents. De tels combustibles ont été récemment chargés en réacteur commercial aux États-Unis en 2019 (Westinghouse) et 2021 (Framatome). Ils ont pour but d'améliorer la première barrière de sûreté en permettant de meilleures performances en conditions normales, transitoires et accidentelles.
- La volonté affichée par les pays qui retraitent le combustible usé d'aller vers un cycle du combustible fermé implique pour la plupart d'entre eux l'augmentation des capacités des installations existantes, mais aussi le développement de nouveaux procédés de retraitement. En effet il faut les adapter aux assemblages de combustibles, pour tenir compte de leur géométrie, de la nature chimique et de l'isotopie des combustibles usés. La diversité des SMR et des nouveaux cycles de combustible associés, encore incertains, demande probablement de repartir de la recherche fondamentale pour le recyclage des matières nucléaires. Enfin, le traitement en ligne du combustible liquide des réacteurs à sels fondus (molten salt reactor ou MSR) est à inventer.
- La gestion des déchets est un enjeu sociétal et technique majeur. Le stockage géologique est la solution préconisée par la communauté scientifique internationale et la réalisation des stockages est un élément de crédibilité incontournable pour la filière nucléaire. La taxinomie de l'Union européenne rappelle que l'entreposage n'est pas une solution définitive de gestion à long terme des déchets.

## CHAPITRE II : LES NOUVEAUX RÉACTEURS ET LES CYCLES DU COMBUSTIBLE

### 2.1 INTRODUCTION : LA STRATÉGIE FRANÇAISE EN MATIÈRE DE RÉACTEURS ET DE CYCLE

Après les débuts dans les années 1950, la stratégie française en matière de production électronucléaire a été pour l'essentiel définie dans les années 1970 dans le contexte dit des « chocs pétroliers » : elle répondait à l'objectif immédiat de souveraineté. Il s'agissait alors de relever le niveau d'indépendance énergétique du pays en réduisant très fortement la part des hydrocarbures dans la production d'électricité. Une démarche de fermeture progressive du cycle du combustible était prévue, s'appuyant sur l'utilisation de réacteurs à neutrons rapides (RNR) alimentés avec du plutonium et de l'uranium appauvri, ce qui devait permettre à terme de s'affranchir des importations d'uranium naturel tout en réduisant le volume de déchets de haute activité à gérer. Le mono-recyclage du combustible UOx usé pour fabriquer du combustible MOX (oxyde mixte d'uranium et de plutonium), tel qu'il est mis en œuvre depuis plusieurs années en France dans les réacteurs à neutrons thermiques (REP), a été la première étape en attendant le déploiement dans le futur d'un parc de réacteurs à neutrons rapides iso-générateurs en plutonium, respectant la non-prolifération. Cette étape de mono-recyclage est nécessairement longue afin d'accumuler le plutonium nécessaire au démarrage d'une filière de RNR. Les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na) étaient la voie privilégiée qu'avait retenue la France pour progresser vers la fermeture du cycle du combustible. C'était la raison d'être du programme Astrid, qui visait un prototype de réacteur RNR-Na de quatrième génération vers 2030 en s'appuyant sur le retour d'expérience considérable dont la France dispose (réacteurs Rapsodie, Phénix et Superphénix).

Cette stratégie française historique a subi une nette inflexion dans les années récentes. L'objectif de souveraineté est devenu secondaire au vu d'analyses qui ont conclu à la disponibilité dans les décennies à venir d'uranium naturel à un prix modéré. L'objectif économique de réduction du coût du kWh électrique a conduit à repousser vers la fin du siècle le déploiement des RNR, tandis qu'une étape intermédiaire (le multi-recyclage en REP - MRREP) était inventée avec le but affiché de stabiliser, notamment pour des raisons liées à la non-prolifération, le stock de plutonium.

La Commission observe une augmentation de la demande d'énergie électronucléaire via des réacteurs de puissance et un certain foisonnement d'études de petits réacteurs nucléaires modulaires dans le monde. Cette évolution pourrait annoncer un accroissement significatif de la demande globale d'uranium. C'est d'ailleurs aussi l'analyse de l'AIEA. Par ailleurs, les événements géopolitiques récents, même si leurs conséquences ne sont pas encore prévisibles dans leur ensemble, sont de nature à mettre sous tension les approvisionnements de matières premières. Force est de constater que les principales sources d'approvisionnement en uranium naturel sont soit en Australie, soit en Amérique du Nord, où la demande interne va probablement augmenter, soit en Asie centrale, dans des pays susceptibles de suivre la politique de la Russie, soit enfin en Afrique, dans une région où la Chine a une influence grandissante.

*La Commission estime que ces évolutions sont susceptibles de remettre en question l'hypothèse faite par la France d'un uranium naturel abondant et bon marché et, par ailleurs, qu'elles vont conduire à un appel au marché de l'uranium enrichi nettement supérieur à ce qu'il est aujourd'hui.*

## 2.2 ÉTAT DES LIEUX DES ÉTUDES DE RÉACTEURS NUCLÉAIRES EN FRANCE

Le panorama international présenté au chapitre 1 a mis en évidence le dynamisme nouveau des études relatives aux petits réacteurs, en particulier, mais pas seulement, dans les pays anglo-saxons, tandis que les études de réacteurs à neutrons rapides de grande taille, permettant la fermeture du cycle, se poursuivent essentiellement en Chine et en Russie. La France, de son côté, tente de prendre une place parmi les constructeurs de SMR et a reporté à la fin du siècle l'éventuelle mise en service d'un RNR de grande taille.

### 2.2.1 Les études de réacteurs en cours en France ou avec participation française

Indépendamment des études qui préparent la construction des réacteurs EPR2, les acteurs de la filière nucléaire française sont engagés dans un certain nombre d'études sur des réacteurs innovants, avec un niveau de maturité cependant modeste.

Le CEA a entrepris d'explorer la possibilité de développer le principe du RNR-Na dans des réacteurs de petite puissance (AMR), plus faciles à concevoir, construire, exploiter et intégrer dans un écosystème industriel, permettant aussi une utilisation de la chaleur du réacteur à d'autres fins que la production d'électricité. L'organisme travaille sur deux esquisses en parallèle pour évaluer scientifiquement et économiquement la pertinence de cette approche.

- Une esquisse dite « évolutionnaire », nommée ANAIS, s'appuie sur les acquis importants de la filière RNR-Na ainsi que ceux d'Astrid. Cette esquisse vise la réduction des coûts d'investissement dans la logique AMR, et une valorisation de la chaleur dans des procédés non électrogènes.
- Une esquisse en rupture, nommée ATRIUM, vise à éviter les risques de fusion du cœur en combinant un ensemble d'innovations : cœur CADOR (à effet doppler renforcé), évacuation de la puissance résiduelle par la cuve.

Il faut souligner que le fonctionnement en mode iso-générateur d'un réacteur à neutrons rapides, qui est l'objectif majeur recherché dans la perspective de la fermeture du cycle, ne peut être obtenu dans un très petit réacteur. Il faut donc trouver un compromis entre la réduction de taille, pour bénéficier des avantages des AMR, et la taille minimale permettant un fonctionnement iso-générateur. Le CEA vise une puissance de l'ordre de 400 MW thermiques.

*La Commission considère que le fait d'étudier des AMR à neutrons rapides refroidis au sodium est une voie pertinente qui combine les avantages des petits réacteurs en matière de gain de sûreté et la valorisation de l'expérience acquise par la France dans cette filière.*

*Les études préliminaires sur les esquisses ATRIUM et ANAIS sont nécessaires pour choisir les options de conception qui guideront la réalisation d'un futur réacteur. La Commission recommande d'amplifier la mobilisation des acteurs pour aboutir à un projet concret dans le cadre de France 2030.*

La France cherche à jouer un rôle dans le foisonnement international de développement des SMR à travers le projet NUWARD, conduit par EDF avec le CEA, Technicatome, Framatome, Naval group et Tractebel. Ce projet, destiné à l'exportation, en particulier vers l'Europe de l'Est, vise des centrales de 340 MWe constituées chacune de deux réacteurs de 170 MWe. Pour rattraper le retard significatif qu'enregistre le projet par rapport à la concurrence, EDF affiche vouloir s'appuyer sur

des solutions techniques éprouvées, en évitant par exemple l'utilisation d'uranium plus enrichi que dans les cœurs des centrales actuelles de son parc.

*Les avantages des réacteurs de petite taille en matière de sûreté sont indéniables. Le projet NUWARD est donc une initiative pertinente. La Commission soutient ce projet et recommande de le mener à bien dans les meilleurs délais.*

*La Commission observe que, à l'inverse de ce qui est affiché, des technologies peu matures, comme les échangeurs à plaques ou les barres de commandes immergées, sont envisagées pour le projet NUWARD. Cela ne semble pas cohérent avec les impératifs de rattrapage du retard pris par rapport à la concurrence d'une part, et de maîtrise du coût du produit proposé d'autre part.*

*La Commission suggère de simplifier au maximum la conception de NUWARD en s'appuyant exclusivement sur des technologies matures. Elle recommande par ailleurs que l'on conduise une étude de l'impact de tels réacteurs sur le cycle du combustible en France.*

Sur le segment des microréacteurs, une startup française, la société Naarea, présente un projet de réacteur à sels fondus de quelques MWe, qui utiliserait de l'uranium enrichi à 20 %. Ce projet n'en est encore qu'à l'étude de faisabilité. Une autre startup, Jimmy Energy, propose un HTR (High Temperature Reactor, à caloporteur gaz).

Les réacteurs à sels fondus (MSR), objet d'études de concept depuis des années au CNRS, sont présentés comme une alternative aux RNR-Na pour la destruction du plutonium ou des actinides mineurs.

*La Commission considère que le niveau de maturité technologique très modeste des projets de microréacteurs et de réacteurs à sels fondus rend peu crédibles les calendriers ambitieux qui sont annoncés (2030 pour Naarea). Ces nouveaux réacteurs soulèvent en effet des problèmes dont la résolution nécessitera des travaux importants : critères généraux de sûreté, risque de prolifération, cycle du combustible.*

En plus des projets sous pilotage français, des acteurs français participent à des projets internationaux, au premier rang desquels ITER (projet international réunissant la Chine, l'Union européenne, la Russie, la Corée, l'Inde, le Japon et les États-Unis), qui est un démonstrateur préparant la production d'électricité par fusion nucléaire, vers la fin du siècle si les étapes de démonstration sont concluantes. MYRRHA, projet conduit par la Belgique, est un réacteur sous critique piloté par un accélérateur de protons (ADS : accelerator driven system) avec pour objectif affiché la destruction des actinides mineurs (cf. paragraphe 3.2.4).

## 2.2.2 Conclusions et recommandations de la Commission sur les études de réacteurs

L'examen du panorama international montre « l'émergence d'un nouvel écosystème » (start-ups) dont le modèle économique repose largement sur un financement massif de la filière par les gouvernements. La démarche de développement des SMR et AMR est un changement dans la conception des réacteurs qui permet d'améliorer la sûreté en recourant principalement à des systèmes passifs.

*En France, la recherche d'opportunités commerciales est une démarche industrielle logique dans le contexte actuel. Le projet NUWARD tel qu'il a été présenté à la Commission comporte deux risques qu'il faut considérer. Le premier risque est que le produit arrive trop tard sur le marché en raison du choix de technologies insuffisamment matures. Le second est un effet d'éviction dans les financements publics au détriment des recherches consacrées à l'objectif stratégique de fermeture du cycle.*

*Compte tenu de la rapidité d'évolution de la situation et des moyens consentis par les pays leaders, il est nécessaire de formaliser davantage la stratégie nationale sur l'énergie nucléaire à long terme. Quelle que soit la stratégie retenue, il conviendra de limiter la dispersion des moyens au risque de voir la France contrainte à terme d'acheter des réacteurs étrangers.*

*La Commission recommande de compléter la démarche basée sur les SMR par la préparation d'un projet de petit réacteur innovant (AMR) en s'appuyant sur les esquisses étudiées par le CEA.*

## 2.3 LES STRATÉGIES DE GESTION DU CYCLE

### 2.3.1 A l'étranger, deux grandes options pour la gestion du cycle

Contrairement à ce qu'on observe sur les réacteurs, il y a assez peu d'évolution concernant la gestion du cycle du combustible. Deux grandes stratégies sont mises en œuvre selon les pays.

La majorité des pays occidentaux utilisant l'énergie électronucléaire ont aujourd'hui une politique de gestion du combustible en cycle ouvert. Dans ces pays, les combustibles usés sont entreposés dans l'attente d'un futur stockage direct quand l'installation nécessaire aura été réalisée. C'est le cas en particulier pour les États-Unis, le Canada, la Suède et la Finlande (la réalisation de l'installation de stockage est décidée voire entreprise dans ces deux derniers pays). La Belgique et le Royaume-Uni, qui ont pratiqué le recyclage du combustible usé, ne le font plus. Malgré le renouveau spectaculaire de la recherche aux États-Unis sur l'énergie nucléaire, les études sur le cycle restent marginales, malgré quelques développements sur le retraitement des combustibles usés.

En revanche, la Russie et les principaux utilisateurs asiatiques de l'énergie nucléaire poursuivent des recherches sur la fermeture du cycle et ont mis au point des briques technologiques importantes dans ce but.

La Russie, qui dispose déjà de deux RNR-Na en service, a une stratégie clairement tournée vers la fermeture progressive du cycle. Sa stratégie, originale, vise à réaliser un multi-recyclage du combustible en utilisant en parallèle des réacteurs à eau pressurisée (stratégie REMIX) et des RNR-Na (ce qui permettrait notamment de gérer la dégradation isotopique du Pu). La mise en place de cette stratégie en est encore à ses débuts : la Russie n'utilise pas encore industriellement de combustible MOX et peu de détails sont pour l'instant disponibles sur la stratégie REMIX. Il est cependant plausible, au vu des efforts consentis, que des progrès très importants soient réalisés avant le milieu du siècle.

La Chine a fait le choix du cycle fermé, tant pour réduire le volume de déchets de haute activité que pour des raisons de souveraineté. La rapidité avec laquelle la Chine a accédé à l'autonomie technique et scientifique sur son parc actuel laisse présager des progrès tout aussi rapides dans le domaine du cycle. Même si elle est manifestement nettement moins avancée, l'Inde affiche un objectif de fermeture du cycle, en s'appuyant sur des réacteurs rapides au thorium qui devraient être de conception indigène. En attendant leur déploiement, elle achète à l'étranger des réacteurs classiques. Le Japon, de son côté, malgré les difficultés de la filière nucléaire après l'accident de Fukushima, envisage toujours de mettre en service des usines de retraitement de combustible usé et de fabrication de MOX avant la fin de la présente décennie.

### 2.3.2 En France, une stratégie de gestion du cycle devenue hésitante

La gestion actuelle du combustible en France s'appuie sur le recyclage des combustibles UOx usés qui permet de fabriquer du combustible MOX utilisé dans certains réacteurs de 900 MWe et prochainement dans quelques réacteurs de 1300 MWe. Actuellement, le combustible MOX usé est entreposé dans la perspective d'un recyclage ultérieur.

Selon la stratégie définie dans les années 1970, le retraitement des MOX usés, qui reste à industrialiser, fournirait le plutonium nécessaire au démarrage d'un parc de RNR, destiné à terme à fonctionner en mode iso-générateur en Pu, ce qui permettrait de s'affranchir de l'uranium naturel importé en consommant de l'uranium appauvri que la France possède en grande quantité.

