

# 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° 13

**Juin 2019**



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° 13

JUIN 2019



## TABLE DES MATIERES

<b>RESUME – CONCLUSION .....</b>	<b>5</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>9</b>
<b>CHAPITRE I : CIGEO .....</b>	<b>11</b>
1.1    DU CONCEPT DE CIGEO A LA REALISATION.....	11
1.1.1 <i>Des jalons importants, la Déclaration d’Utilité Publique (DUP) et la Demande d’Autorisation de Création (DAC)</i> .....	11
1.1.2 <i>Les avancées en vue du dépôt de la DAC</i> .....	13
1.2    LA MAITRISE DE L’HYDROGENE.....	14
1.3    LE CAS DES BITUMES.....	16
1.4    LE STOCKAGE DES COMBUSTIBLES USES .....	16
1.5    LA BASE DE DONNEES DOCUMENTAIRE .....	17
1.6    L’ORGANISATION AUTOUR DE CIGEO ET LES RETOMBES REGIONALES.....	18
1.6.1 <i>La Gouvernance</i> .....	18
1.6.2 <i>Les retombées régionales</i> .....	19
1.6.3 <i>Le retour d’expérience de grands travaux</i> .....	20
1.7    LE POINT SUR LES COUTS DE CIGEO.....	22
<b>CHAPITRE II : SEPARATION &amp; TRANSMUTATION .....</b>	<b>25</b>
2.1    VERS UNE NOUVELLE CONFIGURATION DU PARC ELECTRONUCLEAIRE .....	25
2.2    MODIFICATIONS PROPOSEES DU CYCLE DU COMBUSTIBLE.....	25
2.3    LES CONSEQUENCES SUR LE CYCLE .....	26
2.3.1 <i>Sur l’uranium de retraitement (URT)</i> .....	26
2.3.2 <i>Sur le plutonium</i> .....	26
2.4    FERMETURE DU CYCLE .....	27
2.5    LA TRANSMUTATION DES ACTINIDES MINEURS .....	28
<b>CHAPITRE III : GESTION DES DECHETS .....</b>	<b>31</b>
3.1    PANORAMA GENERAL .....	31
3.2    TFA .....	31
3.3    FAVL.....	33
3.4    CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS .....	34
<b>CHAPITRE IV : RECHERCHE FONDAMENTALE EN SOUTIEN A LA RECHERCHE APPLIQUEE.....</b>	<b>35</b>
4.1    R&D EN SOUTIEN AU PARC ACTUEL .....	35
4.1.1 <i>Les SMR</i> .....	35
4.1.2 <i>Les procédés de retraitement</i> .....	35
4.1.3 <i>Les verres nucléaires</i> .....	35
4.2    ASTRID ET RNR DE GEN IV.....	36
4.3    RECHERCHE FONDAMENTALE .....	36
4.3.1 <i>CEA-DEN</i> .....	36
4.3.2 <i>CNRS et Universités</i> .....	37
4.3.3 <i>Soleil</i> .....	37
4.4    CONCLUSION .....	38
<b>CHAPITRE V : PANORAMA INTERNATIONAL.....</b>	<b>39</b>
5.1    INTRODUCTION .....	39
5.2    ÉTAPES DE LA PRISE DE DECISION.....	39
5.3    BELGIQUE .....	40
5.3.1 <i>Le cas du stockage en surface pour les déchets de faible ou moyenne activité à vie courte</i> .	40
5.3.2 <i>Le cas du stockage géologique pour les déchets de moyenne ou haute activité</i> .....	41

5.3.3	<i>Autorisation dite « de création et d'exploitation » d'une installation de stockage de déchets nucléaires – procédures</i> .....	41
5.4	CANADA .....	42
5.4.1	<i>Stockage en profondeur pour déchets de faible et moyenne activité à vie longue – OPG</i> .....	42
5.4.2	<i>Stockage pour combustible nucléaire usé – SGDN</i> .....	43
5.4.3	<i>Stockage près de la surface des déchets de faible activité - LNC</i> .....	43
5.5	ESPAGNE.....	44
5.6	FINLANDE.....	44
5.7	ROYAUME-UNI.....	45
5.7.1	<i>Inventaire de déchets</i> .....	45
5.7.2	<i>Tentatives antérieures d'implantation d'installations de stockage</i> .....	46
5.8	SUEDE .....	47
5.8.1	<i>Stockage du combustible irradié</i> .....	47
5.8.2	<i>Extension du stockage souterrain « SFR » pour les déchets de faible activité</i> .....	48
5.8.3	<i>Stockage pour les déchets de faible activité à vie longue, « SFL »</i> .....	49
5.9	CONCLUSION .....	49
<b>ANNEXE I : COMPOSITION DE LA COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION</b> .....		<b>51</b>
<b>ANNEXE II : ACTIVITE DE LA COMMISSION</b> .....		<b>53</b>
<b>ANNEXE III : PRESENTATIONS ET VISITES DE LA COMMISSION</b> .....		<b>55</b>
<b>ANNEXE IV : AUDITIONS REALISEES PAR LA COMMISSION</b> .....		<b>57</b>
<b>ANNEXE V : LISTE DES PERSONNES AUDITIONNEES PAR LA COMMISSION</b> .....		<b>59</b>
<b>ANNEXE VI : LISTE DES DOCUMENTS TRANSMIS A LA COMMISSION EN 2018-2019</b> .....		<b>61</b>
<b>ANNEXE VII : POINTS SPECIFIQUES RELATIFS AU PROJET CIGEO</b> .....		<b>63</b>
<b>ANNEXE VIII : ETUDES ET R&amp;D DANS LE CONTEXTE DE LA STRATEGIE ELECTRONUCLEAIRE ACTUELLE</b> ....		<b>69</b>
<b>ANNEXE IX : PRINCIPALES TENDANCES CONCERNANT LE DEVELOPPEMENT DE PROGRAMMES ELECTRONUCLEAIRES DANS LE MONDE</b> .....		<b>75</b>
<b>ANNEXE X : PANORAMA INTERNATIONAL DES PROGRAMMES ELECTRONUCLEAIRES</b> .....		<b>77</b>
<b>ANNEXE XI : PROCEDURES EN VIGUEUR EN BELGIQUE CONCERNANT L'AUTORISATION D'UN STOCKAGE DE DECHETS</b> .....		<b>83</b>





## RÉSUMÉ – CONCLUSION

La Loi de 2006 dispose que la gestion des déchets radioactifs fait intervenir l'entreposage industriel, le stockage géologique et la séparation-transmutation des éléments radioactifs à vie longue. Ce rapport évalue l'état d'avancement des études et recherches sur ces thèmes et fait le point sur l'approche de ces questions dans différents pays possédant une industrie électronucléaire.

### STOCKAGE GÉOLOGIQUE CIGÉO

Le projet Cigéo a pour finalité la conception, la construction et l'exploitation d'un stockage géologique réversible des déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue (HAVL et MAVL). Il est prévu que ce stockage soit réalisé à 500 m de profondeur dans la couche d'argilite du Callovo-oxfordien (COx), épaisse d'environ 130 m, en Meuse-Haute Marne. Par opposition à un entreposage, intrinsèquement provisoire, un stockage réalisé sur des bases scientifiques et techniques solides représente une solution pérenne car il s'appuie sur des propriétés stables de la nature.

La Commission considère comme robuste le socle des connaissances acquises par l'Andra et ses partenaires et apprécie favorablement l'effort de synthèse et l'analyse critique entrepris. Le dossier de demande d'autorisation de construction (DAC) de Cigéo pourrait ainsi être déposé en 2020. La Commission attire l'attention sur l'extrême complexité des procédures administratives préalables à la construction et à la mise en exploitation de Cigéo. Elle recommande que soient explorées des voies permettant de regrouper leur instruction.

La Commission constate que les principes de la gouvernance de Cigéo se mettent en place progressivement grâce à l'outil que constitue le plan directeur d'exploitation (PDE), élaboré en application de la loi sur la réversibilité. Elle rappelle que la responsabilité du projet Cigéo incombe à l'Andra. En conséquence, l'Andra propose le PDE au Gouvernement, en tenant compte des avis reçus. Aussi devient-il urgent de préciser comment et par qui ces avis seront remis à l'Andra pour la préparation, l'exécution et l'actualisation du PDE. La Commission avait suggéré en 2017 la création d'un organe spécifique à cet effet. La Commission organisera chaque année une audition consacrée au PDE.

La construction et l'exploitation de Cigéo s'accompagneront de profondes évolutions au sein de l'Andra comme au sein du tissu industriel local. La Commission recommande que ces évolutions intègrent au mieux l'ensemble des acteurs. Les nouvelles compétences de l'Andra, en tant que maître d'ouvrage, devront être déployées au plus près du chantier. L'Andra devra assumer pleinement ses prérogatives et responsabilités, notamment vis-à-vis de ses maîtres-d'œuvre et de l'ensemble des sous-traitants, et veiller à la traçabilité et à la conservation pérenne de ses décisions et réalisations.

### SÉPARATION ET TRANSMUTATION

La Loi de 2006 dispose que les recherches sur la transmutation doivent être menées dans le cadre de celles sur les réacteurs de Génération IV. Les orientations stratégiques préconisées par la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE) repoussent à un horizon lointain le déploiement des RNR et ont pour objectif la décroissance du pourcentage d'électricité d'origine nucléaire dans le mix énergétique pour atteindre 50 % en 2035. Ceci entraînera la fermeture de plusieurs réacteurs de 900 MWe avant leur 5<sup>ème</sup> visite décennale et aura des conséquences sur la politique de recyclage de l'uranium de retraitement (URT) et du plutonium (Pu).

La PPE prévoyant le maintien du retraitement du combustible usé UOx, de nouvelles installations d'entreposage deviendront très vite nécessaires si le recyclage de l'URT n'est pas mis en œuvre rapidement. Par ailleurs, vingt-quatre réacteurs de 900 MWe sont aujourd'hui susceptibles de mono-recycler le plutonium sous forme de combustible MOx. La fermeture de plusieurs d'entre eux remettrait en cause cette pratique. EDF prépare des demandes d'autorisation pour moxer ou alimenter en URT quelques réacteurs de 1300 MWe afin de poursuivre le mono-recyclage de l'uranium et du plutonium issus du retraitement du combustible usé UOx.

L'absence de RNR pour consommer le plutonium conduit à augmenter la quantité de MOx usés et, pour éviter la construction de nouveaux entreposages, la PPE prévoit le multi-recyclage de l'uranium et du plutonium en REP. Ceci nécessiterait de déployer une flotte d'EPR de deuxième génération et de créer des installations de fabrication et de retraitement d'un nouveau combustible MOx. En outre, l'inventaire en déchets de haute activité augmenterait plus rapidement. La Commission s'interroge sur le fondement d'une telle stratégie au regard de la gestion des matières et déchets radioactifs. Présentée comme une première étape pour la maîtrise d'un cycle du combustible RNR, cette stratégie exigerait des investissements spécifiques lourds tout en reportant à très long terme les perspectives de transmutation dans des réacteurs de 4<sup>ème</sup> génération. L'analyse des conséquences sur la gestion des matières et déchets radioactifs montre que la PPE s'écarte significativement des objectifs de la Loi de 2006.

Considérant l'intérêt qu'aurait la transmutation de l'américium pour la gestion des déchets dans le futur, la Commission recommande que les études soient poursuivies dans le cadre de collaborations internationales pour pallier l'absence d'outils d'irradiation en France et satisfaire les exigences de la Loi de 2006.

## RECHERCHE FONDAMENTALE EN SOUTIEN A LA RECHERCHE APPLIQUEE

6

Le programme Astrid a permis des avancées considérables dans tous les domaines scientifiques et technologiques dédiés à la quatrième génération, avec des retombées sur les filières des générations précédentes. La Commission note que l'arrêt du projet Astrid fera perdre à la France son leadership alors que ses concurrents, comme la Russie et la Chine, continuent à miser sur les RNR.

Un nouveau type de réacteur est évoqué avec le développement d'un avant-projet de réacteur modulaire de faible puissance (SMR). Il posséderait une sûreté passive et pourrait être construit par l'assemblage de modules préfabriqués en usine. La Commission suivra le développement de cette option nouvellement apparue dans la PPE au regard de la gestion des matières et déchets radioactifs.

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.

## GESTION DES DECHETS

La Commission estime que la gestion des déchets de faible activité est bien encadrée par les études demandées par les plans nationaux successifs (PNGMDR). Leurs conclusions apportent les éléments nécessaires pour faire évoluer la gestion des déchets de très faible activité et préparer celle des déchets de faible activité à vie longue. Néanmoins, la Commission regrette qu'aucune solution effective ne soit identifiée et souligne qu'il est important de définir et sécuriser rapidement des filières en tenant compte d'une logique industrielle et réglementaire.

## PANORAMA INTERNATIONAL

Le stockage géologique des déchets de haute activité à vie longue est la solution de référence retenue par tous les pays possédant une industrie électronucléaire. L'état d'avancement des projets n'est pas au même niveau dans les différents pays. Seule la Finlande construit actuellement son centre de stockage des combustibles usés.

Dans tous les pays, la prise de décision comporte deux niveaux: tout d'abord la définition d'un processus, le choix d'un site, et la préparation d'une DAC; puis successivement, l'acceptation de la demande, l'autorisation de construire, d'exploiter, et de fermer le stockage.

La Commission observe que le franchissement de chaque étape requiert un processus transparent et participatif. Celui-ci associe les autorités locales et les citoyens concernés (localement et nationalement), les autorités de sûreté et environnementales, et les organismes scientifiques. Ce processus de dialogue permet une analyse critique des concepts et des technologies proposés ; il participe à l'évaluation. C'est sur cette base et sur l'évaluation des experts qu'une décision prise par les autorités est préparée.

La Commission souligne que les processus de décisions sont souvent très longs et qu'il convient d'être persévérant pour éviter un enlisement des dossiers qui aurait pour conséquence de reporter la charge des déchets sur les générations futures.







## INTRODUCTION

En 1991, dans une première loi en France sur la gestion des déchets radioactifs, le Parlement, conscient de la spécificité et de la nouveauté des problèmes qui se posaient, a confié pour 15 ans l'évaluation de l'état d'avancement des recherches dans ce domaine à une Commission Nationale d'Évaluation (CNE) composée de douze personnalités indépendantes et bénévoles. Selon cette loi, les évaluations de la CNE donnent lieu à un rapport annuel au Parlement qui en saisit l'Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques (OPECST). Cette première Commission (CNE 1) a rendu un ensemble de 13 rapports entre les années 1991 et 2006.

En juin 2006, une seconde loi sur la gestion des matières et déchets radioactifs a confirmé l'existence et le rôle de la Commission qui est donc devenue l'actuelle CNE 2, dont le présent document constitue le 13<sup>ème</sup> rapport transmis au Parlement.

La Commission évalue les recherches en cours et formule des recommandations afin d'éclairer les décisions de la puissance publique.

\*\*\*\*\*

Cette année, la Commission (Cf. Annexe I) a conduit 11 auditions d'une journée, rassemblant, en général, une soixantaine de personnes représentant l'ensemble des acteurs de la filière. Elle a aussi procédé à 7 auditions restreintes et à plusieurs déplacements (Cf. Annexes II à V). Pour ce 13<sup>ème</sup> rapport, elle a tenu compte des documents qui lui ont été transmis jusqu'à la date du 1<sup>er</sup> mai 2019 (Cf. Annexe VI).

Comme lors des années précédentes, la Commission a consacré une grande partie de ses travaux à l'analyse et à l'évaluation des recherches et des études sur le projet Cigéo de l'Andra. L'application des dispositions de la Loi de 2006 prévoit expressément que les déchets radioactifs de haute et de moyenne activité à vie longue soient stockés « en couche géologique profonde ». Ainsi l'Andra prépare-t-elle actuellement la demande d'autorisation de création (DAC) d'un stockage souterrain à 500 m de profondeur dans une formation argileuse épaisse de plus de 100 m et située à la limite de la Meuse et de la Haute Marne.

Les Lois de 1991 et de 2006 ont également préconisé que des recherches soient conduites sur la séparation puis la transmutation des éléments radioactifs à vie longue présents dans les déchets, afin d'en réduire la radiotoxicité à long terme. Le présent rapport tire un premier bilan des résultats innovants acquis dans le cadre du projet de réacteur à neutrons rapides (RNR) Astrid dont le CEA a été maître d'ouvrage. La Commission a pris note que le CEA ne peut poursuivre ce projet tel qu'il a été défini en 2010. Il envisage pour l'avenir un programme de veille technologique consacré à la quatrième génération et à la poursuite des recherches sur la séparation-transmutation dans le cadre de collaborations internationales.

La Commission évalue également la gestion des déchets radioactifs, quelle que soit leur activité. Le démantèlement de nombreuses installations nucléaires produirait en France de grandes quantités de déchets de faible et très faible radioactivité. Leur gestion doit être prévue sur le long terme.

Dans tous les pays confrontés à la gestion des déchets de l'aval du cycle électronucléaire, le stockage géologique profond est considéré comme la solution de référence pour les déchets de haute et moyenne activité à vie longue, ainsi que l'a rappelé un rapport de l'OPECST en 2014. La Commission, bénéficiant de l'apport de ses membres étrangers, fait le point sur l'état d'avancement des études et recherches menées dans les principaux pays dotés d'une industrie nucléaire pour stocker ces déchets.



## CHAPITRE I : CIGÉO

Le projet Cigéo, en application de la Loi de juin 2006, a pour objectif la conception et la construction d'un stockage géologique réversible des déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue (HAVL et MAVL) inscrits au Programme industriel de gestion des déchets (PIGD). Ce stockage doit être réalisé à 500 m de profondeur dans la couche d'argilite du Callovo-oxfordien (COx), épaisse d'environ 130 m, en Meuse-Haute Marne. Ce projet a vu le jour après des études et recherches développées durant plus d'une vingtaine d'années, notamment dans le laboratoire souterrain de Bure, et qui ont démontré l'excellente aptitude du COx à isoler les déchets, puis à confiner durablement les radionucléides qui y sont contenus.

*À ce jour, la Commission considère comme robuste le socle de connaissances acquises par l'Andra au prix d'un très important effort scientifique et technique qui a porté ses fruits. Elle apprécie particulièrement l'effort de synthèse et d'analyse critique en cours.*

*La démonstration de la qualité du site en tant que barrière géologique a été faite et les options de conception du stockage ont été établies. Les éléments nécessaires au déroulement de la procédure réglementaire de Cigéo seront rassemblés pour la DAC. Des progrès sont toujours possibles et l'approfondissement de certaines connaissances permettra des évolutions grâce au principe de réversibilité. La phase industrielle pilote (Phipil) fournira l'occasion d'avancer en ce sens.*

11

Assistée de son maître d'œuvre système, le groupement Gaiya (Technip-Ingérop), l'Andra, agissant comme maître d'ouvrage, a mené l'avant-projet sommaire (APS) de Cigéo jusqu'en juin 2015. Après une revue de projet commanditée par la Direction Générale de l'Énergie et du Climat (DGEC), le projet est entré dans la phase d'avant-projet détaillé (APD) qui doit se clôturer par le dépôt de la demande d'autorisation de création (DAC). En prélude au dépôt de la DAC, l'Andra a élaboré un dossier d'options de sûreté (DOS) qui a donné lieu à plusieurs analyses, notamment de la Commission et de l'ASN. L'Andra travaille actuellement à l'intégration des différents avis dans son APD en vue du dépôt de la DAC prévu en 2020.

Le présent chapitre rend compte des avancées scientifiques et techniques présentées cette année par l'Andra.

### 1.1 DU CONCEPT DE CIGÉO À LA RÉALISATION

#### 1.1.1 Des jalons importants, la Déclaration d'Utilité Publique (DUP) et la Demande d'Autorisation de Création (DAC)

Comme tout projet industriel, le projet Cigéo est soumis à une série de procédures réglementaires, le but étant de permettre aux autorités publiques d'encadrer la réalisation du projet et d'en maîtriser les impacts. Ces procédures débouchent sur la délivrance d'autorisations administratives de trois natures différentes :

- des déclarations d'intérêt général destinées à gérer les incidences sur les intérêts privés dont les expropriations ;
- des autorisations de construire qui réglementent les modifications apportées par les ouvrages à l'environnement urbain ou paysager du projet ;

- des autorisations d'exploiter qui réglementent les atteintes susceptibles d'être portées à l'environnement au cours de la vie de l'ouvrage.

Ces autorisations sont délivrées en respectant trois grands principes :

- la délivrance d'une autorisation ne préjuge pas de la délivrance des autres ;
- l'évaluation environnementale doit être globale pour tous les dossiers de demande d'autorisation ;
- l'évaluation environnementale, tout en restant globale, doit être actualisée au fur et à mesure du séquençage des demandes d'autorisation.

Dans le cas de Cigéo, la procédure réglementaire débutera par une enquête publique qui devrait aboutir à la Déclaration d'Utilité Publique (DUP). La DUP est un préalable pour faire reconnaître l'intérêt de Cigéo au niveau national et fournir le cadre réglementaire nécessaire pour l'avancement du projet. Elle permettra la maîtrise foncière en apportant la justification des expropriations nécessaires. Elle jouera un rôle initiateur pour obtenir les autorisations pour les opérations qui pourront être réalisées avant l'obtention du décret d'autorisation de construction. Ces opérations concernent en particulier les travaux préalables tels que de nouveaux forages, l'archéologie préventive et l'aménagement des réseaux (électricité, eau, voie ferrée).

La DUP de Cigéo s'appuiera sur une étude d'impact globale. Elle concernera les opérations liées à la construction du stockage sous maîtrise d'ouvrage de l'Andra, ainsi que celles liées aux infrastructures hors maîtrise d'ouvrage de l'Andra.

Une version préparatoire du dossier a été établie fin 2018 et fait actuellement l'objet d'expertises internes et externes avant sa finalisation au 2<sup>ème</sup> trimestre 2019. L'Andra envisage son dépôt après le débat public sur le Plan National de Gestion des Déchets et Matières Radioactives (PNGMDR) engagé en avril 2019 sous l'égide de la Commission Nationale du Débat Public (CNDP). Pendant l'instruction de la DUP, l'Andra déposera des demandes d'autorisation de travaux préalables dont l'engagement est prévu courant 2020 après obtention de la DUP.

12

Les demandes d'autorisation de construire (permis de construire, permis d'aménager) et la demande d'autorisation de création (DAC) de l'INB (Installation Nucléaire de Base) Cigéo feront suite à l'obtention de la DUP. La délivrance d'une autorisation ne préjugeant pas de la délivrance des suivantes, l'Andra prévoit de déposer tout d'abord la DAC, puis de procéder aux diverses demandes d'autorisation de construction pendant l'instruction de la DAC. Chacune de ces demandes fera également l'objet d'enquêtes publiques au cours de son instruction par les services de l'État.

La DAC constituera un élément essentiel de la procédure puisqu'elle doit déboucher sur le décret d'autorisation de création du projet. Les pièces à déposer pour la DAC sont régies par un cadre réglementaire (décret 2007-1557) actuellement en évolution et qui prendra en compte les spécificités de Cigéo. Le dossier comprendra ainsi les pièces relatives à toute future INB et sera augmenté de pièces additionnelles.

Les pièces demandées par le décret 2007-1557 sont pour une INB au nombre de treize. Les principales sont les suivantes :

- le rapport préliminaire de sûreté couvrant les phases d'exploitation et de post-fermeture ;
- l'étude de la maîtrise des risques en exploitation et post-exploitation ;
- le plan directeur pour l'exploitation de Cigéo ;
- le plan de démantèlement, de fermeture et de surveillance ;
- l'étude d'impact.

Selon les stipulations de l'article 13 du décret n° 2007-1557, ces pièces seront soumises à enquête publique à l'exception du rapport préliminaire de sûreté.

Cigéo présente des spécificités par rapport aux INB classiques. Une évolution importante du décret est dictée par la loi sur la réversibilité.

Le dossier de DAC devra donc traiter pour cela de :

- la progressivité de la construction de Cigéo impliquant le séquençage des tranches de construction ;
- l'adaptabilité de la conception permettant d'intégrer les éventuels progrès technologiques et les évolutions possibles de l'inventaire de référence ;
- la flexibilité de l'exploitation pour s'adapter à différents rythmes de mise en stockage et de fermeture des ouvrages ;
- la capacité de récupérer des colis déjà stockés.