La trajectoire affichée aujourd'hui consiste à développer le multi-recyclage du Pu en REP (MRREP) en tant qu'étape intermédiaire avant le recyclage dans de futurs RNR. L'intérêt principal de cette étape intermédiaire serait la stabilisation du stock de plutonium dans le combustible usé, au prix d'un inventaire accru en actinides mineurs. Or, les exposés présentés à la Commission montrent qu'aujourd'hui la faisabilité de l'étape MRREP est loin d'être acquise. Les réacteurs EPR2 devant assurer le MRREP ne seront construits qu'après 2050. De plus, la mise au point des combustibles pose des difficultés, comme l'a montré l'abandon récent du concept Corail et l'apparition d'un concept dit MOX-MR, qui serait utilisé pendant un temps très limité, avant d'être remplacé par un MIX. Si le premier est proche d'un MOX classique, uranium appauvri et 10 % de plutonium, le second est nouveau car il s'agit d'un MOX mélange d'uranium enrichi et de plutonium en proportions variables selon l'isotopie du plutonium, le pourcentage de celui-ci n'excédant pas les 10 %. Dans tous les cas, le retraitement de ces combustibles nécessitera une évolution importante des usines du cycle et ils ne permettront d'assurer qu'un moxage des EPR2 à 50 %. Les calendriers présentés pour le MRREP manquent de précision et de crédibilité. La première utilisation d'un combustible MOX2 (issu du retraitement d'un MOX) ne pourra intervenir qu'après 2050. De plus, le multi-recyclage en REP dégradera la qualité isotopique du plutonium. De ce fait, sa disponibilité, en quantité et en qualité suffisantes, pour démarrer ultérieurement un parc de RNR n'est démontrée que dans une partie des scénarios présentés à la Commission.

La Commission observe de plus que la France est isolée dans la démarche MRREP, si on excepte le programme REMIX russe, qui utilisera aussi des REP, mais en complément de RNR. Les possibilités de coopération internationale sont donc inexistantes.

*L'intérêt scientifique et industriel de l'étape intermédiaire de MRREP n'est pas démontré par les présentations qui ont été faites à la Commission.*

### **2.3.3 Des cycles à inventer pour certains types de réacteurs**

Le regain des recherches sur les nouveaux réacteurs dans plusieurs pays occidentaux (États-Unis, Canada, Royaume-Uni notamment, et dans une moindre mesure en France) néglige manifestement les travaux sur les cycles des combustibles associés, comme si ces sujets étaient considérés comme trop ancillaires pour mobiliser les start-ups et contribuer à la communication considérable associée aux levées de fonds. Pour autant, même si les pays occidentaux privilégient en général un cycle ouvert, il faudra bien étudier la fabrication des combustibles y compris en cas de recyclage du plutonium et de l'uranium, ainsi que la gestion des déchets produits. En ce qui concerne les SMR par exemple, beaucoup de pays envisagent des combustibles plus fortement enrichis en uranium 235 que dans les réacteurs actuels (jusqu'à 20 % pour certains projets), ce qui posera des problèmes de fabrication, de traitement et de conformité au traité de non-prolifération.

En France, le projet NUWARD utilisera pour sa part de l'uranium enrichi à 5 %. Pour un fonctionnement en France, la gestion du cycle sera analogue à celle des REP actuels ; en revanche pour l'exportation, la question de la gestion du cycle du combustible reste ouverte.

Au-delà des verrous technologiques qui restent à lever pour la réalisation des réacteurs à sel fondus, le cycle associé reste entièrement à inventer qu'il s'agisse de la réalisation industrielle des combustibles liquides ou de la gestion des déchets.

*La Commission estime que la crédibilité des nombreux projets de nouveaux réacteurs ne sera satisfaisante que lorsque la gestion du cycle associé aura été étudiée et décrite de manière convaincante, ce qui n'a pas encore été entrepris.*

### **2.3.4 Les conclusions et recommandations de la Commission sur la gestion du cycle en France**

La stratégie française semble aujourd'hui hésiter entre deux voies. La première est la poursuite de la fermeture à terme du cycle en étalant les calendriers de manière considérable. La seconde est l'abandon du recyclage après 2040, c'est-à-dire au moment où les usines du cycle nécessiteront des investissements significatifs. La France se rallierait alors à la stratégie du cycle ouvert.

Il s'agit en fait d'un arbitrage de priorité entre la souveraineté énergétique d'une part, qui demande de renforcer autant que possible l'indépendance du pays, et la limitation des investissements à consentir et donc du coût de l'électricité d'autre part, qui conduit à retenir le cycle ouvert moins onéreux sous réserve de disposer d'uranium accessible et à bas prix.

*La Commission recommande que ce choix stratégique soit arbitré au plus tôt, pour orienter l'ensemble des efforts dans la direction souhaitée.*

*Si la stratégie de fermeture du cycle est réaffirmée, alors il faut relancer l'étude puis la réalisation concrète de démonstrateurs de réacteurs à neutrons rapides iso-générateurs, seuls capables de fermer le cycle, et lancer les études d'évolution du cycle. Si en revanche la décision stratégique de passage à une gestion en cycle ouvert est prise, il n'y a pas lieu d'en différer l'application d'autant qu'il est indispensable d'étudier le stockage des combustibles usés et l'impact que ce changement de stratégie aurait sur Cigéo. Dans les deux cas, la Commission ne voit pas d'intérêt significatif à l'étape intermédiaire du multi-recyclage en REP.*

## **2.4 LES INSTALLATIONS INDUSTRIELLES DU CYCLE**

### **2.4.1 A l'étranger, des outils industriels encore peu développés**

Dans les pays qui ont retenu le cycle ouvert du combustible, les installations du cycle se limitent aux installations de fabrication du combustible, le recyclage n'étant éventuellement étudié qu'à l'échelle du laboratoire. Même les pays qui travaillent activement sur la fermeture du cycle (Russie, Japon et Chine notamment) n'ont pas encore d'installation réellement industrielle en fonctionnement, tandis que le Royaume-Uni et la Belgique ont renoncé aux leurs.

### **2.4.2 En France, des installations en attente d'une décision majeure**

La France dispose aujourd'hui d'une compétence et d'un tissu industriel uniques au monde qui lui permettent de mettre en œuvre industriellement depuis plusieurs décennies la première partie de la fermeture du cycle du combustible qui consiste à séparer le plutonium et l'uranium des combustibles UOx usés et à fabriquer un combustible MOX couramment utilisé dans certains réacteurs de 900 MWe.

L'usine de retraitement de La Hague, qui regroupe l'essentiel des installations de traitement des combustibles usés, date des années 1960. Même si des jouvences sont régulièrement réalisées, une refonte importante sera nécessaire probablement entre 2040 et 2050. Cette refonte devra prendre en compte la stratégie de gestion du cycle à long terme et son cadre réglementaire.

De plus, si les procédés actuellement utilisés, en particulier pour la séparation, ont déjà permis de retraiter des quantités limitées de MOX usés, on est loin de la réalisation industrielle de toutes les étapes d'un cycle fermé. Rien que pour réaliser le deuxième recyclage de Pu en REP, de nouveaux procédés de séparation de l'uranium et du plutonium du combustible usé seront nécessaires. Les études qui ont été exposées à la Commission sur ces nouveaux procédés sont tout à fait prometteuses, mais le passage de l'échelle du laboratoire à l'échelle industrielle reste à développer.

Cette évolution industrielle de La Hague sera un chantier majeur, d'une ampleur comparable à celle de la construction d'un réacteur. L'Usine Melox de fabrication du MOX devra elle aussi être remise à niveau pour fabriquer le combustible à partir de Pu de composition isotopique dégradée par rapport à celle du Pu mis en œuvre aujourd'hui. En tout état de cause, il est nécessaire de définir avant 2030 les procédés sur lesquels sera fondée la rénovation des installations. La décision devra donc être prise rapidement. A ce jour en effet, seule la poursuite du retraitement jusqu'en 2040, c'est-à-dire jusqu'à la fin de vie approximative de l'usine actuelle, a été annoncée.

### 2.4.3 Les conclusions et recommandations de la Commission sur l'outil industriel

*Le devenir des installations industrielles découlera directement du choix du scénario pour l'aval du cycle du combustible.*

*Dans un scénario de fermeture du cycle, le renouvellement des installations, nécessaire d'ici 2040, demandera des études dont la durée contraint de fait le calendrier de prise de décision. Sans décision dans les toutes prochaines années, l'abandon de l'objectif de fermeture du cycle deviendra inéluctable et subi plutôt que décidé. La Commission recommande donc qu'une stratégie globale soit adoptée sans tarder.*

*La Commission recommande que la question des filières de traitement de déchets soit systématiquement étudiée dès les phases de conception des nouveaux réacteurs, en intégrant les besoins d'entreposage d'attente, de stockage ou de création de nouvelles filières.*

## CHAPITRE III : LES DÉCHETS ET LEURS FILIÈRES DE GESTION

### 3.1 INTRODUCTION

Comme toute activité industrielle, la filière nucléaire produit des déchets ultimes, c'est-à-dire des substances qui ne sont pas valorisables. Le principe d'équité intergénérationnelle impose à notre génération, qui a profité de l'énergie libérée par cette activité, de proposer et de mettre en œuvre des solutions de gestion définitive de ces déchets.

L'inventaire des déchets est bien connu et mis à jour annuellement par l'Andra dans son inventaire national des matières et déchets radioactifs. Cet inventaire pourrait évoluer significativement dans le futur. Le déploiement d'une flotte d'EPR2 ne modifierait pas notablement la qualité des déchets, mais en augmenterait la quantité. Des réacteurs innovants généreraient des déchets de caractéristiques probablement différentes. Dans les deux cas, la gestion de ces nouveaux déchets devrait être prévue le plus tôt possible.

Les combustibles usés doivent être refroidis pendant une dizaine d'années avant qu'il soit envisageable de les retraiter (pour valoriser les matières qu'ils contiennent) ou plusieurs dizaines d'années avant de les stocker (dans les stratégies de stockage direct, sans recyclage). De la même manière, les colis de verre de déchets HAVL, issus du retraitement, doivent être refroidis pour une durée comparable avant de pouvoir envisager leur stockage. Les entreposages d'attente construits pour laisser refroidir les combustibles usés et les colis HAVL sont donc des installations industrielles indispensables dans la gestion des déchets.

Par ailleurs, la Commission avait examiné les alternatives au stockage géologique dans son rapport n° 15, en s'appuyant sur les travaux de l'IRSN et avait constaté qu'il n'y a aujourd'hui que des propositions très partielles fondées sur la transmutation. À la suite de la décision de l'État de financer un thème relatif aux alternatives dans son plan France Relance, la Commission s'est naturellement intéressée de près aux propositions faites. Elle y a consacré une audition entière cette année, dont les principaux éléments sont détaillés dans ce chapitre.

### 3.2 LES DÉCHETS HAVL

#### 3.2.1 Le stockage géologique : le projet Cigéo

La Commission considère que l'Andra a acquis les connaissances suffisantes pour permettre le lancement du projet Cigéo. Elle estime notamment que les qualités du site de Meuse/Haute-Marne ont été démontrées et que les options techniques envisagées à ce stade sont robustes.

*La Commission considère que l'Andra dispose actuellement des éléments scientifiques et techniques suffisants pour asseoir la démonstration de sûreté en vue de la demande d'autorisation de création (DAC). En outre, le projet Cigéo prévoyant un développement progressif, les futures avancées technologiques pourront y être intégrées.*

*Toutes les conditions sont donc réunies pour un dépôt sans délai de la DAC.*

Sans que cela remette en cause son avis général sur la maturité du projet Cigéo, la Commission avait recommandé dans son rapport n° 15 de conduire des études complémentaires pour réduire certaines incertitudes ; les résultats de ces études ont été présentés cette année à la Commission.

### **Gestion du transitoire hydraulique-gaz**

Des phénomènes de radiolyse et de corrosion auront lieu au sein du stockage et seront générateurs d'hydrogène. La production lente et continue d'hydrogène induira, quelques milliers d'années après la fermeture du stockage, une surpression dont il est nécessaire d'évaluer l'impact sur les propriétés de confinement du Callovo-Oxfordien (COx). Pour limiter la surpression et ses effets mécaniques sur la roche, l'Andra a proposé un matériau de scellement imperméable à l'eau mais perméable au gaz. Des résultats concluants ont été présentés en 2022. L'Andra a mis au point un matériau composé d'un mélange de ~40 % de bentonite (une argile gonflante) et de sable, ce qui permet d'obtenir une densité sèche assurant les caractéristiques désirées lors de la mise en place. Le matériau possède ainsi des propriétés adaptées à la migration du gaz : pression d'entrée de gaz inférieure à 2 MPa et perméabilité au gaz élevée, de trois ordres de grandeurs supérieure à celle de l'eau, même pour un milieu quasi saturé en eau. La perméabilité à l'eau reste très faible, de l'ordre de  $10^{-11}$  m/s, garantissant le rôle du scellement vis-à-vis de la migration des radionucléides. Différentes techniques de construction de scellements avec ce matériau ont déjà été testées, y compris à l'échelle 1.

Les derniers calculs effectués par l'Andra, prenant en compte ce matériau, mènent à une pression maximale de gaz de 7,5 MPa pour l'estimation la plus probable (scénario *best-estimate*) et 10 MPa dans un scénario utilisant la valeur haute de l'incertitude sur l'ensemble des paramètres (scénario majorant). Pour éviter la fracturation de la roche, cette pression doit être inférieure à la contrainte maximale existant dans la roche, mesurée à  $11,5 \pm 0,3$  MPa. Ces résultats de l'Andra confortent les marges de sûreté vis-à-vis des risques liés à la surpression d'hydrogène et répondent aux préoccupations exprimées par la Commission dans son rapport 15.

26

Il reste maintenant à valider ce concept de scellement *in situ*. L'Andra projette dans les prochaines années la réalisation de trois démonstrateurs pour étudier le mode de mise en place de remblai, de scellement avec ou sans massif d'appui. Un programme expérimental complémentaire a été initié pour consolider les connaissances sur ce matériau et son comportement hydromécanique et chimique, en contexte de scellement.

*La Commission note avec satisfaction que l'Andra a réussi à mettre au point et à caractériser un matériau de scellement permettant de limiter la pression de gaz liée à la production d'hydrogène après la fermeture du stockage. L'intégration de ce dispositif dans la conception de Cigéo permet d'obtenir des marges importantes vis-à-vis du risque de fracturation du COx. La Commission recommande que les essais prévus par l'Andra incluent les scellements de liaison surface-fond.*

### **Gestion du risque en atmosphère explosive (ATEX) en alvéole HA**

Des dispositifs de balayage à l'azote sont en cours de mise au point par l'Andra pour limiter l'accumulation d'hydrogène en phase d'exploitation dans les alvéoles HA et prévenir les risques d'interaction entre l'oxygène des galeries et l'hydrogène des alvéoles, si ces derniers venaient à être réouverts dans le cadre de l'exercice de la réversibilité. Ce système sera décrit dans la DAC. La Commission a déjà préconisé l'utilisation de dispositifs passifs afin de s'affranchir des risques de défaillance de systèmes actifs destinés à rester en service jusqu'au scellement définitif des alvéoles. De plus, du point de vue de la sécurité des opérateurs en exploitation, la Commission attire l'attention sur les dangers liés à l'utilisation d'azote en milieu confiné.