Les pièces additionnelles comprendront des spécifications préliminaires d'acceptation des colis, le plan de développement de l'installation de stockage, et des documents indiquant les modifications apportées aux options ayant déjà fait l'objet d'un avis des autorités.

Ces différentes pièces à caractère réglementaire seront appuyées par des documents supports techniques utiles à l'instruction, entrant dans trois catégories :

- le programme scientifique et technologique du plan de développement de l'installation de stockage ;
- les dossiers de justification des options de conception étayant le rapport préliminaire de sûreté ;
- le socle des connaissances scientifiques et technologiques qui justifie de la connaissance du site et des colis en appui à la conception et à la démonstration de sûreté.

La Demande d'Autorisation de Création (DAC) devrait être consolidée pour fin 2019 et déposée en 2020. Une enquête publique de DAC est ensuite prévue vers 2022.

Il faut enfin noter que chaque construction comme chaque aménagement sur site (bâtiments de surface, ...), ou hors site (le raccordement électrique, l'adduction d'eau, les déviations routières, le renforcement de ligne ferroviaire, ...), devra faire l'objet de demandes d'autorisation assorties selon les cas de déclarations d'utilité publique.

*La Commission attire l'attention sur l'extrême complexité de la procédure administrative préalable à la construction et à la mise en exploitation de Cigéo.*

*L'empilement des autorisations requises et des procédures associées est susceptible de conduire à des délais importants dans la réalisation du stockage. Un retard excessif serait une cause de perte de dynamisme pour les acteurs du projet pouvant aller jusqu'à une perte progressive des compétences.*

*La Commission recommande que soient explorées des voies permettant de regrouper l'instruction des diverses procédures.*

### 1.1.2 Les avancées en vue du dépôt de la DAC

Les récentes avancées dans la configuration de Cigéo ont été obtenues dans l'objectif de répondre aux avis exprimés lors de l'instruction du DOS.

L'instruction du DOS par l'ASN/IRSN et son analyse par la Commission ont amené à la production de demandes par les évaluateurs et d'engagements de l'Andra portant notamment sur les trois points suivants :

- la justification des propriétés favorables du COx du point de vue des caractéristiques géométriques des constituants du stockage et du comportement thermo-hydro-mécanique (THM) de la roche ;
- la justification des choix de conception portant sur les éléments d'architecture du stockage ;
- la justification de la faisabilité technologique des composants du stockage (alvéoles HA et MAVL).

La Commission a analysé les réponses et engagements de l'Andra. Les détails de cette analyse figurent dans le chapitre 1 de l'Annexe VII. Les recommandations qui s'en suivent sont rapportées ci-après.

L'Andra a démontré la faisabilité technique d'un alvéole HA de 112 m de long suivant un séquençement en trois temps : creusement du trou nu, mise en place d'un chemisage composé d'un assemblage d'éléments semi-rigides en acier puis comblement de l'espace annulaire par un matériau cimentaire.

*La Commission note que l'Andra dispose à présent d'un concept robuste pour la construction des alvéoles HA. L'Andra doit maintenant démontrer pour la DAC que la technique ainsi mise au point permet de réaliser des alvéoles de 150 m de longueur, prévus pour les quartiers HA1/2 dans la configuration de référence.*

14

*Concernant la réalisation des galeries et alvéoles MAVL, la Commission considère que l'Andra possède un corpus de connaissances scientifiques et techniques suffisamment important pour lui permettre de dimensionner les ouvrages selon les exigences de durée d'exploitation du stockage. Elle demande qu'il lui soit montré que les choix technologiques qui seront faits pour la DAC en s'appuyant sur les modèles, conduisent à des solutions enveloppes vis-à-vis du comportement thermo-hydro-mécanique des ouvrages et du massif rocheux.*

*Par ailleurs, elle recommande qu'un effort de caractérisation des propriétés hydro-mécaniques de la zone endommagée dans l'unité silto-carbonatée soit poursuivi, car c'est dans cette unité que seront réalisés les scellements des liaisons surface-fond.*

## 1.2 LA MAÎTRISE DE L'HYDROGÈNE

L'Andra et ses évaluateurs ont par le passé attiré l'attention sur le risque ATEX (atmosphère explosive), conséquence du dégagement d'hydrogène par certains composants présents dans Cigéo pendant son exploitation et après sa fermeture.

L'Andra a poursuivi la caractérisation des sources potentielles d'hydrogène et proposé des options de conception ou des spécifications visant à maîtriser le risque ATEX. S'agissant du risque en exploitation, les réflexions ont porté sur :

- les équipements tels que les batteries en cours de chargement dont le mode de gestion relève de dispositions classiques dans l'industrie ;

- la conception et les modalités d'exploitation des alvéoles MAVL ainsi que la définition des caractéristiques acceptables des colis émetteurs d'hydrogène par radiolyse qui y seront stockés ;
- la conception d'un dispositif de surveillance et d'inertage de l'atmosphère au sein des alvéoles HA après leur fermeture lorsque la génération d'hydrogène par corrosion anoxique de l'acier est susceptible de se produire.

La description des différents dispositifs conçus par l'Andra est donnée dans le chapitre 2 de l'Annexe VII.

*La Commission considère que l'Andra a réussi à démontrer sa maîtrise du risque ATEX pour les quartiers MAVL. Le mode de défense repose sur l'évacuation de l'hydrogène qui maintient les concentrations en dehors de la zone de risque, avec des dispositifs redondants et des marges de sécurité importantes. Par ailleurs, l'Andra a démontré que si la zone ATEX était atteinte, l'explosion n'aurait pas de conséquence sur la structure des conteneurs, permettant ainsi leur manutention. Elle rappelle que l'Andra avait démontré dans le dossier 2009 l'absence d'impact d'une explosion sur le génie civil des installations et sur la roche.*

*Concernant les alvéoles HA, la Commission suit avec attention les recherches en cours sur les évolutions de conception visant à maîtriser le risque hydrogène en phase d'exploitation. L'Andra a proposé un nouveau concept reposant sur une surveillance active et un renouvellement des atmosphères des alvéoles.*

*La Commission attire cependant l'attention sur la complexité du dispositif imaginé. Elle recommande de bien identifier si un gain éventuel de sûreté ATEX n'altère pas les autres fonctions demandées à l'alvéole.*

*Compte tenu du risque de défaillance de dispositifs actifs, particulièrement lorsqu'ils sont déployés à grande échelle, la Commission recommande de concentrer l'effort sur des dispositifs passifs et la démonstration de leur efficacité. Considérant que le risque ATEX est surtout présent lors de la réouverture éventuelle d'un alvéole, la Commission invite l'Andra à réfléchir sur les moyens et techniques à mettre en place au cas où cette opération serait nécessaire.*

L'estimation des termes sources après exploitation sur l'ensemble du stockage constitue la base de la maîtrise de l'hydrogène. Elle repose sur la comptabilité des termes sources (types de colis) et la connaissance de processus bien identifiés (corrosion anoxique et radiolyse). Les termes sources peuvent alors être transformés en chroniques de production d'hydrogène afin d'alimenter les simulations numériques de transfert de l'hydrogène.

Les calculs THM intègrent ainsi la production de l'hydrogène en fonction de l'âge des colis et de l'avancement des phases de resaturation. Les calculs peuvent quantifier les différents flux autour du stockage. Ils montrent que la diffusion vers le COx est le principal mode de migration de l'hydrogène. Par ailleurs, l'impact de la production d'hydrogène sur les pressions et les contraintes est quantifié. Il est pris en compte dans les calculs de dimensionnement de l'ouvrage.

Les calculs en cours visent à réduire les incertitudes. Elles proviennent d'une part de choix de conception à finaliser (notamment masse d'acier et surface développée), d'autre part de la quantification des processus chimiques : cinétiques de corrosion pour la production d'hydrogène, réactions chimiques avec le COx pour sa consommation.

*La Commission constate que l'Andra dispose d'un outil de modélisation performant permettant de prédire les conséquences du dégagement d'hydrogène sur la thermo-hydro-mécanique à l'échelle du stockage après sa fermeture. Elle recommande que l'Andra identifie bien les incertitudes associées à ces simulations et analyse le risque résiduel lié à ces incertitudes.*

### 1.3 LE CAS DES BITUMES

La Commission a alerté à plusieurs reprises sur les difficultés potentielles attendues pour le stockage géologique des colis d'enrobés de boues bitumées. Constatant dans son rapport n° 6 de novembre 2012 que les connaissances ne permettaient pas de se prononcer de manière définitive sur le comportement en cas d'incendie des colis bitumés en condition de stockage, elle recommandait de ne pas les prévoir pour la première phase d'exploitation du stockage. Elle exigeait de recevoir pour décembre 2014 une démonstration en vraie grandeur, assortie d'une analyse de sûreté du comportement en stockage du colis primaire et de son conteneur. Des éléments de réponse ont été progressivement apportés par les producteurs et l'Andra, notamment sur la résistance au feu externe des colis de stockage contenant des déchets bitumés. En 2018, des analyses de l'ASN/IRSN mettaient l'accent sur le risque incendie lié aux réactions exothermiques susceptibles d'apparaître lors d'une montée en température de certains colis bitumes, celles-ci pouvant en effet conduire à un emballement et donc à un incendie interne au colis de stockage. Il était donc recommandé d'étudier des solutions industrielles de neutralisation de la réactivité des enrobés bitumineux ou d'envisager des options de conception de leur stockage qui interdiraient tout risque de propagation d'un incendie. Le Groupe Permanent Déchets avait confirmé ces recommandations dans son avis de mai 2017.

16

La démarche suivie actuellement par l'Andra et les producteurs consiste à examiner les deux types de questionnement. Deux voies sont donc définies : une première concernant l'étude de la faisabilité de la neutralisation et une seconde portant sur l'évolution de la conception de Cigéo qui permettrait d'accueillir en l'état les colis de déchets bitumés dans les alvéoles MAVL. Un éventuel traitement des colis sera accompagné de rejets et de la production de nouveaux types de déchets radioactifs à conditionner et stocker.

*Dès 1997, la Commission avait soulevé la question des bitumes qu'elle a rappelée en 2012. Dans son rapport 2018, elle recommandait la création d'une commission internationale pour examiner plus précisément la problématique des bitumes. Cette recommandation a été suivie d'effet puisqu'un groupe de revue internationale a été mis en place dès l'été 2018 à la demande du gouvernement. Ses travaux se déroulent activement et les conclusions sont attendues à l'été 2019. À la demande de l'OPECST, la Commission sera appelée à donner un avis sur le rapport qui conclura la revue. À ce titre, elle assiste aux réunions du groupe comme observatrice.*

### 1.4 LE STOCKAGE DES COMBUSTIBLES USÉS

Les combustibles usés font partie de l'inventaire de réserve de Cigéo. Ils sont classés comme matière nucléaire et non comme déchets. Cette situation est susceptible d'être modifiée avec

l'évolution de la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE). La Commission avait recommandé de poursuivre les recherches sur le stockage des combustibles usés.

Les assemblages de combustibles usés qui ont quitté les piscines attenantes aux réacteurs français sont entreposés durant au moins 5 ans dans des grandes piscines sur le site de la Hague, en attendant d'être retraités. Actuellement sont entreposées 7 500 tonnes de combustibles usés (UOx et MOx) dont 7 000 appartiennent à EDF. Les efforts de recherche, de dimensionnement et de préparation des dossiers de Cigéo, notamment en vue de la DAC, portent en priorité sur l'inventaire de référence. Néanmoins, EDF a déjà engagé des travaux sur l'évolution des combustibles usés en stockage, en partenariat avec le CEA et l'Andra. Les travaux réalisés portent sur plusieurs points :

- le comportement des combustibles usés (UOx et MOx) en conditions de stockage : il s'agit ici de déterminer au mieux le terme source, à savoir la nature et la quantité de radionucléides relâchés par les assemblages de combustible en fonction du temps et des conditions de stockage. Deux mécanismes sont étudiés : le relâchement de la fraction labile (l'Instantaneous Release Fraction, IRF) puis le relâchement par lixiviation de la matrice d'oxyde irradiée. Des expériences et des simulations restent à faire pour mieux quantifier ces mécanismes dans le contexte du stockage Cigéo.
- le dimensionnement thermo-hydro-mécanique (THM) de Cigéo : les calculs réalisés montrent qu'on peut trouver une configuration de stockage pour laquelle la température maximale dans le COx reste inférieure au critère de 90°C et aussi pour que le critère mécanique garantissant l'absence de fracturation hydraulique de la roche soit respecté. Le critère THM serait donc vérifié.
- l'impact sur la sûreté à long terme de Cigéo : un modèle est en cours de construction pour simuler le relâchement et le transport des radionucléides issus des combustibles usés au sein de l'ouvrage de stockage et dans le COx.