*La Commission maintient sa recommandation d'utiliser de préférence des dispositifs passifs pour limiter les interactions entre l'intérieur des alvéoles et le milieu extérieur. Elle reconduit sa demande d'une analyse comparative globale des technologies passive et active pour apprécier le gain de l'une par rapport à l'autre en matière de sûreté. Il conviendrait de faire clairement apparaître la part des risques et bénéfiques lors de l'exploitation normale d'une part et lors de l'exercice de la réversibilité d'autre part.*

### **La phase industrielle pilote (Phipil)**

Si le projet Cigéo est autorisé, il débutera par une phase de montée en puissance industrielle, dite phase industrielle pilote (Phipil). La Phipil permettra de démontrer que les briques élémentaires de la conception de Cigéo sont bien réalisables et intégrables. Elle permettra aussi de conforter des choix de conception lorsque plusieurs options auront été envisagées.

*La Commission considère que la Phipil aura atteint son objectif quand elle aura répondu aux enjeux suivants : la démonstration de la réalisation technique des composants de Cigéo, la démonstration du bon fonctionnement de l'installation via des essais de qualification, du bon déroulement de son exploitation industrielle, et la mise en pratique des modalités de gouvernance définies au préalable.*

*La Commission rappelle que la Phipil n'a pas pour vocation de démontrer la sûreté du stockage, cette démonstration étant un préalable à l'obtention du décret d'autorisation de construction.*

### **3.2.2 La question des entreposages d'attente**

L'entreposage d'attente constitue une étape industrielle transitoire dans la chaîne de gestion du combustible.

La puissance thermique des combustibles usés dépend de leur teneur en plutonium et de leur taux de combustion. Ainsi, certains combustibles MOX (à forte teneur en Pu) doivent être refroidis pendant plusieurs dizaines d'années. Notons que dans le cas de l'utilisation de combustibles issus d'un éventuel multirecyclage en REP (MRREP), cette durée s'allongera encore, ce qui nécessitera des capacités accrues d'entreposage.

Les retards de décision des opérateurs sur la construction de nouveaux entreposages conduisent à une saturation probable des capacités actuelles à l'horizon 2030-2040. La construction d'une nouvelle piscine d'entreposage centralisé de grande capacité est envisagée à La Hague pour 2034. Ces retards obligent à prendre des mesures compensatoires. La première mesure prévoit une disposition plus dense des assemblages dans les piscines existantes de La Hague grâce à des paniers plus petits contenant des absorbants neutroniques. La seconde, étudiée par Orano pour l'horizon 2027, considère le recours à l'entreposage à sec des combustibles usés en utilisant des conteneurs de transport dont l'homologation doit être étendue aux exigences spécifiques à l'entreposage.

*La Commission recommande que les études sur le comportement des combustibles usés entreposés sur de longues durées soient renforcées afin de garantir qu'ils pourront être repris et manipulés, que ce soit pour être retraités ou pour être stockés. Elle s'interroge en particulier sur le comportement des gaines de combustible en entreposage à sec et sur les moyens d'auscultation des conteneurs avant leur ouverture.*

*Quel que soit le type de déchets produits par les réacteurs du parc passé, actuel, et futur, des décisions sont à prendre sans délai sur la création d'installations d'entreposage.*

### **3.2.3 L'entreposage de longue durée n'est pas une alternative au stockage géologique**

La Commission rappelle la définition d'alternative au stockage géologique qu'elle proposait dans son rapport n° 15.

*Une alternative au stockage profond est une installation, ou combinaison d'installations éventuellement associée(s) à des procédés de traitement et de conditionnement spécifiques, qui permet de garantir le même niveau de sûreté qu'un stockage profond pendant la même durée et sous les mêmes contraintes.*

28

Ces principes impliquent que l'alternative assure la gestion définitive des déchets radioactifs concernés, sans intervention humaine sur le long terme, et avec des performances de sûreté aussi bonnes que celles du stockage géologique. L'équité intergénérationnelle implique par ailleurs que le financement de l'alternative soit assuré par la génération présente.

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

En effet, l'entreposage dit *pérenne* (entreposage de longue durée indéfiniment renouvelé) n'est pas passif : il exige une surveillance continue et un reconditionnement périodique des déchets. Il transfère donc aux générations futures la charge de protéger l'homme et l'environnement. Il présuppose en outre qu'elles conserveront la capacité technique et financière requise pour gérer les déchets, et la conscience de leur nocivité, ce qui ne peut être garanti.

Avec des démarches différentes, l'étude socio-économique et sa contre-expertise, aboutissent à la même conclusion.

### **3.2.4 La transmutation n'est pas une alternative au stockage géologique**

Les alternatives suggérées au stockage géologique s'appuient sur différentes stratégies de transmutation des actinides mineurs. Ces stratégies sont à des niveaux plus ou moins avancés de développement. Elles peuvent être regroupées en deux familles : d'une part une stratégie reposant sur des réacteurs à neutrons rapides électrogènes et brûleurs d'actinides, et d'autre part, une

stratégie « à double strate » faisant fonctionner en parallèle des réacteurs électrogènes et des systèmes spécifiques pour la transmutation des actinides mineurs.

### **Réacteurs à neutrons rapides**

Les réacteurs à neutrons rapides (RNR) permettent une meilleure valorisation énergétique de l'uranium que les réacteurs à neutrons thermiques. En outre, les neutrons rapides sont également à même de fissionner certains actinides mineurs comme l'américium. Plusieurs concepts de combustibles et de RNR sont proposés : cœurs homogènes utilisant un combustible MOX RNR intégrant un faible pourcentage d'actinides mineurs ou cœurs hétérogènes avec certains éléments de combustible plus chargés en actinides mineurs que les premiers mais placés en couverture. Pour des raisons de sûreté, le combustible RNR en mode homogène est le plus facile à mettre en œuvre mais il ne peut pas contenir de fortes teneurs en actinides mineurs. Ainsi le taux de conversion de l'américium serait limité à 2 à 4 kg/TWhe d'électricité produite.

Plusieurs types de RNR sont à l'étude à l'international avec des degrés variables de maturité (voir chapitre 1). Les RNR refroidis au sodium ont une maturité industrielle acquise, bien qu'aucun n'ait encore été utilisé industriellement pour la transmutation. Le plan France Relance finance des pré-études pour un réacteur à sels fondus (MSR) convertisseur d'actinides par fission, technologie à TRL très bas et posant d'autres problèmes à ne pas sous-estimer (démonstration de sûreté avec un combustible liquide non établie, corrosion, risque de prolifération, gestion du  $^{36}\text{Cl}$ , ...).

### **Stratégie « à double strate »**

Le projet MYRRHA, soutenu par la Belgique et ouvert à l'international, vise à construire un démonstrateur préindustriel de transmutation des actinides mineurs. Il s'agit d'un ADS (Accelerator Driven System), c'est-à-dire la combinaison d'un accélérateur linéaire de protons et d'un réacteur sous-critique brûleur d'actinides. La faisabilité du concept doit être établie à l'issue des trois phases du projet, annoncée pour 2035 par le SCK•CEN. Un faisceau de protons est ainsi accéléré vers le cœur d'un réacteur sous-critique ; les réactions entre ces protons et une cible de spallation créent des neutrons de haute énergie qui fissionnent les éléments du combustible. Par sa conception, le cœur de ce type de réacteur peut accepter des teneurs bien plus élevées en actinides mineurs que celui des RNR, ce qui devrait permettre des taux de conversion de l'ordre de 35 kg/TWhe. L'utilisation de ce système à double strate prend tout son sens en complément du déploiement d'un parc de réacteurs électrogènes à neutrons rapides.

G. Mourou, professeur émérite et prix Nobel de physique 2018 pour ses travaux sur les lasers de haute puissance, a présenté à la Commission son concept de système à double strate. Le principe consisterait à accélérer des protons par l'utilisation d'impulsions de lasers de très haute puissance et très courte durée sur une cible de spallation mince. L'interaction de ces protons avec la cible permettrait de créer des neutrons de haute énergie dans un réacteur sous-critique à sels fondus. L'idée présentée est encore à l'état d'ébauche non quantifiée. Des progrès considérables doivent être faits pour augmenter de plusieurs ordres de grandeurs la puissance des lasers (par l'utilisation de lasers fibrés) et permettre d'obtenir un faisceau de protons d'énergie comparable à celle envisagée pour le projet MYRRHA. D'autre part, les réacteurs à sels fondus posent encore de nombreux défis quant à leur faisabilité, leur pilotage et leur sûreté, ainsi que concernant la chaîne de chimie séparative associée.

### **Implication pour une éventuelle filière dédiée à la transmutation**

Compte tenu des faibles taux de conversion, la transmutation ne peut avoir de sens que dans une stratégie à très long terme (supérieure au siècle), intégrant tous les aspects de la chaîne de transmutation : chimie séparative avancée pour isoler les actinides mineurs, fabrication du combustible à base de ces éléments, fonctionnement d'un parc de réacteurs nucléaires dédiés à

la transmutation, recyclage des combustibles de transmutation, conditionnement des déchets ultimes. La mutualisation éventuelle d'installations (par exemple au niveau européen), particulièrement pour les stratégies à double strate, nécessiterait une organisation et des instruments juridiques spécifiques.

### Implications pour le stockage géologique

Outre la maîtrise des stocks de plutonium, le principal intérêt de la transmutation est la fission de l'isotope 241 de l'américium qui est le principal contributeur à la charge thermique à long terme des colis HAVL et qui paraît faisable à l'échelle industrielle.

Suivant les hypothèses des scénarios, la diminution de la puissance thermique des colis pourrait permettre de diviser par un facteur 5 à 10 l'emprise d'un stockage géologique après un entreposage d'attente d'une centaine d'années destiné à refroidir ces colis. Cependant, pour des raisons de physique nucléaire et de sûreté des procédés, la transmutation ne peut concerner la totalité des actinides mineurs. En particulier, la manipulation du curium est trop contraignante en termes de radioprotection. Les colis de déchets issus des opérations de transmutation contiendront toujours une fraction d'actinides mineurs non transmutés à vie très longue ainsi que des produits de fission dont la transmutation n'est pas physiquement envisageable.

Pour les combustibles usés non retraités et ceux encore à produire, la transmutation est envisageable mais ne permettrait donc pas de se passer du stockage des déchets ultimes. En outre, la présence d'actinides mineurs résiduels à vie très longue ne diminuerait pas les exigences de démonstration de la sûreté à long terme d'un stockage géologique. La transmutation reste cependant une piste permettant de diminuer la puissance thermique des colis et ainsi l'emprise des stockages.

30

La transmutation ne peut en aucun cas être envisagée pour les déchets HAVL déjà produits, conditionnés en matrice de verre nucléaire. Ce mode de conditionnement a en effet été choisi pour sa grande stabilité. La dissolution des verres en vue de la transmutation des actinides mineurs reposerait sur la mise en œuvre extrêmement complexe de procédés chimiques utilisant de l'acide fluorhydrique et produisant une grande quantité d'effluents radioactifs. Cela poserait enfin des contraintes de sûreté des installations difficiles à satisfaire.

*La transmutation ne permet pas de s'affranchir d'un stockage géologique. Elle pourrait offrir une opportunité de réduire significativement l'emprise des stockages géologiques en diminuant la puissance thermique de colis de déchets qui ne sont pas encore produits. Cela supposerait de lever de nombreux verrous technologiques et de maintenir à long terme un parc nucléaire approprié.*

### 3.3 LES DÉCHETS MAVL

Les déchets MAVL résultent pour l'essentiel du retraitement des combustibles usés et des activités de maintenance et de fonctionnement des usines de retraitement. Ils comprennent par exemple les structures des assemblages de combustibles ou encore des déchets issus du traitement des effluents comme des boues qui sont conditionnées dans des bitumes ou encore des ciments, pour un inventaire total de l'ordre de 75 000 m<sup>3</sup> de colis primaires.

Les déchets MAVL sont classés en familles selon leurs propriétés chimiques et radiologiques. Dans la mesure où il aura été établi que toutes les familles retenues peuvent être stockées dans le site souterrain Cigéo, et si la construction en est autorisée, alors les déchets MAVL seront répartis dans les alvéoles prévus à cet effet. Les alvéoles MAVL produisent lentement et progressivement de

l'hydrogène en raison des phénomènes de radiolyse et de corrosion. La gestion des gaz produits a été commentée dans la partie HAVL de ce rapport.

Le stockage des colis de déchets bitumés ayant suscité des interrogations, la Commission avait conseillé la mise en place d'une revue internationale dans son rapport n° 12. À la suite des conclusions de cette revue, communiquées en 2019, le CEA, Orano, l'Andra et EDF, ont défini un programme quadripartite pour y répondre, qui prendra fin en 2025.

L'Andra a indiqué à la Commission que le dimensionnement des alvéoles et l'analyse de sûreté en exploitation considéreront le stockage en l'état des colis de bitumes, qui est l'option la plus pénalisante.

*La Commission sera attentive à l'avancement du programme défini pour répondre aux recommandations de la revue internationale sur les déchets bitumés et entend que les premiers résultats lui soient présentés au cours de l'année 2022-2023.*

La transmutation ne peut s'appliquer aux déchets MAVL car ceux-ci comportent trop peu de radionucléides à transmuter pour justifier une phase préliminaire de séparation sur les très grands volumes concernés.

*La Commission souligne qu'il n'existe aucune alternative au stockage géologique pour les déchets MAVL.*

### 3.4 LES DÉCHETS FAVL

31

Les déchets à faible activité et vie longue (FAVL) forment une grande variété de déchets athermiques de faible nocivité. C'est le fait que leur activité perdure sur de très longues durées qui pose un problème de confinement sur le long terme. On distingue plusieurs familles de déchets FAVL : des déchets radifères (issus de l'extraction de terres rares dans certains minerais ou de l'assainissement d'anciens sites industriels de production de radium ou de thorium), des déchets graphites (issus de la filière UNGG), des déchets uranifères de Malvési et certains déchets bitumés. Les volumes de déchets concernés seront très importants, de l'ordre de 300 000 m<sup>3</sup> dont la majorité sont déjà produits, auxquels s'ajoutent plus de 300 000 m<sup>3</sup> pour les déchets historiques de Malvési.

Le grand volume de déchets FAVL justifie qu'ils soient traités de manière particulière. Leur isolement et leur confinement doivent être garantis sur des durées en relation avec la vie longue des radionucléides présents, dans une approche proportionnée à leur radiotoxicité.

Les stratégies retenues diffèrent pour tenir compte des spécificités de chaque famille de déchets. Ainsi, plusieurs sites de stockage pourraient être sélectionnés, en fonction de leur capacité de confinement, du volume de stockage potentiel, et de la distance aux lieux d'entreposage temporaire (afin de limiter le transport de grandes masses de déchets sur de longs trajets).

Un site fait l'objet de reconnaissances dans l'Aube sur la communauté de communes de Venduvre-Soulaines, pour proposer un stockage dans des argiles en subsurface à une profondeur d'une quarantaine de mètres. La caractérisation est en cours et comporte notamment des études sur l'hydrogéologie du site et sur sa résistance à l'érosion. En parallèle, un inventaire de la biodiversité a été réalisé afin d'appuyer la démarche ERC : « éviter, réduire, compenser ».

L'Andra mène également un inventaire des familles de déchets qui seraient adaptées à ce site, en fonction de ses caractéristiques et de la conception du stockage. La démonstration de sûreté sera faite sur le couple site/familles retenu. S'agissant des déchets FAVL, la démonstration de sûreté est particulière.