Les conclusions de ces études et recherches ne sont pas indispensables pour la DAC puisque les combustibles usés figurent dans l'inventaire de réserve. L'Andra s'est par contre assurée que la conception de Cigéo n'est pas incompatible avec la manipulation de conteneurs de combustibles usés dans ses infrastructures, conformément à la notion d'adaptabilité qui caractérise la conception de l'ouvrage.

*La Commission recommande que les études sur la possibilité de stocker les combustibles usés UOx et MOx dans Cigéo soient poursuivies.*

## 1.5 LA BASE DE DONNÉES DOCUMENTAIRE

L'Andra a intégré sa gestion de l'information dans une démarche centralisée intégrant une maquette numérique et un gestionnaire de données : le BIM ou Building Information Model.

La base de données a vocation à rassembler toutes les informations pertinentes du projet. Ces données, hétérogènes par nature, concernent les données de reconnaissance du milieu, le suivi de tous les capteurs qui y sont implantés, les calculs de dimensionnement, la traçabilité des critères de sûreté identifiés, mais aussi les plans de conception et l'avancement de la réalisation. Elle repose donc sur une structuration de formats et sur des logiciels interopérables. Ce caractère interopérable est essentiel pour permettre la mise à jour automatique de toute la chaîne lorsqu'une donnée est modifiée ou nouvellement introduite.

Cette base de données repose sur un principe de travail collaboratif : tous les acteurs du projet doivent pouvoir interroger les parties les concernant, et alimenter la base avec leurs contributions (production de données ou avancement de la réalisation). Ce travail collaboratif doit être contrôlé et placé sous la responsabilité de l'Andra.

L'Andra avait montré en 2018 l'avancement de son projet de maquette numérique avec un prototype opérationnel de la zone de manutention des colis MAVL entre les galeries et la zone de stockage. A terme, la totalité des éléments de Cigéo doivent être intégrés à cette maquette numérique. Cette maquette est un support de visualisation, à la fois pour suivre l'avancement du projet, tester la compatibilité de tous les composants et objets de l'ouvrage et pour la communication en dehors du projet. Elle a également un rôle à jouer comme simulateur des phases d'exploitation, notamment pour la formation des agents qui exploiteront Cigéo.

*La base de données doit être accessible et à jour sur toute la durée d'exploitation de Cigéo, et assurer une traçabilité complète de toutes les données intégrées. La Commission attire l'attention sur la nécessité de veiller à maintenir l'accessibilité et l'interopérabilité sur toute la durée d'exploitation et de suivi de Cigéo en tenant compte de l'évolution des formats et standards informatiques.*

*Cette structuration de l'information dans un modèle numérique (Building Information Model) ne doit pas dispenser l'Andra de conserver les données sur d'autres supports pérennes.*

## 1.6 L'ORGANISATION AUTOUR DE CIGÉO ET LES RETOMBÉES RÉGIONALES

18

### 1.6.1 La Gouvernance

La Loi du 25 juillet 2016 dispose qu'afin de « garantir la participation des citoyens tout au long de la vie [de Cigéo], l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs élabore et met à jour tous les 5 ans, en concertation avec l'ensemble des parties prenantes et le public, un plan directeur de l'exploitation [PDE] ». En avril 2016, l'Andra avait proposé une première version du PDE dans le cadre du DOS qui devait permettre aux générations futures d'accéder au socle de connaissances qui avait conduit aux choix de conception afin, le cas échéant, de les faire évoluer.

Dans son rapport 11 de 2017, et à la suite de la Loi de 2016, la Commission avait alerté sur l'importance d'un dispositif permettant de traduire concrètement et de manière efficace les principes de réversibilité, ceux-ci étant définis de telle sorte qu'ils permettent la possibilité d'une évolution des décisions prises, notamment eu égard aux adaptations jugées nécessaires lors de la construction de l'ouvrage, en concertation avec les parties prenantes et le public. Dès lors, la Commission avait recommandé la mise en place d'un organe spécifique chargé de conduire la concertation à intervalles réguliers, de faire le bilan des évolutions jugées souhaitables et de les transmettre à l'Andra.

Cette approche implique de préciser les grands principes et enjeux pour définir une gouvernance de Cigéo régissant le processus et la temporalité de la concertation ; une nouvelle version de ce chapitre du PDE concernant la Gouvernance sera jointe à la DAC. Lors des premiers échanges avec l'Andra, toutes les parties prenantes du PDE ont confirmé leur volonté de participer à la construction du chapitre concernant la gouvernance.

À ce jour, les principes ont été identifiés et l'élaboration du PDE est placée sous la responsabilité de l'Andra qui devra s'assurer de :

- l'identification et la mise en place d'instances pluralistes amenées à émettre des avis au cours des processus décisionnels ;
- la continuité des échanges en complément des rendez-vous périodiques et de la visibilité sur le jalonnement des décisions ;
- la prise en compte des recommandations et de la continuité des échanges en complément des rendez-vous périodiques ;
- du respect du principe de réversibilité de Cigéo pour prendre en compte les avancées techniques, sociétales et économiques.

La phase industrielle pilote (Phipil) constituera un moyen de tester et faire évoluer les modalités de gouvernance.

*La Commission constate que les principes de la gouvernance de Cigéo se mettent en place progressivement grâce à l'outil que constitue le plan directeur d'exploitation.*

*Dans ce cadre, elle rappelle qu'en conclusion du processus de concertation, c'est l'Andra, responsable de l'exécution du projet Cigéo, qui, tenant compte des avis reçus, propose au Gouvernement le plan directeur d'exploitation de Cigéo des 5 années suivantes.*

*Compte tenu des responsabilités de l'Andra, la Commission considère qu'il devient urgent de préciser les organes permettant de conseiller l'Andra pour la préparation, l'exécution, et la mise à jour du PDE.*

*La Commission avait proposé en 2017 la création d'un organe spécifique à cet effet.*

*Pour sa part, la Commission organisera chaque année une audition consacrée au PDE.*

### **1.6.2 Les retombées régionales**

Outre les qualités intrinsèques du site, la création du laboratoire souterrain de Meuse-Haute Marne a nécessité que des collectivités territoriales se portent volontaires pour accueillir cet ouvrage. En effet, le législateur a, dès la Loi du 15 juillet 1982 d'orientation et de programmation pour la recherche et le développement technologique, envisagé des mesures d'accompagnement et proposé la création d'un groupement d'intérêt public (GIP) pour les mettre en œuvre. La Loi du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs rappelle, dans son article 12, la possibilité de créer un GIP, en vue de mener des actions d'accompagnement et de gérer des équipements de nature à favoriser et à faciliter l'installation de chaque laboratoire.

Les GIP « Objectif Meuse » et « Haute-Marne » ont ainsi été créés par arrêtés interministériels, respectivement les 20 mai et 16 août 2000. Ils ont été renouvelés par arrêtés interministériels le 9 mai 2007 pour tenir compte des modifications apportées par la Loi du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs.

Les deux GIP sont chargés de la mise en œuvre des mesures d'accompagnement du laboratoire souterrain de recherche de l'Andra et du projet Cigéo.

Ils ont pour vocation de :

- gérer des équipements de nature à favoriser et à faciliter l'installation et l'exploitation du laboratoire ou d'un éventuel centre de stockage ;
- mener, au sein des deux départements concernés, des actions d'aménagement du territoire et de développement économique ;
- soutenir des actions de formation ainsi que des actions en faveur du développement, de la valorisation et de la diffusion de connaissances scientifiques et technologiques.

Des détails sur le fonctionnement de ces GIP sont donnés dans le chapitre 3 de l'Annexe VII.

*La Commission reconnaît et encourage les initiatives d'accompagnement économique du territoire par l'ensemble des acteurs concernés. Elle souligne l'importance des actions de formation afin d'anticiper les besoins en compétences générés par le déploiement du projet.*

*La Commission recommande de renforcer l'accompagnement des entreprises locales, notamment pour l'accès aux procédures de marchés publics. Cet accompagnement doit également porter sur la formation à l'utilisation et l'appropriation de la culture associée au Building Information Model (BIM). À défaut, certaines entreprises verraient des barrières difficiles à surmonter pour l'accès aux appels d'offre.*

### 1.6.3 Le retour d'expérience de grands travaux

Cigéo constituera un chantier hors norme par le partage d'une installation nucléaire de base entre des bâtiments de surface et d'importantes installations souterraines, et par la durée de construction et d'exploitation. L'Andra a conduit une analyse de grands travaux afin d'établir une base de retour d'expérience (REX) et définir un guide de bonnes pratiques. Bien que les chantiers considérés soient différents de Cigéo, l'analyse des problèmes rencontrés et des solutions mises en œuvre éclaire différents points d'organisation. Plusieurs enseignements sont particulièrement pertinents pour un chantier comme Cigéo.

Le partage de l'information entre les acteurs est essentiel. Cela implique un système de recueil centralisé de toutes les informations relatives au projet et à son exécution et des modalités rigoureuses d'échange et de compte-rendu. Chaque acteur doit avoir accès à l'information qui lui est nécessaire, et participer à une chaîne d'alerte sur la détection des anomalies. L'organisation du projet doit disposer d'un processus de traitement des écarts à la configuration de référence, intégré dans la logistique du chantier.

L'adhésion de l'ensemble des acteurs à un projet d'entreprise est un facteur de succès. Une organisation de type entreprise étendue (ou de club entreprise) permet un meilleur partage des valeurs et un engagement de l'ensemble des acteurs : culture de la sécurité, adhésion aux chaînes de détection d'anomalies, intégration dans la logistique du chantier.

Le projet passant logiquement d'une phase de conception à une phase de réalisation, l'Andra prévoit une adaptation significative de ses métiers et compétences afin d'assurer son rôle de maître d'ouvrage. Cette évolution doit être anticipée en identifiant précisément les besoins à venir en s'appuyant à la fois sur les ressources volontaires en interne et en recrutant de nouveaux personnels. En première estimation, l'Andra prévoit une augmentation de ses effectifs d'environ

200 personnes. Tout comme l'Andra a su le faire sur le centre de stockage de l'Aube, elle devra choisir stratégiquement les compétences qu'elle doit impérativement conserver en interne et celles qu'elle renforcera par sous-traitance.

Enfin, dans le respect des procédures de marché public, l'organisation des achats doit tenir compte du tissu industriel, et en particulier du tissu local. Cette organisation doit permettre de sécuriser la fourniture de matériels nécessaires au projet et d'assurer la maintenance sur le long terme des équipements livrés. La réalisation de Cigéo constitue en ce sens une opportunité de développement d'un tissu industriel local, favorisé par l'ampleur et la durée prévisible du chantier.

*La Commission prend note que la construction et l'exploitation de Cigéo seront accompagnées d'une profonde évolution au sein de l'Andra comme au sein du tissu industriel local. Elle recommande que :*

- *cette évolution s'effectue suivant une approche favorisant l'adhésion et la participation de l'ensemble des acteurs de la construction et de l'exploitation du stockage ;*
- *l'Andra veille à bien définir les prérogatives, les limites de responsabilités et les modalités de surveillance du maître d'ouvrage, de ses maîtres d'œuvre et de l'ensemble des sous-traitants ;*
- *les nouvelles compétences métiers de l'Andra soient déployées au plus près du chantier ;*
- *l'Andra veille à conserver la traçabilité de ses décisions et réalisations.*

21

L'analyse du REX industriel pointe également l'importance capitale de bien identifier les exigences à l'amont de la réalisation : les évolutions de conception en cours de réalisation sont source au mieux de délais importants, au pire d'incompatibilités. La stabilité du référentiel, partagé avec les autorités de contrôle, est ainsi indispensable pour assurer une maturité suffisante dès le début du chantier.

*La Commission souligne à nouveau l'extrême importance de stabiliser l'inventaire des déchets à stocker et la conception de l'ouvrage dans une configuration de référence, de façon à permettre l'instruction du dossier dans les meilleurs délais et sur les bases les plus complètes possibles.*

Ce besoin de stabilité ne s'oppose pas à la réversibilité du projet. Sur la base d'une conception stabilisée, l'adaptabilité doit permettre de réinterroger régulièrement certains composants de l'ouvrage, afin notamment d'intégrer des technologies mises au point dans les études de R&D à long terme. Ces modifications, qui devront être évaluées puis validées par les autorités, et leurs modalités d'intégration, seront discutées lors des revues de réversibilité.

## 1.7 LE POINT SUR LES COÛTS DE CIGÉO

Le chiffrage du coût de référence de Cigéo, décidé par arrêté ministériel de 2016, s'élève à 25 G€<sub>2011</sub>. Il fait actuellement l'objet d'une révision qui devra être terminée en 2020, en fin d'APD (avant-projet détaillé). Le chiffrage initial annoncé en 2014 par l'Andra, pour la période 2016-2156 s'élevant à 33,8 G€<sub>2011</sub>, il était nécessaire que l'Andra procède à une baisse substantielle des coûts, toute réduction de coût se faisant en gardant la sécurité, la sûreté et la réversibilité comme principes non négociables.

La réversibilité, comme la sûreté et la sécurité, est en effet un principe fondamental de la construction de Cigéo défini par la Loi de juillet 2016.

Ce principe se décline sur des outils de gouvernance (amélioration des connaissances, transparence, contrôle de l'ASN), aussi bien que sur des outils de conduite de projet permettant de réaliser un ouvrage conforme aux fonctions attendues, fussent-elles évolutives dans le temps. Les contraintes de réalisation impliquées par la progressivité, l'adaptabilité, la flexibilité et la récupérabilité, engendrent des coûts qu'il est vain de vouloir identifier à l'intérieur du coût global au stade du dépôt de la DAC. Par contre, dans le cadre de la mise à jour du PDE, on pourra comparer les coûts de plusieurs options satisfaisant au principe de la réversibilité.

Le principe de base de la recherche de la baisse des coûts adopté par l'Andra, consiste à séparer les économies possibles en deux groupes.

Le premier groupe rassemble les baisses de coûts démontrables scientifiquement et techniquement dès à présent, ou pendant l'instruction de la DAC sans remettre en cause son calendrier.

Le deuxième groupe, défini par l'Andra comme des opportunités, comporte les autres optimisations possibles. Ces dernières incluent les réductions des coûts de long terme, soit au-delà de 2060.

Les baisses de coûts démontrables scientifiquement et techniquement représentent environ 4,75 G€. L'optimisation de la conception et de la configuration des installations souterraines donnerait lieu à une économie de 4,5 G€, le bâtiment nucléaire de surface de 50 M€, et enfin les installations conventionnelles de surfaces, les installations transverses et les aménagements préliminaires pour 200 M€.

Les opportunités post-DAC pourraient représenter quant à elles une réduction de coût de 600-700 M€ à court terme, et de plus de 500 M€ à plus long terme.

Par rapport aux premières révisions déjà présentées à la baisse en 2017, les baisses de coûts démontrables scientifiquement et techniquement sont plus élevées. Elles étaient alors estimées à 4,3 G€. Ceci montre un effort continu de maîtrise des coûts.

Deux groupes de travail sont actuellement en cours, l'un sur le chiffrage (structure, coûts unitaires, méthodes...), et l'autre sur les effectifs (qui inclut l'évaluation des coûts d'exploitations et de maintenance). Les producteurs sont associés à ces travaux.

Pour le dossier de DAC, l'évaluation des coûts porte sur une configuration de référence qui est restreinte aux optimisations démontrables scientifiquement et techniquement pendant la phase d'APD. Le coût ainsi obtenu sera établi sur la base des optimisations techniques de court terme (essentiellement maîtrise d'ouvrage), en utilisant les coûts unitaires et les coûts d'achats les plus vraisemblables, et les coûts de personnel nécessaire à cette configuration. Ces baisses de coût concernent plus particulièrement les optimisations techniques des alvéoles et quartiers MAVL qui représentent le gain le plus important (2,4 G€), l'optimisation des alvéoles et quartiers HA0 et HA1/2 qui permettra de diminuer le coût de 1,5 G€ et les optimisations des bâtiments nucléaires et de surface qui pourraient atteindre à 0,5 G€.

Même si une priorité compréhensible doit être donnée au dossier de DAC par l'Andra, et si la logique du coût incrémental est retenue (soit celle du coût calculé au fur et mesure que les ouvrages sont réalisés), les choix d'optimisation qui seront faits dans la perspective de court terme peuvent affecter les coûts de long terme. Le lien entre les économies de court terme et celles de long terme ne semble ainsi pas clairement articulé.

*La Commission recommande de veiller à ce que le chiffrage soit effectué dans le respect des principes inhérents à la réversibilité dont les conditions sont définies par la loi. En outre, la Commission attire l'attention sur le fait que la logique du coût incrémental pourrait conduire à une diminution des coûts à court terme au détriment des opportunités de réduction des coûts à long terme. Elle demande que cette pratique soit argumentée.*

D'autre part, la PPE est susceptible d'entraîner une modification de l'inventaire et de la nature des déchets qui aura des répercussions sur les coûts de stockage.

*L'Andra devra en conséquence en tenir compte. Ce sera l'occasion de tester la robustesse méthodologique d'estimation des coûts.*



## CHAPITRE II : SÉPARATION & TRANSMUTATION

La Commission, dans son rapport N°12 de Juin 2018, avait souligné les incertitudes sur le futur de l'énergie nucléaire et le manque de visibilité sur la stratégie que devront mettre en œuvre les acteurs de la loi et les organismes de recherche pour répondre aux orientations de la loi relative à la transition écologique pour une croissance verte (Loi TECV). Aujourd'hui, même si elles ne sont pas encore complètement détaillées, des orientations nouvelles sont préconisées dans le cadre de la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE) et la Commission en analyse, dans le cadre de la Loi de 2006, les conséquences sur les matières nucléaires utilisées et les déchets produits par le cycle électronucléaire.

Les études sont soutenues par une recherche fondamentale dont les principaux acteurs sont, outre le CEA, le CNRS et les universités (cf. Annexe VIII).

### 2.1 VERS UNE NOUVELLE CONFIGURATION DU PARC ÉLECTRONUCLÉAIRE

La Loi TECV appelle à une décroissance de production d'électricité d'origine nucléaire dans le mix énergétique qui devrait atteindre 50 % en 2035. La PPE, dans sa version soumise à consultation, prévoit que les premiers réacteurs qui pourraient être fermés de 2025 à 2035, seront des réacteurs de 900 MWe avant leur 5<sup>ème</sup> visite décennale. Certains d'entre eux, actuellement moxés, seront fermés et l'utilisation de Pu sera compensée par le moxage de quelques réacteurs de 1300 MWe. La mise en œuvre d'EPRs de nouvelle génération est envisagée pour maintenir la production électrique au niveau indispensable pour assurer la sécurité d'approvisionnement dans un contexte de transition énergétique et pour pérenniser le tissu industriel.

La transition énergétique nécessitera un ensemble de recherches fondamentales et appliquées présentées dans le chapitre IV.

25

### 2.2 MODIFICATIONS PROPOSÉES DU CYCLE DU COMBUSTIBLE

La fermeture d'un nombre important de tranches de 900 MWe d'ici 2035 a des conséquences sur la politique de recyclage de l'uranium de retraitement (URT) et du plutonium, pratiquée par EdF. En effet, aujourd'hui, seuls les réacteurs 900 MWe sont autorisés par l'ASN à être « moxés ». Le Gouvernement a affirmé dans la PPE son intention de poursuivre la stratégie de traitement-recyclage de l'uranium et du plutonium, au moins jusque dans les années 2040. Le cycle actuel du combustible doit donc être ajusté pour éviter une trop grande accumulation de matières nucléaires valorisables : l'URT entreposé par Orano sous forme d'oxyde d'uranium et le plutonium présent dans les combustibles usés UOx, entreposés d'abord dans les piscines de refroidissement attenantes aux réacteurs (Piscines BK), puis dans les piscines de l'usine Orano de La Hague.

Par ailleurs EdF, Orano et le CEA ont affirmé devant la Commission que l'option de mise en place de réacteurs de 4<sup>ème</sup> génération, à neutrons rapides, reste l'option de référence pour le long terme puisque cette technologie, seule, permet à la fois de consommer l'uranium appauvri, de multirecycliser le Pu, tout en réduisant la radiotoxicité des déchets. Selon EdF et Orano, l'abondance sur le marché et le faible coût actuel de l'uranium naturel conduisent à n'envisager cette option qu'à long terme, lorsque les EPR devront être remplacés (si le déploiement d'une flotte intermédiaire venait à être décidée comme cela est évoqué dans la PPE).

*Face aux incertitudes sur les ressources énergétiques de la France, la Commission constate que cette stratégie est une vision à court terme pour la gestion des matières, soumise aux incertitudes géopolitiques, et donc fragile. Elle risque en effet de remettre en cause l'indépendance énergétique de la France.*

## 2.3 LES CONSÉQUENCES SUR LE CYCLE

### 2.3.1 Sur l'uranium de retraitement (URT)

Le combustible usé sortant des réacteurs REP contient encore 95 % d'uranium qui est séparé lors du retraitement. L'URT ainsi produit peut être ré-enrichi pour fabriquer un combustible à base d'uranium de retraitement enrichi (URE) utilisable dans les réacteurs 900 MWe de Cruas. Le chargement de ce type de combustible a été interrompu par EdF en 2013 pour des raisons économiques mais il est prévu qu'il reprenne en 2023 afin de stabiliser le stock d'URT tout en utilisant des matières issues des combustibles usés des réacteurs REP en fonctionnement. Les premières tranches de réacteurs qui seront chargées à Cruas ne suffiront pas à stabiliser le stock d'URT qui continuera d'augmenter. C'est pourquoi EdF prévoit aussi, vers 2030, d'utiliser plusieurs tranches de réacteurs de 1300 MWe pour recycler l'URT. Le recyclage de l'URE conduit à une économie d'environ 10 % en uranium naturel.

*La Commission souligne que plus de 30 000 tonnes d'URT sont déjà entreposées à Tricastin et que de nouvelles installations d'entreposage deviendront très vite nécessaires si le recyclage de l'URT n'est pas mis en œuvre rapidement.*

*Les demandes d'autorisation auprès de l'ASN seront-elles déposées suffisamment tôt pour que les réacteurs de 1300 MWe puissent consommer de l'URE avant la saturation des installations d'entreposage des URT ?*

### 2.3.2 Sur le plutonium

Selon la PPE, l'utilisation du plutonium en tant que matière énergétique repose sur plusieurs volets successifs : le recyclage du Pu sous forme de combustible MOx, puis le recyclage du MOx en EPR dans l'attente d'un recyclage en RNR. Cette nouvelle stratégie soulève de fortes interrogations pour chacun des volets.

La stratégie de mono-recyclage du Pu sous forme de combustible MOx concerne 24 réacteurs de 900 MWe. La fermeture de plusieurs de ces réacteurs remet cette stratégie en cause. C'est pourquoi EDF prépare une demande d'autorisation de « moxage » de réacteurs de 1300 MWe, afin de poursuivre le recyclage du Pu, permettant une économie d'importation d'uranium naturel d'environ 10 % par an.

*Compte tenu de l'ampleur des études à conduire pour moxer les réacteurs de 1300 MWe, et des délais d'instruction par l'ASN de cette option de recyclage du plutonium, la R&D des divers organismes est-elle en mesure de fournir un dossier dans les temps envisagés par les industriels ?*

*Quelles seront les conséquences de la mise en place de cette nouvelle stratégie sur l'ensemble du cycle électronucléaire ?*

L'autorisation de moxage des réacteurs de 1300 MWe, de même que le remplacement de réacteurs REP par des EPR, moxables par conception, permettrait le mono-recyclage de U et Pu tel qu'il est pratiqué aujourd'hui. Néanmoins, il conduit à poursuivre l'entreposage de MOx

usés dont les quantités seraient en augmentation continue en raison de l'absence de RNR pour les consommer.