- Avant 50 000 ans, la vérification des fonctions de sûreté repose sur une approche classique : scénario d'évolution naturelle, scénario d'évolution altérée, scénario d'intrusion humaine involontaire.
- Au-delà de 50 000 ans, les incertitudes liées à l'évolution du site sont trop grandes pour que ce type d'approche puisse être déployée. Ces incertitudes concernent en particulier l'estimation de l'érosion qui dépend de l'évolution climatique et de l'occupation des sols. L'approche retenue repose alors sur l'utilisation de scénarios conventionnels, intégrant ces évolutions du climat et l'utilisation du territoire, au regard des caractéristiques géologiques du site. Ces scénarios, qui doivent être élaborés avec l'autorité de sûreté et approuvés par celle-ci, doivent représenter, de façon majorante, les évolutions réalistes les plus pénalisantes afin d'évaluer l'impact de la perte de confinement d'une part (dégradation des propriétés de l'argile), et de la perte d'isolement d'autre part (érosion partielle de la couche argileuse). La démonstration ne repose plus sur le respect d'une contrainte de dose mais sur des confrontations avec des niveaux de références eux-aussi conventionnels.

*La Commission note que le choix de la faible profondeur, justifié par les volumes et les vies longues des déchets de faible activité, implique une démonstration de sûreté à très long terme qui repose sur la définition de scénarios conventionnels. La Commission observe qu'il n'y a pas d'autre moyen de démontrer la sûreté à très long terme dans un tel cas.*

*L'élaboration des scénarios conventionnels devra faire l'objet d'une concertation approfondie avec l'ASN. Ces scénarios devront tenir compte des recommandations internationales.*

32

*La Commission constate que le projet de l'Andra à Vendevre-Soulaines ne sera pas conçu pour accepter toutes les catégories de déchets FAVL. Certaines familles resteront encore sans exutoire. La Commission recommande de bien prioriser les familles à traiter en fonction du calendrier du démantèlement des installations.*

Par exemple, le manque d'exutoire pour les déchets graphites complique le démantèlement des centrales de la filière UNGG. À l'inverse, les bitumes FAVL ne présentent pas de caractère d'urgence, leur reconditionnement et leur entreposage d'attente dans l'EIP de Marcoule sont en cours.

Orano a engagé des études pour proposer une solution de stockage définitif des déchets historiques de Malvési. Plusieurs pistes sont envisagées, qui privilégient le déplacement des déchets vers un stockage en subsurface dans un site très proche. Cette solution présente l'avantage d'éviter le risque d'érosion à long terme sans nécessiter le transport de gros volumes de déchets sur de grandes distances.

*Une solution de stockage définitif des déchets historiques de Malvési est en cours d'élaboration. La démonstration de sûreté devra prendre en compte la situation particulière du site, à proximité de la mer, dans un contexte de changement climatique pouvant impacter le niveau marin et le fonctionnement des aquifères connectés.*

### 3.5 LES DÉCHETS TFA

La plus grande partie des déchets de très faible activité (TFA) est produite par les opérations d'assainissement et démantèlement (A&D) d'installations nucléaires mises à l'arrêt définitif. La Commission a examiné en détails dans ses rapports n° 14 et 15 la manière dont ces opérations sont conduites au CEA et chez EDF. Elle a poursuivi ce travail cette année. Les déchets TFA sont stockés dans des installations de surface dont seul le CIREs dans l'Aube est aujourd'hui en exploitation. Au rythme de production des déchets, le CIREs dans sa conception actuelle devrait être saturé vers 2028. La réduction du volume des déchets à stocker demeure un enjeu majeur.

#### 3.5.1 Les opérations d'assainissement et démantèlement : rappel des recommandations de la Commission

La Commission a constaté qu'un savoir-faire a été accumulé par les opérateurs de la filière nucléaire, notamment le CEA et EDF, grâce au retour d'expérience des nombreuses opérations d'A&D déjà conduites, quelquefois avec d'autres entreprises privées spécialisées. Il est important que cette compétence soit partagée. EDF et le CEA disposent déjà d'un accord de coopération dans le domaine qui permet des échanges d'informations, de méthodes et de retour d'expérience et vise la recherche de synergies dans la réalisation de leurs projets respectifs. Le CEA étudie la possibilité de conclure un accord équivalent avec Orano.

*La Commission encourage tous les opérateurs à renforcer leur coopération sur les opérations d'A&D jusqu'à la mise en place d'une organisation commune qui pourrait constituer à terme un pôle d'excellence français capable de répondre à une demande internationale.*

33

Les opérations d'A&D conduites par EDF sont organisées de manière à en minimiser la durée, ce qui est favorable aux plans technique et financier. Le CEA, au contraire d'EDF, ne dispose pas d'un fonds dédié pour le financement de ses activités. Son calendrier est donc principalement contraint par le flux budgétaire qui leur est consacré, d'un montant de 740 M€ courants annuel jusqu'en 2022 inclus et qui devrait augmenter légèrement dans les années suivantes selon le plan à moyen et long terme (PMLT) du CEA. Face à cette contrainte financière, le CEA a indiqué à la Commission que, en accord avec l'ASN, il programme ses opérations de manière à éliminer le plus rapidement possible la partie des termes sources susceptible de relâcher des radionucléides, ce qui est incontestablement favorable à la sûreté, mais a pour effet d'allonger la durée des démantèlements complets et donc d'augmenter leur coût à terminaison.

*La Commission recommande au CEA de préparer avec soin les étapes de démantèlement qui sont repoussées dans le temps afin de diminuer les aléas lors de la reprise des travaux dans quelques décennies.*

#### 3.5.2 Les perspectives d'extension des capacités de stockage des déchets TFA

Le volume de déchets TFA, à l'arrêt du parc actuel, est, selon l'inventaire national de 2018, estimé entre 2 100 000 et 2 300 000 m<sup>3</sup>, quel que soit le scénario d'évolution du parc envisagé. La capacité du Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (CIREs) à Morvilliers-La Chaise dans l'Aube, est actuellement de 650 000 m<sup>3</sup>. Le projet AGACI vise à porter cette capacité à 900 000 m<sup>3</sup> (voire 950 000 m<sup>3</sup>) grâce à l'amélioration de la conception des alvéoles sans extension d'emprise foncière. Cette évolution devrait permettre de couvrir les besoins jusqu'en 2038. Pour la suite, les études de l'Andra montrent qu'un deuxième site pourrait être créé dans la

communauté de communes de Soulaines, permettant de stocker 1 000 000 m<sup>3</sup> environ de déchets TFA. Le dépôt du dossier de création d'un nouveau site TFA interviendrait selon l'Andra vers 2028.

*La Commission recommande que le projet d'extension de la capacité du CIREs et celui de création d'un nouveau site soient engagés avec des marges calendaires suffisantes pour éviter tout ralentissement des opérations de démantèlement faute d'exutoire.*

Le PNGMDR a demandé une étude de faisabilité d'installations de stockage décentralisées, complétée par une analyse comparée de leur impact sur l'environnement par rapport à un envoi des déchets au CIREs. EDF conduit cette étude sur l'exemple du stockage des blocs de béton sodés issus du traitement du sodium de Superphénix (65 000 tonnes soit 38 000 m<sup>3</sup> actuellement entreposés à Creys-Malville dans un bâtiment dont l'autorisation d'exploitation expire en 2035).

### 3.5.3 Les recherches conduites ou à conduire pour réduire le volume des déchets TFA

Nonobstant les projets d'extension cités ci-dessus, la capacité de stockage de déchets TFA demeure et demeurera une ressource rare qu'il convient d'économiser autant que possible en réduisant les volumes de déchets à stocker.

Le projet le plus avancé dans ce sens concerne l'installation de valorisation par fusion et décontamination des métaux qui pourrait être implantée à Fessenheim. La quantité de métal concernée en France est de l'ordre de 500 000 tonnes, qui pourraient être traitées à la cadence de 25 000 tonnes/an, ce qui réduirait de 200 000 m<sup>3</sup> environ le besoin en stockage TFA.

34

Le Code de la santé publique interdit « tout usage de substances provenant d'une installation nucléaire lorsqu'elles sont contaminées, activées ou susceptibles de l'être [...] dans la fabrication de biens de consommation ». Le décret 2022-174 dispose que cet usage « peut faire l'objet d'une dérogation dès lors que ces substances font l'objet d'une opération de valorisation » dans des conditions fixées par le décret. « La dérogation est accordée par arrêté du ministre chargé de la radioprotection après consultation du public et avis de l'autorité de sûreté. » La mise en service du centre de valorisation à Fessenheim est envisagée vers 2031.

*La Commission recommande de concrétiser à l'échelle industrielle ces recherches sur les techniques de mesure radiologiques en vue d'aboutir à un dispositif de contrôle exemplaire qui justifie pleinement la pertinence des dérogations qui seront accordées.*

Pour ce qui concerne les matériaux non métalliques (gravats essentiellement), une très bonne connaissance de l'historique d'exploitation des installations à démanteler est nécessaire pour affiner le zonage de déchets ce qui permet de classer éventuellement des volumes considérables en déchets conventionnels. Cette connaissance demande à être confortée par des investigations approfondies. Le CEA conduit des études sur les méthodes de caractérisation de l'état initial des installations à démanteler afin d'estimer la nature et le volume des déchets, en particulier dans le cadre du projet européen INSIDER.

## CHAPITRE IV : FORMATION, EXPERTISE ET COMPÉTENCES

### 4.1 INTRODUCTION

La Commission a régulièrement appelé l'attention sur l'importance de disposer en France des compétences requises pour gérer le parc électronucléaire et pour l'adapter aux changements de stratégie en matière d'énergie. Aujourd'hui, la stratégie électronucléaire française nécessite des décisions dans les toutes prochaines années s'agissant des capacités d'entreposage du combustible usé, du cycle des matières ou de la gestion des déchets allant jusqu'à leur stockage. Sous l'impulsion des pouvoirs publics, de nouvelles orientations voient aussi le jour, s'agissant par exemple du développement d'une offre de petits réacteurs modulaires. La variété des applications de ces réacteurs et le gain en sûreté qu'ils apporteraient peuvent contribuer à l'attractivité de la filière.

Compte tenu des constantes de temps du nucléaire, la déclinaison scientifique et technique de ces choix est un travail à l'échelle de deux générations au moins. La formation et le développement de l'expertise scientifique et technologique sont donc des conditions *sine qua non* pour gérer les installations actuelles et pour conduire les études et recherches qui devront déboucher sur des projets concrets et innovants.

*Le maintien de filières de formation adaptées est indispensable pour permettre le développement et la transmission d'une connaissance approfondie des sciences et technologies nucléaires.*

En plus des compétences spécifiques au nucléaire, la richesse de l'innovation repose sur la capacité à mobiliser de nouvelles compétences touchant à des disciplines scientifiques variées et souvent à l'interface d'autres enjeux industriels.

35

*La Commission considère qu'attirer des compétences variées vers les activités nucléaires doit aussi être une priorité. Sans la reconnaissance clairement affichée du rôle d'une industrie nucléaire sûre et performante dans un mix énergétique décarboné, il sera difficile d'attirer de nouveaux talents vers la R&D.*

### 4.2 LA FORMATION UNIVERSITAIRE ET LA RECHERCHE EN RELATION AVEC LA STRATÉGIE DE LA FILIÈRE

Par filière nucléaire, on entend l'ensemble des acteurs depuis la mine d'uranium jusqu'au stockage des déchets produits par l'industrie électronucléaire. Une filière mobilise donc de nombreux métiers, experts et organismes relevant de nombreuses disciplines qui n'ont pas forcément un lien direct avec les sciences nucléaires.

Les formations au niveau master et ingénieur sont particulièrement exposées au désintérêt pour le nucléaire qui ne répond pas suffisamment aux aspirations des jeunes générations.

*La Commission recommande de veiller à l'adéquation entre le flux de diplômés et les besoins de la filière nucléaire qui sont appelés à croître et à se diversifier au vu des projets annoncés. Elle souligne qu'il existe une forte concurrence entre les différentes filières liées à l'énergie.*

La situation de la formation « à et par la recherche » est symptomatique de l'évolution à la baisse des moyens humains dédiés à la R&D. Le CNRS a relancé son programme interdisciplinaire NEEDS sur l'amont et l'aval du cycle. Toutefois, et selon l'enquête menée annuellement par le CNRS au sein de ses unités de recherche, le nombre d'ETP (ingénieurs de recherche, chercheurs, doctorants, post-doctorants) impliqués dans des activités de recherche touchant à l'énergie nucléaire a diminué de 30 % au moins en 5 ans.

L'examen des réponses aux appels à projets du plan France Relance touchant à la R&D sur la gestion des matières et des déchets radioactifs permet d'établir un constat sans appel : il y a très peu de projets impliquant les laboratoires universitaires et, parmi ces derniers, deux seulement mobilisent les universités d'excellence (Idex/Isite) soutenues fortement par l'État dans le cadre des programmes d'investissements du futur.

*La Commission observe que le désintérêt des acteurs de la recherche, au-delà de ceux traditionnellement impliqués dans la R&D sur les matières et déchets radioactifs, ne fait que croître. Elle recommande que soient mis en place les relais d'information auprès des acteurs de l'enseignement supérieur afin que les initiatives futures, lancées par exemple dans le cadre de France 2030, soient largement connues et anticipées par la communauté académique.*

#### 4.3 LE VERROU DES INSTALLATIONS POUR LA RECHERCHE

Une grande partie des projets de R&D sur les réacteurs, les matières et les déchets, nécessite des installations spécifiques du fait de la radioactivité des matières manipulées. C'est le cas des installations qui visent à l'industrialisation des procédés car elles nécessitent de manipuler des quantités pondérales de matières, proches de celles rencontrées dans les futurs procédés industriels. Ces moyens ne sont plus disponibles dans les laboratoires universitaires classiques.

En France, seul Atalante au CEA Marcoule et les installations d'Orano permettent aujourd'hui de développer une telle R&D.

*La Commission recommande que les programmes de R&D, par exemple les plans France Relance ou France 2030, financent l'accès aux installations permettant de manipuler des quantités pondérales de matières radioactives.*

En Europe, des installations de ce type existent aujourd'hui en Belgique et en Allemagne. Les programmes de R&D européens permettent d'accéder à ces infrastructures spécialisées grâce à des financements spécifiques. Toutefois, s'agissant de la recherche, un verrou de taille émerge depuis quelques années. Dans toute l'Europe, seul le centre commun de recherche de Karlsruhe et Atalante à Marcoule, permettent de manipuler des quantités significatives de matières radioactives (actinides, produits de fission).

Ce petit nombre d'installations accessibles est un frein au futur développement de procédés industriels d'autant plus que les crédits européens diminuent au profit de la fusion.

Il n'existe plus actuellement en Europe de capacité d'irradiation en spectre de neutrons rapides dédiée à la recherche et à la qualification d'objets industriels. A titre d'illustration, les programmes menés par EDF dans ce domaine devraient faire l'objet d'irradiations dans un réacteur russe. Les autres options envisageables aux États-Unis, au Japon ou en Chine, ne sont qu'à l'état de projet d'installation de recherche.

*Au vu de l'absence avérée en Europe d'installation d'irradiation couplée à des moyens d'analyses post-irradiation, la Commission souligne le risque d'arrêt pur et simple de la R&D, et donc des projets, lors du changement d'échelle vers l'industrialisation.*

*La Commission souligne que l'accès à des installations situées à l'étranger s'accompagne souvent d'une obligation de partage de données. Lorsqu'il s'agit de procédés industriels en phase de validation, un tel partage soulève inévitablement des questions de souveraineté concernant notre politique énergétique, ou de propriété intellectuelle.*

#### **4.4 LA DYNAMIQUE DE LA FILIÈRE NUCLÉAIRE, UNE CONDITION NÉCESSAIRE POUR MAINTENIR ET DÉVELOPPER LES COMPÉTENCES**

37

Le dernier réacteur en fonctionnement construit en France date des années 1990 et les difficultés multiples qu'ont connues depuis les constructions d'EPR en Europe montrent que ces grands projets peuvent être très sensibles à la préservation des savoirs techniques et à la maîtrise de la qualité de leur réalisation. Comme l'a illustré le rapport FOLZ en 2019, avoir su réaliser un objet par le passé n'implique pas de pouvoir recommencer aujourd'hui. Il importe donc de maintenir un rythme continu de réalisations de nouveaux projets afin d'éviter de perdre en compétences et en savoir-faire.