C'est pourquoi EDF envisage à terme une nouvelle stratégie de multi-recyclage de U et Pu qui ne concernerait que les EPR de nouvelle génération. Ce multi-recyclage du Pu avait déjà été étudié sommairement dans le passé pour des REP et avait été rejeté par EDF pour diverses raisons (coût, faisabilité industrielle non démontrée, enrichissement des déchets en actinides mineurs, sûreté du cycle et des réacteurs...). Cette option technologique, réouverte aujourd'hui, nécessitera de développer un nouveau combustible MOx (Corail ou MIX). La démonstration de sa faisabilité industrielle requiert des études complémentaires et des moyens significatifs qui ne seront pas nécessairement directement transposables à la filière RNR avec plusieurs objectifs.

- Démontrer l'intérêt économique et technologique du multi-recyclage de U et Pu en EPR en attente d'une filière RNR ;
- Maîtriser la fabrication du combustible Corail, ou du combustible MIX, et leur retraitement à l'échelle industrielle ;
- Gérer l'augmentation de la production d'actinides mineurs : quelle sera leur composition isotopique ? quel sera l'impact de cette augmentation sur le retraitement ?
- Gérer la dégradation de l'isotopie du plutonium, qui nécessitera une nouvelle fabrication spécifique pour le combustible : combien de cycles seront envisagés ?
- Maîtriser la réactivité et la sûreté du cœur du réacteur.
- Préparer l'adaptation de la Hague et de Melox qui devront être robotisées pour assurer la radioprotection.
- Évaluer les conséquences sur la nature, la durée de vie, la radiotoxicité et les quantités de déchets produits. Alors que le moxage des réacteurs de 1300 MWe ne change pas la nature des déchets produits par le parc, la mise en oeuvre du combustible Corail, ou du combustible MIX, nécessaire au multirecyclage du Pu, conduit à de nouveaux déchets beaucoup plus riches en actinides mineurs que ceux produits après monorecyclage des UOx.

*Cette stratégie complexe de multirecyclage de U et Pu en EPR entraînera des modifications significatives de l'isotopie du Pu et impliquera une adaptation des installations de fabrication et de retraitement du combustible. Par ailleurs, le nombre limité de cycles pourrait conduire, en l'absence de RNR, à une augmentation de l'entreposage des MOx usés tout en accroissant l'inventaire en déchets de haute activité.*

*La Commission s'interroge sur l'intérêt d'une telle stratégie, présentée comme une première étape pour la maîtrise d'un cycle du combustible RNR, qui exigera des investissements spécifiques lourds.*

*La Commission constate qu'on s'écarte ainsi des objectifs de la Loi de 2006.*

## 2.4 FERMETURE DU CYCLE

Il apparaît ainsi que, sans remettre en cause le recyclage de U et Pu à court et moyen terme qui maintient les installations opérationnelles, l'option d'une utilisation du plutonium associé à de l'uranium appauvri dans un RNR est repoussée à un horizon lointain.

*La Commission estime d'ores et déjà que le programme Astrid a permis des avancées considérables dans tous les domaines scientifiques et technologiques contribuant à la mise en place de RNR. Un bilan global des études Astrid sera produit fin 2019. La Commission l'évaluera.*

*La Commission s'interroge sur la capacité des acteurs du nucléaire à maintenir et développer une expertise et une compétence pour ne pas perdre les acquis de la mise en œuvre de Rapsodie, Phénix et Superphénix et ceux du développement du projet ASTRID en l'absence de projet motivant à l'horizon 2050-2060.*

*La transmission d'une connaissance approfondie concernant les réacteurs, la séparation et le cycle du combustible, la sûreté, la radioprotection... sera indispensable pour gérer de manière sûre, quel que soit son devenir, l'ensemble du parc électronucléaire jusqu'à sa fermeture définitive.*

*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.*

## 2.5 LA TRANSMUTATION DES ACTINIDES MINEURS

28

L'étude de la transmutation des actinides mineurs est inscrite dans la Loi de 2006. Les recherches concernant la transmutation des actinides ont été évaluées dans les rapports 11 et 12.

Les expériences qui ont été menées au cours des dernières décennies concernent :

- la séparation des actinides mineurs en aval du traitement du combustible UOx usé, soit séparés en groupe (AM = Am+Np+Cm), soit isolés ;
- l'irradiation d'aiguilles contenant des actinides mineurs dans des réacteurs tels qu'HFR (Petten), HBWR (Halden), ATR (INL) et Phénix (Marcoule) sur différents supports (oxyde, matrice inerte, ...).

Les examens post-irradiations des dernières expériences sont encore en cours. Ils permettent de définir une matrice de conditionnement appropriée à la transmutation des actinides mineurs et ils fournissent une première évaluation des taux de transmutation par fission.

Les nouvelles orientations proposées par le CEA comportent :

- des études d'esquisses consacrées à la filière RNR-Na (simulation et plateformes expérimentales permettant de qualifier les composants innovants) ;
- une veille technologique concernant les autres filières de réacteurs de Gen IV dont les Réacteurs à Sels fondus (molten salt reactor ou MSR) qui présentent des potentialités pour la transmutation des actinides. Une R&D sera nécessaire pour lever les nombreux verrous technologiques associés à cette filière.

*La Commission note qu'au niveau mondial, tout comme en France, les études sur les actinides mineurs sont en baisse. Il est impératif de consolider, avec un programme expérimental pluriannuel, le réseau de coopération que le CEA a construit. La Commission souligne à nouveau l'absence actuelle en France d'outils d'irradiation en spectre de neutrons rapides et de plateformes expérimentales dédiées. Ce contexte impose de renforcer les collaborations internationales.*

*Considérant l'intérêt qu'aurait la transmutation de l'américium pour la gestion des déchets dans le futur, la Commission recommande que des études soient poursuivies pour développer les compétences acquises, afin de satisfaire les exigences de la Loi de 2006.*

Récemment, une nouvelle approche est apparue. Elle utiliserait un laser de puissance de nouvelle génération pour produire des neutrons de 14 MeV par une réaction de fusion. Ces neutrons seraient injectés dans un réacteur à sels fondus pour réaliser la transmutation des actinides. Des défis scientifiques et technologiques majeurs resteraient cependant à surmonter :

- réaliser un laser de puissance nécessitant une technologie innovante qui n'est qu'en début de développement ;
- développer une nouvelle filière nucléaire fondée sur l'utilisation d'un réacteur à sel fondu alors qu'il n'existe toujours pas de prototype et donc de filière industrielle au niveau international ;
- disposer d'une filière industrielle de séparation des produits de fission à vie longue et des actinides mineurs.

*Au stade actuel des connaissances, l'ampleur des développements requis au plan scientifique, technologique, et industriel est telle qu'il n'est pas réaliste de fixer une quelconque échéance pour une éventuelle mise en œuvre industrielle de cette approche.*

*Par ailleurs, il convient de noter qu'un retraitement des verres ne serait ni économiquement ni technologiquement envisageable.*



## CHAPITRE III : GESTION DES DÉCHETS

### 3.1 PANORAMA GÉNÉRAL

Les études engagées pour la reprise et le conditionnement (RCD) des déchets historiques (FMAVC, MAVL, FAVL) encore en vrac à la Hague ou à Marcoule, se poursuivent ; elles portent sur les déchets radioactifs du CEA ou d'Orano (voir rapport n° 12, Annexe XVII). Compte tenu de l'ampleur des opérations et des incertitudes quant à la disposition des moyens lourds nécessaires à la seule reprise des déchets, les calendriers courent sur les deux prochaines décennies. La RDC des effluents liquides, tout comme celle de certains combustibles irradiés ou usés du CEA, reste à définir (retraitement ou déchets pour Cigéo).

Parmi les différents types de déchets (TFA/TTFA, FMAVC, FAVL, MAVL et HA, déchets RTCU de Malvési), la filière opérationnelle TFA est l'objet de questionnements et la filière FAVL est en cours de définition. Les colis de déchets des filières MAVL et HA sont destinés à Cigéo.

Dans ses précédents rapports, la Commission a analysé les résultats des études concernant la gestion des déchets TTFA, TFA et FAVL ainsi que celle des déchets uranifères particuliers de Malvési (RTCU - résidus de traitement de conversion de l'uranium). Ces études sont engagées depuis plusieurs années. Elles mobilisent tous les acteurs institutionnels et industriels du système nucléaire : ASN, IRSN, CEA, EDF, Orano et surtout l'Andra qui a la charge de la gestion de tous les déchets hormis ceux de Malvési.

L'IRSN pilote une réflexion sur la nocivité des matières et déchets radioactifs (article 1 de l'arrêté PNGMDR du 23 février 2017). Cette question est au cœur des débats sociétaux concernant les déchets de faible activité, elle requiert une approche spécifique. La nocivité (ou dangerosité ou toxicité) traduit la capacité à provoquer des effets néfastes pour la santé ou pour la survie d'organismes vivants. Pour les déchets radioactifs, les effets peuvent être de nature radiologique ou chimique. Afin de tenir compte de la diversité des déchets, l'IRSN a proposé une classification des nocivités des déchets (distribués en 132 familles et 6 catégories) et des matières (10 catégories et 27 sous-catégories). Les critères retenus sont les expositions radiologiques (indicateurs : dose et dose efficace) et la chimiotoxicité (plusieurs indicateurs) pour 4 scénarios d'exposition d'un individu.

Tous les 3 ans, le PNGMDR anticipe les problèmes à venir dans la gestion des TFA et demande des études pour préparer un changement des pratiques en vigueur, voire de la stratégie.

Grâce à l'exploitation du Cires, l'Andra a un très bon retour d'expérience concernant la gestion des TFA. En revanche, s'agissant des FAVL aucune stratégie n'est encore arrêtée, qu'il s'agisse des radifères, des graphites ou encore des bitumes ; de plus les inventaires ne sont pas stabilisés. L'Andra poursuit la caractérisation d'un site potentiel dans l'argile, proche du Cires et du CSA, qui pourrait accueillir un deuxième stockage TFA et un stockage FAVL.

Sur le site de Malvési, Orano étudie les possibilités de stockage de type SCR (sous couverture remaniée) des déchets uranifères. Quant aux déchets bitumes MAVL du CEA ou d'Orano, certains pourraient être déclassés en FAVL.

### 3.2 TFA

L'inventaire prospectif de production des TFA (et autres catégories de déchets) a été consolidé pour les 50 prochaines années. Ainsi les TFA seraient métalliques pour 45 % dont 9 % de lots homogènes constitués par des enveloppes GV (générateur de vapeur) et des diffuseurs GB (de l'usine d'enrichissement George Besse 1), le reste étant constitué par des déchets divers et par des terres et gravats. Une faible partie de ces déchets serait incinérable. La totalité des TFA

représente environ de 2 millions de m<sup>3</sup>. La poursuite de la gestion centralisée actuelle des TFA conduit à la saturation du Cires en 2028.

Les incertitudes de l'inventaire ne portent pas sur les TFA métalliques mais sur les terres et gravats. Elles sont estimées à partir du retour d'expérience (REX) des chantiers de démantèlement de EDF, CEA et Orano (réacteurs de recherches et ateliers). Le REX montre que, lorsque l'état initial des chantiers est connu et que l'objectif à atteindre est également bien défini, les incertitudes sont de 10 % à 30 %. Les écarts entre les quantités prévisionnelles et les quantités produites sont liés aux modifications des scénarios d'assainissement (conservation des structures ou démolition complète avec décontamination ou non des sols et sous-sols). La définition de l'état final conditionne le volume de déchets et des démonstrations sont nécessaires pour établir l'absence de risque environnemental lorsqu'il ne s'agit pas d'un assainissement complet comme le plus souvent préconisé par l'ASN (retour à l'herbe).

Les réflexions et études préliminaires pour une nouvelle gestion concernent : l'extension (quasiment acquise) de la capacité du Cires (650 000 à 900 000 m<sup>3</sup>), l'ouverture d'un nouveau stockage TFA, la fusion et la valorisation de 200 000 m<sup>3</sup> de lots homogènes de métaux, voire celles d'autres métaux TTFA, et le stockage décentralisé *in situ* pour des TFA dont l'activité est à la limite de détection. La valorisation possible des TFA dépendra de la définition de seuils de libération.

Pour la gestion des TFA, il faut encore préciser les modalités de contrôle et de traçabilité des matériaux qui seraient remis dans le domaine public ou stockés *in situ*.