Depuis 2020, les pouvoirs publics ont entrepris de dynamiser la filière au travers deux initiatives.

Le plan France Relance, lancé pour faire face aux conséquences industrielles de la crise sanitaire, comporte une partie destinée à la filière nucléaire. Les projets s'inscrivent dans une des trois thématiques rédigées dans les termes suivants.

- Optimisation de la gestion des déchets et meilleure structuration des filières de gestion : développement de procédés et de techniques innovants permettant d'optimiser la gestion des déchets radioactifs, de manière proportionnée en regard des enjeux afférents.
- Valorisation des matières radioactives : développement de procédés et techniques innovants permettant le recyclage et la valorisation des matières radioactives dont les perspectives d'utilisation dans la filière nucléaire ou hors nucléaire s'inscrivent à moyen et long terme.
- Solutions alternatives au stockage géologique profond : identifier et explorer des solutions de gestion des déchets de haute activité et moyenne activité à vie longue alternatives au stockage géologique profond au regard des progrès actuels et des innovations possibles.

Il est certes trop tôt pour porter un regard sur les projets qui seront financés et réellement engagés. Pour autant, la Commission constate que chaque acteur de la R&D répond avec sa logique propre et l'inventaire des propositions montre une grande dispersion. Dans son rapport 15, la Commission avait anticipé plusieurs difficultés, avec au premier rang, les délais inhérents à la procédure retenue pour l'appel à projets. Celle-ci apparaissait peu compatible avec un plan de relance conçu pour impulser rapidement l'activité d'une filière pendant deux ans.

La Commission note que même si les projets ont une durée de deux années, il aura fallu pratiquement deux ans pour les préparer et les sélectionner. Elle constate le faible taux de participation des PME et ETI, même si des efforts ont été faits pour attirer de nouveaux acteurs, par exemple venant de l'aéronautique. De même, il semble que le secteur académique (laboratoires du CNRS et Universités) ait été peu mobilisé.

Le plan France 2030 assigne comme objectif prioritaire l'émergence d'une offre française de petits réacteurs modulaires (SMR) d'ici 2035 et la recherche de technologies sur des réacteurs innovants produisant moins de déchets. Enfin, la construction annoncée de 6 EPR2 d'ici à 2050 et, le cas échéant de 8 réacteurs supplémentaires, sont des facteurs dynamisants pour la filière.

*La Commission regrette que les projets impulsés par l'État n'abordent le cycle du combustible qu'à court terme, dans le cadre du plan France relance. Le plan France 2030, à plus long terme, se focalise sur les réacteurs et omet les besoins de R&D sur le cycle du combustible.*

*Pour l'élaboration et le déploiement d'une stratégie pour la filière nucléaire, la Commission recommande de prêter une attention égale à la disponibilité des ressources humaines, à celle des infrastructures de recherche et enfin à la dynamique industrielle. Les trois calendriers qui en résultent et les financements associés doivent être cohérents sous peine de mettre en danger l'atteinte des objectifs visés.*





## GLOSSAIRE

A & D : assainissement et démantèlement

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

AECL: société canadienne responsable de la recherche, du développement et de la commercialisation des technologies civiles nucléaires (« Atomic Energy of Canada Limited » en anglais)

AIEA: agence internationale de l'énergie atomique

AM : actinides mineurs

Am : américium

Andra : agence nationale de gestion des déchets radioactifs

ASN : autorité de sûreté nucléaire

BTP : bâtiment et travaux publics

BN600 : réacteur à neutrons rapides russe de 600 MWe, centre de Beloïarsk

BN800 : réacteur à neutrons rapides russe de 800 MWe, centre de Beloïarsk

CCAM : couverture chargée en actinides mineurs

CCAm : couverture chargée en américium

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

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

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

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

CNE : commission nationale d'évaluation

CNRS : centre national de la recherche scientifique

COMOR : commission d'orientations du 5<sup>ème</sup> PNGMDR installée par la DGEC

COVID-19 (ou encore "SARS-CoV-2") : "CO" signifie corona, "VI" virus et "D" a été choisi pour "disease" (maladie en anglais). Le chiffre 19 indique l'année de son apparition (2019)

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

CPA : chirped pulse amplification

CU UOx : combustible d'oxyde d'uranium usé

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

DAC : demande d'autorisation de création

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

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

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

DUP : déclaration d'utilité publique

EDF : électricité de France

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

EPR : réacteur à eau pressurisée de 3<sup>ème</sup> génération de 1650 MWe (« european pressurized reactor » en anglais),

ESFR : projet européen dédié aux réacteurs à neutrons rapides

ETI : entreprise de taille intermédiaire

FAVL : déchets de faible activité à vie longue

FMA-VC : déchets de moyenne activité à vie courte

GIFEN : groupement des industriels français de l'énergie nucléaire

HAVL : déchets de haute activité à vie longue

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

ICPE : installation classée pour la protection de l'environnement

INB : installation nucléaire de base

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

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

IRSN : institut de radioprotection et de sûreté nucléaire

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

MAVL : déchets de moyenne activité à vie longue

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

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

MSR : réacteur à sel fondu (« molten salt reactor » en anglais),

MSR-R : réacteur à sels fondus à neutrons rapides

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

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

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)

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

PCA : plan de continuité d'activité

PIA : programme d'investissement d'avenir

PNGMDR : plan national de gestion des matières et déchets radioactifs

PME : petite et moyenne entreprise

PMLT : plan à moyen et long terme

PPE : planification pluriannuelle de l'énergie

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)

RCD : reprise et conditionnement des déchets radioactifs anciens

REP : réacteur à eau pressurisée

REX : retour d'expérience

RNR Na : réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium.

SCK-CEN : centre de recherche de Mol en Belgique

SKB : entreprise suédoise de gestion des déchets radioactifs

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

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

TFA : déchets de très faible activité

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

UOx : oxyde d'uranium

URE : uranium de retraitement enrichi (assemblages combustibles)

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

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

URE : uranium de retraitement enrichi

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





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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Virginie MARRY** – Professeur des universités, Sorbonne université.

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

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



## ANNEXE II : ACTIVITÉ DE LA COMMISSION

Depuis la publication de son précédent rapport en juin 2021, la Commission a présenté son rapport n° 15 à l'OPECST. Une délégation de la Commission s'est rendue à Bure le 25 octobre 2021 pour échanger avec les membres du Comité local d'information et de suivi (CLIS) du laboratoire de Bure (cf. annexe 5).

La CNE a été auditionnée par l'OPECST le 25 novembre 2021 et le 18 janvier 2022 sur l'évolution de la gouvernance du PNGMDR. Ces auditions ont donné suite à une saisine de l'OPECST pour que la CNE évalue dans ses prochains travaux l'impact des réacteurs innovants et des scénarios d'évolution du parc électronucléaire sur le cycle des matières et des déchets radioactifs (cf. annexe 7)

La Commission a procédé à 12 auditions plénières et 8 auditions restreintes (cf. annexe 5), organisées dans un format aménagé en raison du contexte sanitaire (la moitié des participants étant en présentiel, les autres intervenants par visio-conférence).

Notons l'organisation de 4 auditions spécifiques, avec 2 auditions entièrement coordonnées par la CNE2 :

15 décembre 2021 : Plan de relance – appel à projet consacré à la gestion des matières et déchets ;

16 décembre 2021 : Les « alternatives » au stockage profond ;

et deux auditions à préparation renforcée (nécessitant une réunion préparatoire pour établir l'ordre du jour avec l'organisme coordonnant l'audition) :

09 février 2022 : CEA – Thème de la séparation : actinides majeurs & MRREP, actinides mineurs.

10 février 2022 : Andra – La maîtrise de la qualité des colis destinés à être stockés dans Cigéo.

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

L'amélioration du contexte sanitaire a permis à la Commission de relancer les visites techniques (cf. annexe 5) :

- Visite de l'INB56 au CEA de Cadarache le 7 juillet 2021 au matin.
- Visite du chantier ITER le 8 juillet 2021 après-midi.
- Visite du site d'Orano à Malvesi les 6 et 7 octobre 2021.
- Visite du laboratoire de Bure le 25 octobre 2021.
- Visite du site d'Orano à Bessines sur Gartempe le 29 mars 2022.

La liste des documents pris en compte pour ce rapport (arrêtée au 15 avril) est donnée en annexe 6.



## ANNEXE III : AUDITIONS REALISÉES PAR LA COMMISSION

### AUDITIONS PLÉNIÈRES

- 20 octobre 2021 : CEA – R&D sur la mesure des faibles radioactivités disséminées dans des grands volumes et aspects méthodologiques – Installation CASCAD
- 21 octobre 2021 : Andra – Les volets socio-économiques et sociétaux du projet Cigéo
- 17 novembre 2021 : CEA – Panorama des installations CEA du cycle nucléaire
- 18 novembre 2021 : Andra – Les volets science et technologie du dossier de DAC du projet Cigéo
- 15 décembre 2021 : Audition coordonnée par la CNE2 – Volet gestion des matières et déchets (AAP)
- 16 décembre 2021 : Audition coordonnée par la CNE2 – Les « Alternatives » au stockage profond
- 09 février 2022 : CEA – Thème de la séparation : actinides majeurs & MRREP, actinides mineurs (audition à préparation renforcée)
- 10 février 2022 : Andra – La maîtrise de la qualité des colis destinés à être stockés dans Cigéo (audition à préparation renforcée)
- 09 mars 2022 : CEA – Panorama international
- 10 mars 2022 : Andra – Le dossier de DAC du projet Cigéo (contenu, architecture de référence, phase industrielle pilote...)
- 22 mars 2022 : CEA – Etudes des réacteurs innovants : SMR/AMR
- 23 mars 2022 : Andra – Les déchets FAVL et les déchets tritiés

### AUDITIONS RESTREINTES

- 16 septembre 2021 – matin : Administrateur général du CEA
- 22 septembre 2021 – matin : Andra
- 22 septembre 2021 – après-midi : Orano
- 22 septembre 2021 – après-midi : EDF
- 23 septembre 2021 – matin : Haut-Commissaire à l'énergie atomique.
- 23 septembre 2021 – matin : CNRS
- 04 février 2022 – matin : EDF
- 10 février 2022 – matin : Orano



## ANNEXE IV : LISTE DES PERSONNES AUDITIONNÉES PAR LA COMMISSION

### *Andra*

ABADIE Pierre-Marie  
ALAVOINE Olivier  
ARMAND Gilles  
BARKATTE Claudie  
BONNEVILLE Alain  
BUTTY Estelle  
CALSYN Laurent  
CAMPS Guillaume  
CEOLA Fabrice  
CHARRIN Nicolas  
CHOTARD Sandrine  
CORDIER Bérangère  
DEYDIER Valérie  
DELORT Daniel  
DE LA VAISSIERE Rémi  
DENIS-VIENOT Matthieu  
EGO Frédéric  
GETREY Christophe  
GUARISO Maurice  
GUILLOT Sonia  
HURET Emilia  
LANES Eric  
LEVIEUX Marine  
LIEBARD Florence  
LOREAUX Philippe  
MANDOKI Robert  
MENENTEAU Jean-Michel  
NORTURE Anne  
OZANAM Odile  
PEPIN Guillaume  
PLAS Frédéric  
REDON Paul-Olivier  
ROBINET Jean-Charles  
ROMERO Marie-Ange  
SCHUMACHER Stephan  
TALANDIER Jean  
THEODON Louise  
TORRES Patrice  
TRENTY Laurent  
VASSALO François  
VOINIS Sylvie  
WASSELIN Virginie  
WENDLING Jacques  
YVEN Béatrice

### *Andra (invités)*

AUBERT Jean-Pierre - Comité Ethique et  
Société  
VARNUSSEON Mélanie - GIP Objectif Meuse

ZUBER Stéphane – Comité Ethique et  
Société

### *BRGM*

FRISSANT Nicolas

### *CEA*

AVERTY Xavier  
BERTHELEMY Michel  
CAIL Olivier  
CHABERT KORALEWSKI Christine  
CHAIX Pascal  
CHARTON Frédéric  
CHARTON Sophie  
CHAUVIN Nathalie  
CORDIER Pierre-Yves  
CORNET Stéphanie  
D'ALETTO Tony  
DEFFAIN Jean-Paul  
DELACHE Fabienne  
DELPECH Marc  
DINH Binh  
FEDERICI Eric  
FELIX Sunil  
GAUTHE Paul  
GERMAIN Guillaume  
GUETON Olivier  
GUILBAUD Philippe  
HOLLAND Stéphanie  
JOUSSOT-DUBIEN Christophe  
LE BOT Christophe  
MIEUSSET Thomas  
OUDOT Christophe  
PASCAL Vincent  
PHELIP Mayeul  
PUSSIEUX Thierry  
RODRIGUEZ Gilles  
ROUDIL Danièle  
RUGGIERI Jean-Michel  
SALUDEN-MAGNIN Magali  
SARRADE Stéphane  
SERP Jérôme  
SOREL Christian  
SUDREAU François  
TEISSEIRE Béatrice

## *CHYN*

KERROU Jahouar

## *CNRS/IN2P3*

DAVID Sylvain  
MOUROU Gérard  
PAIN Reynald

## *COMMISSION INNOVATION DE LA CPU*

RETAILLEAU Sylvie

## *DGEC*

BOUYT Guillaume  
LEGENDRE Fabrice

## *EDF*

BARTHOLEMY Nicolas  
BUISSET Richard  
COLLIGNON Claire  
GIRAUD Olivier  
LAUGIER Frédéric  
LE MONIES DE SAGAZAN Henri  
MICHEL Thibaud  
PELLENZ Gilles  
SABATIER Alain  
TEMPIER Fabrice  
VAAST Guillaume

## *HC*

LANDAIS Patrick

## *IRSN*

BAUDRAN Olivier  
LE BARS Igor

## *ITER FRANCE*

Olivier GASTALDI

## *ORANO*

BRION Thomas  
BRUT Stéphane  
DUMAS Augustin  
EVANS Cécile  
FORBES Pierre  
HANDSHUH Alan  
LEBRUN Marc  
LIBERGE Renaud  
LOSINGER Mathieu  
MOREL Bertrand  
ROMARY Jean-Michel  
SEMENTZ Gérald  
STEPHAN Lavinia  
TOUMOUCHE Yacine  
ZILBER Marine

## *SCK.MOL*

AIT ABDERRAHIM Hamid

## ANNEXE V : PRÉSENTATIONS ET VISITES DE LA COMMISSION

### *Présentations de la Commission*

- 08 juillet 2021 : Présentation du rapport n° 15 à l'OPECST  
25 octobre 2021 : Présentation du rapport n° 15 au Clis de Bure

### *Visites de la Commission*

- 7 juillet 2021 – matin : Visite de l'INB-56 sur le site du CEA de Cadarache.  
8 juillet 2021 – après-midi : Visite du chantier ITER et présentation du projet par Bernard Bigot.  
6 et 7 octobre 2021 : Visite du site d'Orano à Malvesi.  
25 octobre 2021 – après-midi : Visite du laboratoire souterrain de Bure.  
29 mars 2022 : Visite du site d'Orano à Bessines sur Gartempe.



## ANNEXE VI : LISTE DES DOCUMENTS TRANSMIS À LA COMMISSION EN 2021-2022

### *OPECST*

- Rapport au nom de l'OPECST de Mme Émilie CARIOU, députée, et M. Bruno SIDO, sénateur, sur la préparation de la cinquième édition du plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR), 3 mars 2022, n° 5144 (Assemblée nationale) et n° 560 (Sénat.)
- Rapport au nom de l'OPECST de M. Thomas GASSILLOUD, député, et M. Stéphane PIEDNOIR, sénateur, sur l'énergie nucléaire du futur et les conséquences de l'abandon du projet de réacteur nucléaire de 4e génération « Astrid », 8 juillet 2021, n° 4331 (Assemblée nationale) et n° 758 (Sénat.)

### *Andra*

- Programme de l'Andra sur la mémoire des centres de stockages de déchets radioactifs – Une démarche artistique au service de la transmission de la mémoire des stockages de déchets radioactifs – Cécile Massart - Décembre 2021.
- Les essentiels de l'inventaire national 2022.
- Newsletter du Mag de l'Andra – Avril 2022.
- Note de synthèse - l'évaluation socioéconomique du projet global Cigéo.
- Rapport du comité d'experts économistes sur l'évaluation socioéconomique du projet global Cigéo .).
- Rapport de contre-expertise indépendante de l'évaluation socioéconomique du projet global Cigéo .).
- Suites à donner par l'Andra en réponse à l'avis du SGPI et de contre-expertise de l'ESE de Cigéo .

### *CEA*

- Magazine « Les Défis du CEA » – 2021-2022.
- Les Clefs CEA – 2021-2022.



## ANNEXE VII : SAISINE DE LA CNE PAR L'OPECST

R É P U B L I Q U E F R A N Ç A I S E



M. Gilles Pijaudier-Cabot  
Président de la CNE2  
246, boulevard Saint-Germain  
75700 – PARIS

Paris, le 3 mars 2022



Monsieur le Président,

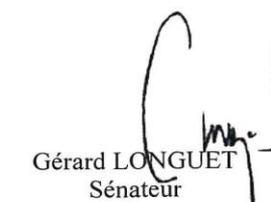
L'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques a adopté en juillet 2021 un rapport sur les conséquences de l'arrêt du projet de réacteur de quatrième génération Astrid, et ce matin même un rapport sur la préparation du prochain Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR). Tous les rapporteurs ont mis en évidence la nécessité de préciser les missions de la Commission nationale d'évaluation des recherches et études sur la gestion des matières et déchets radioactifs (CNE2) à la suite des changements intervenus récemment, tant dans les recherches sur les réacteurs innovants que dans la gouvernance du PNGMDR.

C'est la raison pour laquelle nous souhaitons que, conformément aux dispositions de l'article 9 de la loi n° 2006 739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs, la CNE2 évalue dans le cadre de ses prochains travaux l'impact des réacteurs innovants et des scénarios d'évolution du parc électronucléaire sur le cycle des matières et des déchets radioactifs.

Nous souhaitons également que la CNE2 tienne le Parlement informé des enjeux d'ordre scientifique et technique traités dans le cadre des débats de la Commission d'orientation du PNGMDR (COMOR), ainsi que du Comité d'expertise et de dialogue qui devrait être installé prochainement par la DGEC sur les « alternatives au stockage profond ». À cette fin, nous avons demandé à Mme Barbara Pompili, ministre de la Transition écologique, que la Commission puisse assister en tant qu'observateur aux travaux de ces deux instances, ce qui lui permettrait également d'y contribuer au travers de ses rapports.

Nous vous prions d'agréer, Monsieur le Président, l'expression de notre considération distinguée.

  
Cédric VILLANI  
Député  
Président

  
Gérard LONGUET  
Sénateur  
Premier vice-président

*Copie : M. Laurent Michel, directeur général de l'Énergie et du Climat*

SECRETARIAT ADMINISTRATIF :

Assemblée nationale : 126, rue de l'Université 75355 Paris 07 SP  
☎ 01 40 63 70 65 [secretariat-opecest@assemblee-nationale.fr](mailto:secretariat-opecest@assemblee-nationale.fr)  
Sénat : 15, rue de Vaugirard 75291 Paris Cedex 06  
☎ 01 42 34 31 07 [opecest-secretariat@senat.fr](mailto:opecest-secretariat@senat.fr)

OFFICE  
PARLEMENTAIRE  
D'ÉVALUATION  
DES CHOIX  
SCIENTIFIQUES  
ET  
TECHNOLOGIQUES

LE PRÉSIDENT

LE PREMIER  
VICE-PRÉSIDENT

OPECST-2022-005



## ANNEXE VIII : LES PRINCIPAUX TYPES DE RÉACTEURS EXISTANTS OU À L'ÉTUDE

### *Les réacteurs commerciaux de puissance (classe 1000 MWe)*

Ces réacteurs sont destinés à être connectés aux réseaux électriques de grande capacité.

Les premiers réacteurs de génération III et III+ ont été mis en service au Japon et en Russie respectivement en 1996/1997 et 2012. Plusieurs réacteurs de ces générations sont en fin de construction et sont progressivement connectés au réseau en Europe, en Chine, en Inde, aux États-Unis et dans quelques pays primo accédants (11 ont pris la décision, 17 ont l'intention). Aux États-Unis, l'autorité réglementaire a certifié sept nouveaux concepts de réacteurs en 2020.

**Tableau 1 : Mise en service industriel de réacteurs de puissance après 2010**

Pays d'accueil	Entre 2010-2014	Entre 2015-2019	2020 - ....
Argentine			2 PWR- 1,2 - <b>Russie</b>
Biélorussie			2 PWR- 1,2 - <b>Russie</b>
Chine	9 PWR - 1,1 - Chine	2 PWR - 0,65 - Chine 12 PWR - 1,1 à 1,2 - Chine 2 PWR - 1,25 - <b>USA</b> 2 PWR - 1,2 - <b>USA &amp; Japon</b> 2 PWR - 1,1 - <b>Russie</b> 1 PWR - 1,75 - <b>France</b>	1 PWR -1,75 - <b>France</b>
Corée du Sud	5 PWR - 1 - Corée	1 PWR - 1,4 - Corée	1 PWR -1,4 - Corée
Emirats			4 PWR -1,4 - <b>Corée</b>
États-Unis		1 PWR -1,2 - USA	
Finlande			1 PWR -1,75 - <b>France</b>
Inde	1 PWR - 1 - <b>Russie</b>	1 PWR - 1 - <b>Russie</b>	
Iran	1 PWR - 1 - <b>Russie</b>		
Pakistan			2 PWR -1 - <b>Chine</b>
Russie	1 PWR -1 - Russie	2 PWR -1 - Russie 2 PWR -1,2 - Russie 1 FBR - 0,8 - Russie	

**NB :** Dans chaque case, on trouve dans l'ordre le nombre de réacteurs, le type, la puissance en GWe et le pays fournisseur, en rouge s'il n'est pas le pays d'accueil.

En Chine, la construction du premier réacteur de génération III, Hualong-1, a commencé en mai 2015.

Le réacteur a divergé en octobre 2020, a été connecté au réseau en novembre et a commencé son exploitation commerciale le 30 janvier 2021. Cela contraste avec les retards importants (en moyenne 4 ans) et les dérives de coûts constatés pour les autres projets ailleurs dans le monde, que l'on peut attribuer en grande partie à la perte de maîtrise de la fonction d'architecte-ensemblier et au manque de main d'œuvre qualifiée dans les pays où peu de chantier de nouveaux réacteurs ont été ouverts ces dernières décennies. Les deux réacteurs à neutrons rapides RNR-Na (mais de génération III) de grande puissance connectés au réseau (600 et 800 MWe) se trouvent en Russie.

**Tableau 2 : Réacteurs de puissance en construction, par date de début de construction**

Pays	Avant 2010	Entre 2010-2014	Entre 2015-2019
Bangladesh			2 PWR - 1,2 - Russie
Brésil		1 PWR - 1,4 - Allemagne	
Chine		2 PWR - 1,2 - Chine	7 PWR - 1,2 - Chine
Corée du Sud		2 PWR - 1,4 - Corée	2 PWR - 1,4 - Corée
États-Unis		2 PWR - 1,25 - USA	
France	1 PWR - 1,75 - France		
Inde	1 FBR - 0,5 - Inde	4 PHWR - 0,7 - Inde	2 PWR - 1 - Russie
Japon	1 BWR - 1,4 - Japon	1 BWR - 1,4 - Japon	
Royaume-Uni			2 PWR - 1,75 - France
Russie		2 PWR - 1,2 - Russie	1 PWR - 1,2 - Russie
Slovaquie	2 PWR - 0,5 - Russie		
Turquie			1 PWR - 1,2 - Russie

**NB :** Dans chaque case, on trouve dans l'ordre le nombre de réacteurs, le type, la puissance en GWe et le pays fournisseur, en rouge s'il n'est pas le pays d'accueil.

La préparation du déploiement de nouveaux réacteurs de génération IV est l'objectif du Forum international génération IV (GIF). Un nombre réduit de concepts jugés prometteurs sont actuellement à l'étude ; les réacteurs sont soit à neutrons thermiques (filiale HTR principalement), soit à neutrons rapides (majoritaires dans les concepts de GEN-IV) ; les cycles peuvent être ouverts ou fermés. Le GIF estime que le développement de chaque système exigera, de la part des pays qui l'entreprendront, plusieurs milliards de US\$ et prendra deux à trois décennies avant d'aboutir.

### *Les petits réacteurs modulaires (SMR en anglais)*

On classe dans cette catégorie les réacteurs d'une puissance de 10 à 300 MWe. Ces réacteurs de tailles modérées ne constituent en réalité pas un développement récent de l'industrie nucléaire. Les réacteurs construits dans les années 1950 et 1960 dérivait de fait des petits réacteurs de propulsion navale. Ce qui change la donne est que les concepts étudiés tirent avantage de la réduction de taille pour intégrer dans la construction un haut degré de modularité, de standardisation et pour réaliser au maximum la construction des différents composants en usine et non sur chantier, cela dans le but d'améliorer la maîtrise de la construction des réacteurs en qualité et en durée et partant la viabilité économique de l'énergie nucléaire.

On peut distinguer deux grands groupes de petits réacteurs modulaires qui regroupent chacun environ la moitié des projets en cours :

- Les réacteurs à neutrons thermiques et à eau légère (REL) sont ceux ayant le degré de maturité technologique et le niveau de préparation de leur autorisation les plus élevés. Ils peuvent être mono ou multi modules pour, par exemple, remplacer des centrales utilisant du combustible fossile ou être transportables, par exemple par barge. Ces réacteurs commencent à être mis en fonctionnement (Russie), ou sont en construction (Argentine, Chine, États-Unis) ou encore autorisés (Corée du Sud).
- Les réacteurs de génération IV à neutrons rapides et combustible solide (les réacteurs à combustibles liquides - les sels fondus - sont encore à l'état de conception préliminaire) utilisent d'autres caloporteurs que l'eau : les métaux liquides, les sels fondus ou un gaz. La maturité technologique de ces réacteurs n'est pas au même niveau que celle des REL. Les connaissances doivent être approfondies dans de nombreux domaines dont les combustibles (HALEU ou combustible U/Pu/actinides) et les matériaux de structures. Plusieurs dizaines de concepts font actuellement l'objet d'études à travers le monde. Chacun de ces concepts devra aussi être associé à un cycle du combustible ; cependant l'hétérogénéité des concepts et la diversité des degrés de maturité font que les efforts de recherche et développement ont jusqu'à présent porté essentiellement sur les réacteurs et peu sur les caractéristiques du cycle à leur associer. Les pays les plus à la pointe dans ce domaine sont les États-Unis, le Canada, La Chine et la Russie. Une attention particulière est à accorder à la filière des HTR à combustible hybride qui n'est pas nouvelle mais nécessite de reprendre en main les procédés de fabrication à l'échelle industrielle (ce qui n'est pas trivial) sous assurance qualité. Enfin, le développement de combustibles denses (métal, nitrure et carbure) nécessitera des efforts de R&D conséquents.

### Tableau 3 : Inventaire des projets de SMR<sup>5</sup>, AMR<sup>6</sup>, MMR<sup>7</sup> portés à la connaissance de la Commission

Nota : dans le tableau 3, la colonne « statut » est un indicateur de maturité, soit, par maturité décroissante :

- 6 : en fonctionnement
- 5 : construction
- 4 : en cours d'autorisation (*licencing*)
- 3 : conception détaillée (*detailed design*)
- 2 : conception préliminaire (*basic design*)
- 1 : étude de concept (*conceptual design*)

Les projets sont présentés par ordre de maturité décroissante. La dernière colonne n'a pas été traduite en français car le libellé anglais contient des termes réglementaires spécifiques à la réglementation du pays.

Les données sont extraites du SMR Book de 2020 publié par l'AIEA<sup>8</sup>.

---

<sup>5</sup> Small modular reactor (SMR)

<sup>6</sup> Advanced modular reactor (AMR)

<sup>7</sup> Micro-modular reactor

<sup>8</sup> Advances in Small Modular Reactor Technology Developments A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) 2020 Edition ([https://aris.iaea.org/Publications/SMR\\_Book\\_2020.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf))

Concept	Pays	Concepteur	Puiss. (MWe)	Caloporteur	Modérateur	Combustible	Enrichissement (%)	Spectre	Statut	État d'avancement du projet
KLT40S	Russie	OKBM Afrikantov	35	eau pressurisée	eau pressurisée	UO <sub>2</sub>	18,6	thermique	6	2 reactor-modules in Operation in Akademik Lomonosov Floating NPP in Pevek
RITM-200M	Russie	OKBM Afrikantov	50	eau pressurisée	eau pressurisée	UO <sub>2</sub>	< 20	thermique	6	6 brise-glaces en fonctionnement (version à terre disponible)
CAREM	Argentine	CNEA	30	eau pressurisée	eau pressurisée	UO <sub>2</sub>	3,1	thermique	5	Prototype en construction
HTR-PM	Chine	INET, Tsinghua Univ.	210	hélium	graphite	boulets / particules TRISO	8,5	thermique	5	Finalizing construction
Aurora	États-Unis	OKLO	1,5	métal liquide		UZr (métal)	19,75	rapide	5	Accepted combined license application by US NRC
SMART	Corée et Arabie Saoudite	KAERI, K.A. CARE	107	eau pressurisée	eau pressurisée	UO <sub>2</sub>	< 5	thermique	4	Licensed / standard design approval
NuScale	États-Unis	NuScale Power Inc.	60	eau pressurisée	eau pressurisée	UO <sub>2</sub>	< 4,95	thermique	4	Under design certification review
BWRX-300	États-Unis et Japon	GE Hitachi & Hitachi GE Nuclear Energy	270-290	eau bouillante	eau bouillante	UO <sub>2</sub>	variable (3,4 en moyenne, 4,95 max)	thermique	4	Pre-licensing in UK, Canada and the US certification
Xe-100	États-Unis	X Energy, LLC	82,5	hélium	graphite	oxycarbure (UCO) et	15,5	thermique	4	Design certification review