Leur gestion doit aussi tenir compte des contraintes à la fois économiques et environnementales. Trois paramètres importants interviennent dans l'optimum technico-économique : le conditionnement des déchets en colis, le transport et le stockage des colis.

Concernant l'environnement, un effort doit être fait pour évaluer les impacts potentiels (locaux et globaux) des options de stockage (centralisé ou décentralisé). La méthode de l'Analyse du cycle de vie (ACV) a été appliquée au cas des déchets conventionnels et l'Andra examine comment l'adapter aux TFA pour tenir compte de leurs spécificités : impacts à long terme, exigences de la société et contraintes réglementaires. Une première étude montre qu'un schéma multimodal fer/route permet de réduire de 30 % l'impact environnemental des transports de déchets TFA vers le Cires. Cependant, on ne peut généraliser ce mode de transport, puisque certains sites sont éloignés du chemin de fer. L'impact environnemental des transports routiers reste à évaluer plus finement.

Pas moins de 12 articles de l'arrêté du PNGMDR du 23 février 2017 concernent des aménagements à réaliser pour que la filière TFA soit incluse dans le cadre général du traitement des déchets tel que le définit la Loi TECV. La retranscription dans le code de l'environnement exige de réduire, réutiliser, recycler, récupérer l'énergie des déchets et de les éliminer. Des modifications de la gestion des TFA telles que le concassage des gravats, l'incinération et la densification qui permettraient une éventuelle économie du volume du stockage dans le Cires ne sont, pour l'instant, pas envisagées par l'Andra.

L'analyse multi-critère montre que les scénarios « incinération » et « stockage » sont, *in fine*, équivalents pour tous les aspects autres que les critères environnementaux. C'est au plan environnemental qu'il convient de comparer les deux scénarios. Pour un gain en volume de stockage, l'incinération génère des GES (gaz à effet de serre), des particules fines potentiellement radioactives et des substances chimiques.

S'agissant des TFA métalliques, la fusion permet un gain évident sur les volumes à stocker (facteur de réduction supérieur à 6). Si la fusion est suivie d'une valorisation des métaux, le facteur de réduction de volume à stocker est de l'ordre de 20. Il faut également noter que la fusion-valorisation permet une économie de matière première et s'inscrit pleinement dans les orientations de la Loi TECV.

C'est dans l'hypothèse d'un changement de la réglementation (seuil de libération) qu'une réduction significative de la production des TFA provenant de l'assainissement et du démantèlement peut être obtenue. La majorité des TFA à venir seront issus du démantèlement du parc (400 000 t dont 265 000 t métalliques) ; une grande partie de ces TFA non métalliques destinés au Cires pourrait alors être déclassée puisqu'ils ne nécessiteraient aucune mesure de radioprotection. Orano examine la faisabilité/rentabilité d'une filière de valorisation des métaux basée sur une installation de fusion/décontamination (four à arc) à vocation plus large que la seule fusion des GV de EDF et des diffuseurs GB d'Orano. Cette étude pourrait être soutenue par le programme d'investissement du futur. Le four à arc présente quelques avantages spécifiques car il permettrait de traiter tous les métaux en acceptant des pièces de taille importante sans préparation spéciale, de séparer les impuretés chimiques, de maintenir les radionucléides et les poussières dans le laitier et, enfin, d'homogénéiser la composition des métaux valorisables.

Au-delà de ce qui est déjà envisagé par EDF dans le cadre de l'initiative Cyclelife (cf. rapport n°12), un autre exemple de recyclage-valorisation (qui a été retenu par l'Andra) concerne la réduction des volumes de déchets TFA à stocker au Cires qui fait l'objet du projet Orcade (2017-2021) de récupération de l'âme métallique des câbles électriques de Phénix (câbles conventionnels 17,5 t, TFA 25,4 t et FMA-VC 3,5 t) et de l'Atelier Pilote de Marcoule (câbles conventionnels 135 t).

### 3.3 FAVL

La catégorie des FAVL relève d'une définition par défaut : ce sont les déchets à vie longue qui ne peuvent être stockés en surface mais qui ne sont pas destinés au stockage profond Cigéo dans une approche proportionnée à leur radiotoxicité. Leur inventaire tend à s'élargir.

La caractérisation d'un site potentiel pour implanter un stockage de sub-surface à Vendevre-Soulaines (dans la Communauté de communes de Soulaines, CCS) a débuté en 2013. Une surface de 10 km<sup>2</sup> présentant des propriétés adéquates a été identifiée. Il s'agit d'une couche homogène d'argiles tégulines (convenant à la fabrication des tuiles) de l'Albien inférieur et moyen, épaisse de 20 à 80 m, affleurante ou sous couverture quaternaire, et reposant sur une couche de 10 m de sables verts de l'Aptien supérieur. Ces sables renferment un aquifère pouvant constituer une ressource en eau locale. Ils sont situés en limite orientale du système aquifère régional de l'Albien ; leur connexion hydraulique avec les faciès sableux exploités du centre du Bassin parisien est peu probable selon l'Andra. L'argile téguline possède une perméabilité de l'ordre de 10<sup>-10</sup> à 10<sup>-11</sup> m/s. Ses propriétés de rétention des radionucléides sont comparables à celles du Callovo-oxfordien.

Les efforts déployés récemment par l'Andra ont porté sur l'analyse des techniques de construction pour identifier les meilleures techniques disponibles en s'appuyant sur le REX de la réalisation de divers ouvrages souterrains. L'Andra privilégie un accès aux alvéoles de stockage directement à partir d'ouvrages à ciel ouvert.

Le PNGMDR attend un schéma industriel de gestion des FAVL en 2019.

Les concepts de stockage SCR et SCI étudiés par l'Andra tiennent compte de la période des radioéléments à stocker. Pendant une première phase (millier à quelques milliers d'années) correspondant à une évolution lente du stockage, l'analyse peut être conduite selon des critères de sûreté tels que : isolement, puis confinement des radionucléides et toxiques, limitations des exhalaisons, etc... établies pour limiter les impacts radiologiques considérant plusieurs scénarios. Au-delà de cette phase (analogue selon l'Andra à une phase de fonctionnement), l'érosion du stockage ne doit pas avoir d'impact lors de la libération des radionucléides résiduels.

Les nouvelles orientations proposées sont les suivantes :

- il n'est plus question d'accueillir tous les déchets FAVL sur un même site considérant que la typologie de ces déchets est hétérogène, tandis que certains producteurs (dont ex-Solvay et CEA) misent sur un reclassement de certains de leurs déchets en TFA compte tenu de leur niveau de radioactivité.
- une approche de sûreté et des modalités de gestion des déchets proportionnées au risque associé à chacune des 3 familles de déchets FAVL (radifères, graphites, et bitumes).

*La Commission souligne qu'il est important de sécuriser rapidement chaque filière de gestion des FAVL en tenant compte d'une logique industrielle et réglementaire. On pourrait commencer par la plus simple à mettre en place.*

*Lorsque les études que mène l'Andra pour établir la faisabilité du stockage de chaque filière FAVL seront achevées, la Commission analysera les conclusions obtenues et leur pertinence, en tenant compte de la durée de vie de ces déchets, de la radioactivité associée, de leur nocivité chimique, et de l'impact de l'érosion qui affectera le site au cours du temps.*

### 3.4 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

34

*La Commission estime que la gestion des déchets de faible activité est bien encadrée par les nombreuses études demandées par les PNGMDR successifs. Leurs conclusions apportent les éléments nécessaires pour faire évoluer la gestion des TFA et préparer celle des FAVL. La Commission regrette qu'aucune solution effective ne soit identifiée à ce jour.*

*Pour optimiser la gestion des déchets TFA en fonction de leur nocivité, la Commission préconise d'établir, à partir des indicateurs élaborés par l'IRSN, une méthodologie plus opérationnelle.*

*La Commission apprécie la qualité des études portées à sa connaissance ; elle constate néanmoins que les facteurs économiques ont un poids important dans presque toutes les conclusions. Ceci peut nuire à l'approfondissement des options technologiques envisageables. La Commission recommande d'établir un programme raisonné permettant d'aller jusqu'à des études d'esquisse pour chaque option de gestion des déchets envisagée afin d'éclairer, par des considérations techniques, les choix possibles.*

*Enfin elle souhaite que lui soit présentée chaque année la progression des études en évitant les longs historiques de la gestion des déchets TFA et FAVL maintenant bien connus.*

## CHAPITRE IV : RECHERCHE FONDAMENTALE EN SOUTIEN À LA RECHERCHE APPLIQUÉE

La recherche fondamentale et la R&D concernent les avancées liées au parc actuel, aux réacteurs à neutrons rapides de Gen IV, au cycle du combustible et à l'évolution des installations associées. L'annexe VIII fait le bilan des activités du CEA, du CNRS, d'EDF et d'Orano depuis le rapport n°12 de juin 2018.

### 4.1 R&D EN SOUTIEN AU PARC ACTUEL

#### 4.1.1 Les SMR

Le parc actuel de réacteurs et les installations du cycle vont évoluer conformément à la Loi TECV et à la PPE.

Un nouveau type de réacteur est également évoqué avec le développement d'un avant-projet de réacteur modulaire de faible puissance (SMR). Il posséderait une sûreté passive et pourrait être construit par l'assemblage de modules préfabriqués en usine. Dans un contexte de transition énergétique, ce type de réacteur viserait un marché international en offrant une source d'énergie électrique modulable, permanente (par opposition aux sources d'énergie intermittentes), pouvant répondre à des besoins locaux.

*La Commission note que la France a du retard face à la concurrence internationale. Elle suivra avec intérêt le développement des recherches pour combler ce retard.*

35

*La Commission s'interroge sur les modalités de gestion juridiques et pratiques des déchets radioactifs produits par une flotte de SMR distribuée internationalement.*

*La Commission regrette que la PPE conduise à disperser des moyens au détriment des recherches sur la Gen IV telles que prévues par la Loi de 2006.*

#### 4.1.2 Les procédés de retraitement

Une R&D soutenue a permis de tester de nouveaux procédés permettant la dissolution des combustibles à teneur élevée en Pu. L'utilisation de mono-amides pour le retraitement des combustibles usés améliore très sensiblement la performance des procédés actuels.

#### 4.1.3 Les verres nucléaires

Des études de R&D ont permis de compléter les informations sur la dégradation par l'eau de verres irradiés. Des expériences conduites sur des verres industriels prélevés en 1994 montrent l'absence d'effets sur la vitesse d'altération initiale ( $V_0$ ) mais un effet sur la vitesse résiduelle qui reste très inférieure à  $V_0$  même si elle peut augmenter d'un facteur 10 avec le cumul de dose alpha. Des expériences sont programmées pour comprendre ces écarts. Toutefois, cette augmentation n'a aucune conséquence sur l'analyse de sûreté fondée sur la vitesse initiale (Cf. Annexe VIII).

*La Commission considère que ces nouveaux résultats sur les verres nucléaires confirment que cette matrice offre de bonnes garanties de confinement des radionucléides. Elle recommande de poursuivre les expériences sur le verre industriel pour comprendre la contribution des verres aux marges de sûreté.*

## 4.2 ASTRID ET RNR DE GEN IV

Le programme Astrid, tel que défini en 2010, sera arrêté fin 2019. Il s'est développé dans le cadre de nombreuses collaborations européennes et internationales et a été soutenu pendant une dizaine d'années par des moyens humains et financiers conséquents.

Le CEA a présenté un premier bilan de ce programme à la Commission. Le bilan définitif est en cours de finalisation pour fin 2019. Les acquis du programme Astrid sont très innovants. La Commission présente en Annexe VIII un premier bilan des recherches qui portent sur les thèmes suivants :

- assemblage de combustible RNR ;
- matériaux pour les réacteurs de Gen IV ;
- recyclage du Pu et Séparation-Transmutation.