Concept	Pays	Concepteur	Puiss. (MWe)	Caloporteur	Modérateur	Combustible	Enrichissement (%)	Spectre	Statut	État d'avancement du projet
						boulets à particules				
ACP100	Chine	CNNC/NPIC	125	eau pressurisée	eau pressurisée	UO <sub>2</sub>	< 4,95	thermique	3	Detailed design
ACPR50S	Chine	CGNPC	50	eau pressurisée	eau pressurisée	UO <sub>2</sub>	< 5	thermique	3	Detailed design
GTHTR300	Japon	JAEA	100 - 300	hélium	graphite	particules TRISO	14	thermique	3	Pre-licensing / basic design completed
BREST-OD-300	Russie	NIKIET	300	plomb	NA	nitrure (mixte d'uranium et de plutonium)	jusqu'à 14,5	rapide	3	Detailed design (divergence prévue en 2026)
4S	Japon	Toshiba Corporation	10	sodium	NA	alliage U-Zr (métal)	< 20	rapide	3	Detailed design
SVBR-100	Russie	JSC AKME Engineering	100	eutectique plomb-bismuth	NA	UO <sub>2</sub>	< 19,3	rapide	3	Detailed design (construction prévue en 2026)
SHELF	Russie	NIKIET	6,6	eau pressurisée	eau pressurisée	UO <sub>2</sub>	19,7	thermique	2	Basic Design
PBMR-400	Afrique du Sud	PBMR SOC, Ltd	165	hélium	graphite	lit de boulets	uranium à 9,6 % ou Pu de qualité militaire	thermique	2	Basic design
IMSR	Canada	Terrestrial Energy Inc.	195	fluorure	graphite	fluorure	< 5	thermique	2	Basic Engineering in progress

Concept	Pays	Concepteur	Puiss. (MWe)	Caloporteur	Modérateur	Combustible	Enrichissement (%)	Spectre	Statut	État d'avancement du projet
ThorCon	Indonésie	Martingale, ThorCon Consortium	250	NaF, BeF <sub>2</sub> molten salt	graphite	UF <sub>4</sub> , ThF <sub>4</sub>	5 (min) à 19,7 (max)	thermique	2	Basic design completed
FUJI	Japon	International Thorium Molten Salt	200	fluorure	graphite	sel fondu (uranium et thorium)	2 (0,24 % U <sub>233</sub> + 12 % Th)	thermique	2	Basic design
CANDU SMR	Canada	Candu Energy	300	eau lourde	eau lourde	Uranium naturel	non enrichi	thermique	1	Conceptual design
NUWARD	France	EDF	2 x 170	eau pressurisée	eau pressurisée	UO <sub>2</sub>	< 5	thermique	1	Conceptual design
UK-SMR	Angleterre	Rolls Royce Plc.	443	eau pressurisée	eau pressurisée	UO <sub>2</sub>	4,95 (max)	thermique	1	Conceptual design, Pre-licensing in UK
GT-MHR	Russie	OKBM Afrikantov	288	hélium	graphite	particules dans des blocs de graphite	uranium à 14-18 % ou Pu de qualité militaire	thermique	1	Preliminary Design completed
SC-HTGR	États-Unis	Framatome	272	hélium	graphite	particules d'oxycarbure (UCO) et TRISO dans des blocs de graphite	14,5 en moyenne (18,5 max)	thermique	1	Conceptual design
EM <sup>2</sup>	États-Unis	General Atomics	265	hélium	NA	Carbure d'uranium (UC)	14,5	rapide	1	Conceptual design
ARC-100	États-Unis	Advanced Reactor Concepts	100	sodium	NA	alliage U-Zr (métal)	13,1	rapide	1	Conceptual design

Concept	Pays	Concepteur	Puiss. (MWe)	Caloporteur	Modérateur	Combustible	Enrichissement (%)	Spectre	Statut	État d'avancement du projet
CA Waste Burner	Danemark	Copenhagen Atomic	0,1-0,25	sels fondus	eau lourde	LiF-ThF <sub>4</sub>		thermique	1	Conceptual design
Stable Salt Reactor	Angleterre et Canada	Moltex Energy	300	ZrF <sub>4</sub> /KF/NaF	NA	sel fondu dans un tube hexagonal	4,95	rapide	1	Conceptual design
KP-FHR	États-Unis	Kairos Power	140	fluorure (Li <sub>2</sub> BeF <sub>4</sub> )	graphite	particules TRISO	19,75	thermique	1	Conceptual design
MCSFR	États-Unis et Canada	Elysium Industries	50	NaCl-XCl <sub>2</sub> -UCl <sub>3/4</sub> -PuCl <sub>3</sub> -FPCL <sub>y</sub>	NA	chlorure	10 % Pu fissile / (Pu+U) or 15 % enriched HALEU	rapide	1	Conceptual design
eVinci™	États-Unis	Westinghouse	2-3,5	caloduc / heat pipe reactor	hydrure de métal	particules TRISO	5 - 19,75	thermique	1	Conceptual design
MMR	États-Unis	Ultra Safe Nuclear Corporation	5	hélium	graphite	FCM	9-12	thermique	1	Conceptual/ Basic
U-Battery	Angleterre	Urenco	4	caloduc / heat pipe reactor	graphite	particules TRISO		thermique	1	Conceptual design
MoveLuX™	Japon	Toshiba Corporation	3 à 4	caloduc (sodium heat-pipe cooled)	hydrure de calcium (CaH <sub>2</sub> )	U <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> (silicure)	4,8 - 5	thermique	1	Conceptual design

## ANNEXE IX : FICHES DE SYNTHÈSE PUBLIÉES PAR LA CNE EN MARS 2022

Les fiches ci-dessous, préparées par la Commission et adressées à l'OPECST en mars 2022, visent à identifier les principaux enjeux relatifs à la gestion des matières et déchets radioactifs.

Elaborées à partir des cinq derniers rapports de la Commission (rapports 11 à 15), ces fiches rassemblent nos principales recommandations et forment une synthèse qui a vocation à être rendue publique, comme le sont déjà les rapports dont elles sont issues.

La première fiche rappelle les missions de la Commission.

Les autres fiches abordent les thèmes suivants :

- Le projet de stockage géologique Cigéo.
- Les alternatives au stockage profond.
- L'optimisation du cycle du combustible.
- Les futurs ateliers du cycle du combustible nucléaire.
- L'entreposage des matières et déchets radioactifs.
- La gestion des déchets de faible activité à vie longue (FAVL).
- Formation, expertise et compétences.



## **FICHE 1 : PRÉSENTATION DE LA CNE**

Les décisions indispensables sur le cycle du combustible nucléaire doivent, compte tenu de leur impact économique et environnemental, reposer sur le socle des connaissances scientifiques les plus abouties.

C'est la mission de la Commission nationale d'évaluation des études et des recherches relatives à la gestion des matières et déchets radioactifs (CNE) de suivre et d'évaluer les travaux scientifiques et technologiques concernant le traitement, l'utilisation, l'entreposage ou le stockage des matières et déchets radioactifs.

Instituée par la loi en 1991, confirmée et élargie dans ses missions par la loi en 2006, la CNE rassemble des experts 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 au plus haut niveau de compétences de leur secteur, les membres de la CNE exercent leurs fonctions bénévolement et sont indépendants de la filière nucléaire française : organismes de recherche, exploitants ou gestionnaires du cycle.

Les analyses de la CNE sont réalisées au prisme de l'ensemble des disciplines scientifiques maîtrisées par ses membres : chimie, génie chimique, physique nucléaire, physique des réacteurs, sciences des matériaux et sciences de l'ingénieur, géologie, hydrogéologie, sciences environnementales, sociales et économiques, etc.

La CNE publie, depuis 1994, un rapport annuel faisant un point d'étape de l'état des connaissances en rapport avec les études et recherches sur les matières et matériaux radioactifs, en France comme à l'étranger. Pour cela, la CNE auditionne l'ensemble des acteurs de la filière tout au long de l'année et y consacre, chaque mois, deux jours entiers auxquels s'ajoutent des séances de travail et deux séminaires internes par an. Elle effectue régulièrement des missions d'information chez les opérateurs de la filière, français ou étrangers. Son rapport annuel est transmis au Parlement puis rendu public. Elle est régulièrement mandatée par l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et techniques (OPECST) sur des sujets d'actualité.

Pour en savoir davantage : [www.cne2.fr](http://www.cne2.fr)

### **POINT DE CONTACT :**

François STORRER, Secrétaire général et conseiller scientifique : [francois.storrer@cne2.fr](mailto:francois.storrer@cne2.fr)



## FICHE 2 : LE PROJET DE STOCKAGE GÉOLOGIQUE CIGÉO<sup>9</sup>

### Les enjeux

*En France, le choix du stockage géologique pour les déchets de haute et moyenne activité à vie longue (HAVL-MAVL) produits par le parc actuel est inscrit dans les Lois n° 2006-739 du 28 juin 2006 et n° 2016-1015 du 25 juillet 2016. Pour ces déchets, le stockage géologique est l'exutoire qui fait l'objet d'un consensus scientifique. Le projet français serait localisé en Meuse – Haute Marne, près de Bure, et il porte le nom de « Projet Cigéo ».*

### Le panorama international

*Les deux pays les plus avancés vers la mise en place d'un stockage géologique profond sont la Suède et la Finlande. Dans les autres pays, les processus décisionnels sont beaucoup moins avancés, ou doivent être redéfinis.*

*La Finlande a validé sa décision de mettre les combustibles usés en stockage profond en 2020. Elle est à présent en train de construire le site de stockage géologique. Le gouvernement suédois a décidé en janvier 2022 la construction d'un système de mise en conteneur et d'une installation de stockage géologique des combustibles usés.*

### L'état des recherches en France

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

Avant la fin de l'instruction de la DAC, des connaissances restent à consolider, notamment sur deux sujets : la production d'hydrogène par radiolyse ou corrosion, qui provoquera sur le long terme une montée en pression temporaire dans le stockage, et le stockage de déchets MAVL bitumés qui avait fait l'objet de réserves relatives au risque d'incendie (*en 2018*).

### Les recommandations de la Commission

La Commission attire l'attention des pouvoirs publics sur les risques de différer indéfiniment la décision de création [et] recommande instamment que les pouvoirs publics mobilisent l'ensemble des parties prenantes pour que la demande d'autorisation de création soit déposée [...], de sorte que ce soit bien notre génération qui assume la responsabilité des déchets qu'elle a produits.

L'Andra est le maître d'ouvrage du projet Cigéo. La Commission souligne la nécessité de la mise en place d'un niveau de gouvernance autonome et adapté au pilotage opérationnel de Cigéo, sous l'autorité de l'Andra, afin que les décisions courantes nécessaires à la conduite du projet puissent être instruites sans retard. Cette gouvernance opérationnelle se distingue de la gouvernance stratégique des matières et déchets radioactifs que la direction générale de l'énergie et du climat met en œuvre.

---

<sup>9</sup> Ce texte est directement extrait des rapports publiés par la CNE au cours des 5 dernières années ; les parties en italique sont des commentaires contextuels ajoutés pour faciliter la compréhension du sujet. La liste des acronymes est présentée au verso de cette fiche.

## LISTE DES ACRONYMES :

- Andra : agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs ;
- Cigéo : centre industriel de stockage géologique (projet français porté par l'Andra de centre de stockage des déchets radioactifs en couche géologique profonde) ;
- DAC : demande d'autorisation de création ;
- HAVL-MAVL : déchets de haute et moyenne activité à vie longue ;
- MAVL : déchets de moyenne activité à vie longue.

## FICHE 3 : LES ALTERNATIVES AU STOCKAGE PROFOND<sup>10</sup>

### Les enjeux

La PPE a prévu de soutenir les recherches sur des solutions « alternatives » de gestion des déchets à vie longue. [...] Ces perspectives ne pourraient concerner que les déchets d'un parc futur. Une « alternative » au stockage profond s'entend, pour la Commission, comme une installation ou une combinaison d'installations, éventuellement associées à des procédés de traitement et de conditionnement spécifiques, qui permettent de garantir le même niveau de sûreté qu'un stockage profond pendant la même durée et sous les mêmes contraintes.

### Le panorama international

Tous les pays utilisant l'énergie nucléaire considèrent que le stockage géologique des déchets HAVL-MAVL est la solution de référence. [...] La Directive 2011/70/EURATOM considère que « l'entreposage de déchets radioactifs, y compris à long terme, n'est qu'une solution provisoire qui ne saurait se substituer au stockage ».

### L'état des recherches en France

Il n'y a pas lieu de remettre en cause le consensus scientifique au sujet de l'entreposage de longue durée [...] ne peut donc figurer parmi les « alternatives » possibles au stockage profond.

L'éventail des alternatives au stockage profond qui ont été proposées jusqu'ici est limité. Si on excepte [...] les différentes variantes de stockage, pour la plupart abandonnées pour des raisons de sûreté ou d'atteinte à l'environnement, seuls subsistent les différents concepts fondés sur la transmutation, avec leurs perspectives et leurs limites.

Seule la transmutation de l'américium, dont la thermicité est élevée, présenterait un réel intérêt. Elle permettrait de réduire l'emprise du stockage géologique. En revanche, il est vain d'espérer que la transmutation permette de s'affranchir d'une installation de stockage profond qui restera nécessaire pour gérer les déchets de haute activité à vie longue déjà vitrifiés, les déchets de moyenne activité à vie longue dont la transmutation n'est pas réaliste, et enfin les déchets ultimes issus de la séparation et de la transmutation [...]. Même si elles requièrent des avancées très significatives, les technologies envisagées aujourd'hui pour la transmutation pourraient déboucher sur des installations industrielles avant la fin du siècle à condition que des moyens très conséquents leur soient consacrés. *Par comparaison, le calendrier actuel prévoit un décret d'autorisation de construction d'un stockage géologique en France avant la fin de la décennie.*

### Les recommandations de la Commission

Dans tous les cas, les solutions de transmutation sont incompatibles avec un arrêt de la politique de retraitement des combustibles *car il faut extraire les éléments à transmuter des combustibles usés*. De même, compte tenu des efforts scientifiques et industriels qu'elles supposent, elles ne peuvent s'inscrire dans un scénario d'arrêt du recours à l'énergie nucléaire en France.

La Commission examinera avec le plus grand intérêt tous les concepts nouveaux « d'alternative » au stockage géologique profond, scientifiquement documentés qui pourraient émerger. A cet effet, elle auditionnera les scientifiques concernés, sans se limiter aux acteurs de la loi, afin d'être en capacité d'évaluer leurs travaux pour le Parlement.

---

<sup>10</sup> Ce texte est directement extrait des rapports publiés par la CNE au cours des 5 dernières années ; les parties en italique sont des commentaires contextuels ajoutés pour faciliter la compréhension du sujet. La liste des acronymes est présentée au verso de cette fiche.

## LISTE DES ACRONYMES :

EURATOM : communauté européenne de l'énergie atomique qui a été instituée par le traité de Rome en 1957 pour une durée illimitée ;

HAVL-MAVL : déchets de haute et moyenne activité à vie longue ;

PPE : programmation pluriannuelle de l'énergie.

## FICHE 4 : OPTIMISATION DU CYCLE DU COMBUSTIBLE<sup>11</sup>

### Les enjeux

*La fermeture du cycle a pour objectif d'assurer l'indépendance énergétique de la France en utilisant le stock de matières fissiles disponibles dans le pays, tout en évitant l'importation de matières premières. Plus précisément, elle vise à une valorisation plus complète du contenu énergétique des matières en utilisant l'uranium 238 et le recyclage du plutonium. Cette démarche s'appuie nécessairement sur l'utilisation de réacteurs à neutrons rapides (RNR).*

### Le panorama international

*Le concept de réacteur rapide refroidi par le sodium (RNR-Na) est le seul modèle de réacteur qui bénéficie d'un retour d'expérience important, en France comme à l'étranger. La Russie exploite deux RNR-Na électrogènes, la Chine et l'Inde sont en train de construire un RNR. Les USA envisagent de construire leur prototype. L'Europe maintient une veille scientifique sur les RNR.*

Le CEA poursuivra ses collaborations [...] avec les pays qui étudient les RNR de génération IV [...] de façon plus ou moins active. Ces collaborations portent surtout sur l'échange de connaissances au niveau de la modélisation-simulation (sur des expériences déjà réalisées si possible) [...].

La Commission ne peut que regretter l'abandon du projet ASTRID qui fera perdre à la France son leadership alors que ses concurrents comme la Russie et la Chine continuent à miser sur les RNR.

### L'état des recherches en France

Certaines des orientations nouvelles de la PPE 2020 ont un impact significatif sur la gestion des matières et des déchets radioactifs. En particulier, le report vers la fin du siècle du déploiement de réacteurs à neutrons rapides repousse d'autant l'horizon de la fermeture du cycle du combustible. [...] L'objectif majeur aujourd'hui est de préserver la capacité nationale à redémarrer un projet de [RNR] de quatrième génération à l'horizon de la deuxième moitié de ce siècle.

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

[..] Une étape intermédiaire est introduite par la PPE 2020 : le multi-recyclage du plutonium en REP. Les très nombreux projets envisagés tels que le moxage des 1300 MWe, le multi-recyclage en EPR2 [...], la fabrication des combustibles URT, MOX, ou encore le traitement des combustibles usés, présentent une grande interdépendance. La Commission note l'absence d'un calendrier stabilisé organisant ces actions.

### Les recommandations de la Commission

La définition d'un programme ambitieux à l'échelle nationale est indispensable pour relever les défis scientifiques et technologiques en cohérence avec la fermeture du cycle. La Commission considère que le programme proposé par le CEA est trop modeste pour répondre à ces objectifs. Elle estime qu'un programme de R&D [...] exigerait un projet consolidé de réacteur RNR expérimental [..].

---

<sup>11</sup> Ce texte est directement extrait des rapports publiés par la CNE au cours des 5 dernières années ; les parties en italique sont des commentaires contextuels ajoutés pour faciliter la compréhension du sujet. La liste des acronymes est présentée au verso de cette fiche.

## LISTE DES ACRONYMES :

ASTRID :	Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration, projet français de prototype industriel de réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium lancé en 2010 et arrêté en 2019 ;
CEA :	commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives ;
EPR2 :	version optimisée (de deuxième génération) de l'EPR (European Pressurized Reactor), réacteur à eau pressurisée ;
MOX :	combustible constitué d'un mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium (Mixed OXides en anglais) ;
MWe :	méga ( $10^6$ ) watt électrique (unité de puissance électrique) ;
74 PPE 2020 :	programmation pluriannuelle de l'énergie datant de 2020 ;
R&D :	recherche et développement ;
REP :	réacteur à eau pressurisée ;
RNR :	réacteur à neutrons rapides ;
URT :	uranium issu du retraitement de combustibles usés (pouvant être recyclé après ré-enrichissement) ;
USA :	United States of America (États-Unis d'Amérique).

## FICHE 5 : FUTURS ATELIERS DU CYCLE DU COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE<sup>12</sup>

### Les enjeux

*Les ateliers actuels du cycle (La Hague et Melox) permettront le mono-recyclage de l'uranium et du plutonium des combustibles usés UOx jusqu'en 2040. Au-delà de cette date, les installations du cycle devront impérativement être rénovées.*

*Le « Nouveau Nucléaire Français » prévoit le multi-recyclage de l'uranium et du plutonium, dans de nouveaux réacteurs à eau pressurisée (EPR2) avec de nouveaux procédés. Le programme de rénovation des usines actuelles devra donc s'adapter à ces nouvelles exigences ainsi qu'aux enjeux généraux de réduction de l'empreinte environnementale du cycle.*

### Le panorama international

*Seule la France pratique le mono-recyclage au niveau industriel atteint par EDF et Orano.*

### L'état des recherches en France

La Commission constate que les nouvelles orientations de la PPE (moxage des 1300 MWe, multi-recyclage du Pu dans les EPR, ...) entraînent des besoins de recherche très significatifs [...]. La Commission souligne que les programmes qui lui ont été présentés en sont au stade d'ébauches. Cela est particulièrement vrai pour ce qui concerne les calendriers, interdépendants, des différentes actions prévues par les acteurs de la Loi.

En raison des modifications significatives de l'isotopie du Plutonium, [le multi-recyclage en REP] impliquera une adaptation des installations de fabrication et de retraitement du combustible.

Le multi-recyclage en REP nécessitera la construction de nouvelles usines de traitement, approximativement à l'échéance prévue de renouvellement des usines actuelles (pour La Hague, au plus tard en 2050), avec une radioprotection adaptée et permettant la mise en œuvre de matières induisant des effets radiolytiques importants.

75

### Les recommandations de la Commission

La Commission attire l'attention sur la nécessité d'une vision à long terme de l'évolution du parc nucléaire afin que l'ensemble des acteurs mettent en place une R&D adéquate et optimisée. En effet, la mise au point et la qualification du cycle du combustible RNR entreprises par le CEA, EDF et [Orano] demanderont plusieurs décennies. De plus, une robotisation très importante de nouveaux ateliers de fabrication et de retraitement du combustible sera nécessaire pour la radioprotection des travailleurs.

Dans la perspective d'une mise en œuvre du multi-recyclage en REP à partir de 2040, et en tenant compte de la nécessaire rénovation des installations de La Hague prévue à cette date, la faisabilité industrielle des nouveaux procédés de séparation devra impérativement être établie avant 2030 pour que les calendriers soient plausibles.

---

<sup>12</sup> Ce texte est directement extrait des rapports publiés par la CNE au cours des 5 dernières années ; les parties en italique sont des commentaires contextuels ajoutés pour faciliter la compréhension du sujet. La liste des acronymes est présentée au verso de cette fiche.

## LISTE DES ACRONYMES :

- CEA : commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives ;
- EDF : électricité de France ;
- EPR2 : version optimisée (de deuxième génération) de l'EPR (European Pressurized Reactor, réacteur à eau pressurisée en français) ;
- La Hague : usine de traitement-recyclage des combustibles usés située à La Hague (Normandie) et opérée par le groupe Orano;
- Melox : usine du groupe Orano située dans le Gard (site nucléaire de Marcoule) et spécialisée dans la fabrication de combustible MOX ;
- MOX : combustible constitué d'un mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium (Mixed OXides en anglais) ;
- MWe : méga ( $10^6$ ) watt électrique (unité de puissance électrique) ;
- Orano : groupe industriel français spécialisé dans les services associés au cycle du combustible nucléaire (anciennement appelé COGEMA puis AREVA NC);
- PPE : programmation pluriannuelle de l'énergie ;
- R&D : recherche et développement ;
- REP : réacteur à eau pressurisée ;
- UOx : combustible nucléaire constitué d'oxyde d'uranium.

## FICHE 6 : ENTREPOSAGE DES MATIÈRES ET DÉCHETS<sup>13</sup>

### Les enjeux

*Les colis de déchets qui ne peuvent rejoindre les sites de stockage de déchets FMAVC et TFA vont en entreposage, en attente de décroissance de leur activité (déchets tritiés), de leur puissance thermique (déchets HAVL), ou encore de la mise en service d'un stockage géologique (FAVL, MAVL et HAVL).*

Le report des projets de RNR [et la] stratégie de multi-recyclage du plutonium en REP vont conduire à une détérioration de la gestion des matières : stock d'uranium appauvri en croissance, [..], entreposage d'une plus grande quantité de combustible usé avant éventuel retraitement et recyclage, dégradation de la qualité isotopique du plutonium limitant l'intérêt de son recyclage [..].

*Les capacités actuelles d'entreposage des combustibles usés devraient être saturées d'ici à 2030, ce qui nécessitera de nouvelles installations dans un avenir proche.*

### Le panorama international

Dans la plupart des pays, l'allongement des délais pour mettre en place le stockage du combustible usé et des déchets de haute et moyenne activité à vie longue entraîne l'allongement des durées d'entreposage au-delà des quelques dizaines d'années initialement prévues, parfois bien au-delà du siècle. L'allongement [des durées] d'entreposage est parfois vu comme une opportunité de donner du temps pour le dialogue. Encore faut-il que ce dialogue soit effectivement engagé et constructif, sinon l'entreposage de longue durée s'apparente à une simple politique d'attentisme.

### L'état des recherches en France

L'entreposage de longue durée soulève la question [..] du vieillissement des installations et des colis entreposés. Les données disponibles à l'heure actuelle sont rares et spécifiques des combustibles étudiés. [..] Le retour d'expérience opérationnelle et la maturité technologique manquent pour véritablement maîtriser ces enjeux. L'intégrité des assemblages, en particulier leur résistance mécanique, est [..] nécessaire pour leur manipulation et leur transport après entreposage. En cas d'entreposage sous eau, le combustible reste intègre et sa manipulation accessible pour inspection et traitement ultérieur. Ceci n'est pas démontré à ce jour dans le cas d'un entreposage à sec. Le niveau [..] des connaissances concernant le comportement des entreposages séculaires et des matières et déchets qu'ils contiennent reste faible, peu consolidé.

### Les recommandations de la Commission

La Commission rappelle que l'entreposage de longue durée tient de l'attentisme et qu'une politique volontariste de développement d'une solution pérenne de stockage doit être menée en parallèle.

La commission recommande que les exploitants et les acteurs institutionnels [..] consolident les connaissances existantes pour les différents types d'entreposages et identifient les domaines où la connaissance est lacunaire, voire inexistante. De nouveaux programmes de recherche permettraient d'acquérir le niveau de connaissance nécessaire à des prises de décisions mieux éclairées.

---

<sup>13</sup> Ce texte est directement extrait des rapports publiés par la CNE au cours des 5 dernières années ; les parties en italique sont des commentaires contextuels ajoutés pour faciliter la compréhension du sujet. La liste des acronymes est présentée au verso de cette fiche.

## LISTE DES ACRONYMES :

FAVL : déchets de faible activité à vie longue ;

FMAVC : déchets de faible et moyenne activité à vie courte ;

HAVL : déchets de haute activité à vie longue ;

MAVL : déchets de moyenne activité à vie longue ;

REP : réacteur à eau pressurisée ;

RNR : réacteur à neutrons rapides ;

TFA : déchets de très faible activité.

## FICHE 7 : LA GESTION DES DÉCHETS DE FAIBLE ACTIVITÉ A VIE LONGUE (FAVL)<sup>14</sup>

### Les enjeux

Les déchets FAVL<sup>15</sup> sont des déchets à vie longue qui ne peuvent être stockés en surface, mais qui ne sont pas destinés au stockage Cigéo dans une approche [de gestion] proportionnée à leur radiotoxicité. Les déchets FAVL français sont très variés. Ils ne dégagent pas de chaleur. Leur volume est important. Ce sont à la fois leur faible degré de dangerosité et leur grand volume qui justifie l'existence de cette catégorie de déchets. Les avancées sur ce dossier sont maigres et pour l'instant le dossier est remis à plat.

*L'absence de filières de traitement et d'exutoires pour ces déchets reste un problème majeur.*

### Le panorama international

Les programmes de gestion des FAVL dans le monde sont encore embryonnaires. Le stockage géologique est privilégié car il procure un plus haut degré de confinement et d'isolement que les stockages en surface. *Cependant, la quantité de déchets FAVL à gérer par ces pays est relativement faible par rapport à la quantité totale de déchets destinés au stockage géologique.*

### L'état des recherches en France

La majeure partie des déchets FAVL est déjà produite. Un inventaire complet et leur caractérisation fine sont des préalables incontournables à la définition d'une politique de gestion. La diversité de ces déchets [...a...] conduit les producteurs à les classer en familles susceptibles de bénéficier de stockages adaptés à leurs caractéristiques. La protection fournie par ces stockages doit être garantie pour des durées en relation avec celle des déchets à vie longue qui y sont déposés.

79

### Les recommandations de la Commission

La commission souligne l'urgence de l'identification d'un ou plusieurs sites dédiés [...] pouvant servir d'exutoire pour certains FAVL.

Compte tenu du faible niveau d'activité des déchets FAVL [...], la démonstration de sûreté attachée à un stockage de tels déchets s'enrichirait à s'appuyer sur une analyse des risques encourus. [...] Les stockages [...étant...] des ressources rares, il serait également judicieux d'optimiser l'utilisation de la capacité des stockages en activité et en volume.

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

---

<sup>14</sup> Ce texte est directement extrait des rapports publiés par la CNE au cours des 5 dernières années ; les parties en italique sont des commentaires contextuels ajoutés pour faciliter la compréhension du sujet.

<sup>15</sup> Déchets de faible activité à vie longue.



## FICHE 8 : FORMATION, EXPERTISE ET COMPÉTENCES<sup>16</sup>

### Les enjeux

La stratégie [électronucléaire] française appelle des décisions à prendre d'ici 5 ans s'agissant des capacités de stockage, du cycle des matières ou de la gestion des déchets. Ces décisions orienteront la R&D<sup>17</sup> pour les cinquante à quatre-vingts prochaines années.

*Sans un engagement à développer une industrie nucléaire sûre et performante s'intégrant dans un mix énergétique décarboné, il sera difficile d'attirer de nouveaux talents vers la R&D.*

### Le panorama international

*Il existe de nombreux centres de recherche et laboratoires qui permettent à des chercheurs de se former. Les pays structurent leurs formations en fonction de leurs organisations propres et de leurs visions stratégiques qui sont très diverses (cycle ouvert, cycle fermé,...). Les études et recherches sur le cycle du combustible motivent la poursuite des programmes de recherche européens.*

*Les installations permettant de manipuler des quantités pondérales de matières radioactives (actinides, produits de fission) deviennent rares. Il n'existe plus actuellement [en Europe] de capacité d'irradiation en spectre rapide sur des cibles de dimension préindustrielle. De ce fait, la recherche fondamentale est assujettie aux conditions d'accès à des installations dans des pays tiers, au risque de perdre la maîtrise de ses programmes et la propriété intellectuelle.*

### Les recommandations de la Commission

*La Commission observe que l'ouverture vers la filière nucléaire des formations offertes par les établissements d'enseignement supérieur est en net recul. Elle considère que les programmes de formation par la recherche sont trop modestes. Cette situation conduira inéluctablement à une perte des compétences.*

La Commission propose que soit bâti un nouveau programme de R&D, incluant une recherche fondamentale forte, pour relever les nombreux défis liés à l'évolution de la politique électronucléaire qui se dessine. Ce programme devrait regrouper toute la communauté scientifique et technologique dans une action d'envergure et attirer une nouvelle génération de talents.

Quels que soient les évolutions de l'industrie électronucléaire, le maintien de filières de formation adaptées reste indispensable pour assurer la transmission d'une connaissance approfondie des sciences et technologies nucléaires. Seul ce maintien des compétences permettra de garantir une gestion sûre du parc, de ses installations, de leur démantèlement et des déchets produits.

---

<sup>16</sup> Ce texte est directement extrait des rapports publiés par la CNE au cours des 5 dernières années ; les parties en italique sont des commentaires contextuels ajoutés pour faciliter la compréhension du sujet.

<sup>17</sup> Recherche et développement.



# COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION

---

Membres de la Commission Nationale d'Évaluation :

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

Secrétaire général & Conseiller scientifique :

**François STORRER**

Président honoraire :

**Bernard TISSOT**

Secrétariat administratif :

**Florence LEDOUX**

# COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION

---

Président : **Gilles PIJAUDIER-CABOT**

Vice-Présidents : **Christophe FOURNIER & Maurice LEROY**

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

Secrétariat administratif : **Florence LEDOUX**

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

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

ISSN : 2257-5758