*La Commission souligne que le programme Astrid a permis des avancées considérables dans tous les domaines scientifiques et technologiques dédiés à la Gen IV avec des retombées sur les filières de Gen II et III.*

36

*La Commission souhaite attirer l'attention sur les conséquences d'une mise en veille d'un programme de R&D sur les RNR. Précurseur il y a quelques dizaines d'années, notre pays voit aujourd'hui ses compétences mobilisées sur les RNR décroître consécutivement à la baisse de son engagement dans la recherche. Envisager le déploiement d'une flotte de RNR même à la fin du siècle requiert le maintien à niveau des compétences et donc un tissu de formations et une attractivité scientifique qui permettra aux futurs experts d'éclorre.*

*La Commission demande au CEA de lui présenter les actions qui lui permettraient d'assurer le maintien des compétences sur les RNR pendant une période dépassant une génération.*

## 4.3 RECHERCHE FONDAMENTALE

### 4.3.1 CEA-DEN

Les développements des procédés de séparation et les expériences d'irradiation en vue de la transmutation ont été fortement soutenus au CEA par la recherche fondamentale.

La recherche fondamentale, tant au plan expérimental que théorique et numérique, (Annexe VIII) couvre :

- le comportement multi-échelles des matériaux métalliques irradiés ;
- l'évolution de la microstructure des pastilles de combustible ;
- le comportement du Pu et des autres actinides dans le cycle ;
- la sonochimie pour accélérer la dissolution d'oxyde de Pu ;
- la séparation et la modélisation des espèces en solution et aux interphases.

*La Commission apprécie très favorablement les progrès réalisés. Elle s'interroge cependant sur l'avenir de la recherche fondamentale sur le cycle du combustible au sein de la DEN du CEA. La réduction des moyens risque de remettre en cause le leadership du CEA dans l'acquisition des connaissances ainsi que dans les collaborations nationales et internationales.*

#### 4.3.2 CNRS et Universités

Le CNRS (IN2P3 et INC) a créé début 2018 le Groupement de Recherche (GDR SCINEE, Sciences nucléaires pour l'énergie et l'environnement).

Le CNRS a décidé par ailleurs de relancer le programme NEEDS en 2020 avec pour objectifs l'étude des mécanismes / processus fondamentaux et l'acquisition de données de base d'intérêt pour l'énergie nucléaire en déclinant trois grandes thématiques :

- réacteurs et transition énergétique ;
- déchets, caractérisation et stockage ;
- ressources, environnement et territoires.

37

Ainsi, les thématiques de NEEDS et du GDR recouvrent bien l'amont et l'aval du cycle. NEEDS associe, avec le CEA, les acteurs industriels du nucléaire (EDF, Orano, Andra, ...) à la communauté académique (CNRS et Universités). Des liens forts sont établis avec les laboratoires nationaux et les grands instruments comme Soleil.

Ces études abordent le problème important de la présence ubiquitaire de radionucléides dans l'environnement et de leurs impacts potentiels sur les systèmes vivants. En dernière analyse, le comportement des radionucléides dans l'environnement ne peut être correctement prévu que si les formes physicochimiques dans lesquelles ils sont impliqués sont connues. C'est pourquoi la spéciation des radionucléides est au cœur des nombreuses études du GDR SCINEE.

#### 4.3.3 Soleil

La ligne Mars (Multi-Analyses on Radioactive Samples) de Soleil (CEA DEN et DAM) est ouverte à la communauté scientifique pour la caractérisation par rayons X d'échantillons radioactifs.

C'est un outil remarquable. Le CEA et le CNRS ont présenté à la Commission plusieurs des premiers spectres de diffraction jamais obtenus sur un échantillon de 1 mm de longueur et de 50 microns d'épaisseur prélevé sur un crayon irradié dans un REP de Gravelines (5 ans d'irradiation, 23 ans de refroidissement). Ces études sont des premières : elles permettent d'obtenir des informations sur les liaisons entre les différents atomes au sein du combustible irradié.

#### 4.4 CONCLUSION

La Commission apprécie très favorablement les avancées réalisées dans la compréhension du comportement des matériaux sous irradiation et des phénomènes impliqués dans le cycle du combustible.

*La Commission souhaite que le CEA-DEN lui présente une hiérarchisation des objectifs et des programmes associés, qui montre clairement quelle sera la stratégie qu'il compte suivre au cours des prochaines années.*

*Pour relever les nombreux défis liés à la nouvelle stratégie électronucléaire, la Commission recommande de lancer une initiative nationale comprenant un volet de recherche fondamentale fort. Cette initiative destinée à entraîner l'ensemble de la communauté scientifique et technologique dans des actions de recherche et de formation d'envergure permettrait de mobiliser de jeunes talents. Elle contribuerait à transmettre et conforter l'expertise française.*

## CHAPITRE V : PANORAMA INTERNATIONAL

### 5.1 INTRODUCTION

Ce chapitre présente les derniers développements au plan international concernant le stockage des déchets radioactifs et décrit brièvement les aspects de la prise de décision. Le rôle dans la prise de décision des autorités chargées de la sécurité, de la planification et de la protection de l'environnement, ainsi que celui des représentants politiques élus aux niveaux local, régional et national est primordial.

Le processus de prise de décision est participatif dans les pays où les programmes de stockage sont les plus avancés.

L'annexe IX donne un aperçu des principales tendances concernant le développement de programmes électronucléaires dans le monde. L'annexe X présente un panorama international des programmes électronucléaires tandis que l'annexe XI décrit les procédures belges pour l'obtention de l'autorisation de création et d'exploitation d'une installation de stockage de déchets nucléaires ainsi que quelques éléments marquants de l'année 2018.

### 5.2 ÉTAPES DE LA PRISE DE DÉCISION

Deux grandes étapes peuvent être distinguées pour la prise de décision :

- les décisions sur le processus, les procédures d'implantation et la préparation d'une demande d'autorisation de construction d'un stockage (pré-application) ;
- les décisions concernant l'acceptation de la demande et de l'autorisation de construire, d'exploiter et de fermer un stockage (post-application).

39

#### a) Pré-application

Une caractéristique commune à la plupart des programmes nationaux de mise en œuvre d'une installation de stockage en couches géologiques profondes - comme Cigéo dans le cas de la France - est la définition de procédures par étapes pour le choix du site et le développement du concept. Un cadre général est fourni par le gouvernement, qui associe les autorités de sûreté-sécurité et celle(s) en charge de la protection de l'environnement. C'est ensuite à un organisme dédié de mettre le programme en œuvre.

Cet organisme peut être formé par le gouvernement, ce qui est le cas par exemple en France et au Royaume-Uni ou, par exemple, par les électriciens qui exploitent des centrales nucléaires, ce qui est le cas en Finlande (Posiva) et en Suède (SKB).

Le niveau de détail prescrit par les autorités politiques et publiques peut varier d'un pays à l'autre. Dans le cas de la Finlande et de la Suède par exemple, les prescriptions pour le processus de sélection d'un site sont assez générales. Après un examen général par les autorités des procédures proposées par les responsables (Posiva et SKB), ceux-ci ont une certaine latitude pour procéder selon leurs propres plans.

En France, le Parlement a joué un rôle clé dans la définition des éléments constitutifs du programme de gestion des déchets et des responsabilités associées pour sa mise en œuvre.

Au Royaume-Uni, le gouvernement a récemment consacré plusieurs années à la production et à la consultation de documents (livre blanc 2014, consultation des communautés 2017, ...) définissant le processus de sélection du site lancé par l'opérateur RWM Ltd au début de 2019.

La nécessité de la participation des élus et citoyens locaux dans le processus de préparation de la décision, surtout pour le choix de site, est maintenant souligné dans la plupart des pays. Les modalités de cette participation peuvent cependant varier : consultations, referendums consultatifs, droit de véto conféré aux élus locaux, ...

## **b) Post – application**

La prise de décision, une fois la demande de construction d'un stockage déposée, suit de manière générale des procédures similaires dans les différents pays. La demande est examinée en détail par les autorités compétentes en matière de sécurité, d'environnement et de planification. Celles-ci fournissent des avis concernant l'acceptabilité de la construction et de l'exploitation et formulent des exigences relatives au projet. La décision finale est normalement prise par le gouvernement. Dans certains cas, comme en Suède et en Finlande, cela se fait moyennant l'accord des autorités locales. Au Royaume-Uni, un « sondage de soutien local » sera exigé et il faudra que le résultat soit positif afin d'obtenir une autorisation de création.

Les spécificités et éléments de contexte propres à chaque pays sont brièvement décrits ci-après.

## **5.3 BELGIQUE**

Le long processus devant mener à la prise de décision en matière de gestion à long terme des déchets radioactifs est illustré pour deux cas : le stockage en surface pour les déchets de faible ou moyenne activité à vie courte, et le stockage géologique pour les déchets de moyenne ou haute activité.

### **5.3.1 Le cas du stockage en surface pour les déchets de faible ou moyenne activité à vie courte**

De 1960 à 1982, la Belgique a participé aux campagnes internationales d'immersion dans l'Atlantique nord de déchets de faible activité (coordonnées par l'OCDE/AEN pour l'Allemagne, la Belgique, la France, le Royaume-Uni et les Pays-Bas). Elle a mis définitivement fin à cette pratique en 1983. L'Organisme National des Déchets Radioactifs et des Matières Fissiles Enrichies (Ondraf — Niras en néerlandais), créé en 1980 et responsable de la gestion sûre et durable des déchets radioactifs en Belgique, a dès lors construit des installations afin d'y entreposer temporairement les déchets de catégorie A (FA et MAVC) qui n'étaient pas entreposés sur les sites des producteurs.

En 1998, le Gouvernement belge a décidé qu'une solution à vocation définitive devait être développée pour les déchets de catégorie A. L'attention a été portée sur les zones nucléaires existantes, mais toutes les communes intéressées auraient pu se porter candidates.

En collaboration avec des unités de recherche universitaires, l'Ondraf a développé un concept de partenariat selon lequel des échantillons représentatifs de la population locale sont invités à élaborer avec l'Ondraf des projets qui leur seraient propres. Quatre communes comportant déjà des installations nucléaires (Dessel, Mol en Flandre, Fleurus et Farciennes en Wallonie) se sont manifestées. Après cinq ans d'études et de travaux poussés, les partenariats ont abouti à cinq avant-projets techniques de stockage en surface et en profondeur. Quatre d'entre-eux, élaborés à Dessel et à Mol, ont reçu l'aval des autorités communales concernées en 2005. En 2006, le Gouvernement a choisi de mettre les déchets de catégorie A dans un stockage en surface à Dessel, sur la base de l'avant-projet développé par ce partenariat.

L'Ondraf a ensuite engagé en 2013 une demande d'autorisation de création de l'installation nucléaire pour ce stockage à l'Agence fédérale de Contrôle nucléaire (AFCN). L'AFCN a analysé le dossier proposé et a vérifié si cette future installation garantissait la sûreté de la population, de l'environnement et des travailleurs à court, à moyen et à long terme.

Elle a posé quelques 300 questions à l'Ondraf. En 2019, l'Ondraf a soumis son dossier de sûreté amendé à l'AFCN qui le transmettra pour avis à son conseil scientifique. Si tout se passe comme prévu, l'autorisation pourrait être délivrée pour mi-2020. Les premiers déchets seraient alors stockés dans l'installation en 2024.

*La Commission note que l'approche participative basée dans le cas de la Belgique sur l'élaboration de partenariats dès le lancement du projet a permis de mettre en œuvre un processus décisionnel progressif, réversible et démocratique, et a ouvert sans nul doute la voie à une meilleure acceptation du projet de stockage au niveau local.*

### 5.3.2 Le cas du stockage géologique pour les déchets de moyenne ou haute activité

En 1974, soit un an avant la mise en exploitation des premiers réacteurs belges, le Centre d'Étude de l'Énergie Nucléaire belge (SCK•CEN) a décidé d'entamer les études de conception d'un stockage géologique pour les déchets B et C (MAVL et HA) et de sélection d'un site. Les études géologiques, confirmées par plusieurs forages, ont montré qu'en dessous du site du SCK•CEN à Mol, une couche d'argile dite 'de Boom' (peu indurée, plastique, épaisseur 100 m, centre à ~250 m sous la surface) permettrait d'envisager la mise en œuvre d'un laboratoire souterrain sur le site afin d'étudier les propriétés de l'argile comme roche hôte d'un tel site de stockage. La construction du laboratoire a commencé en 1980, année de la création de l'Ondraf. Depuis 1995, le laboratoire souterrain est exploité par EURIDICE (un groupement d'intérêt économique entre le SCK•CEN et l'Ondraf).

41

Entre 2011 et 2018, l'Ondraf a soumis à sa tutelle plusieurs propositions de « politique nationale » se fondant toutes sur une solution de stockage géologique sur le territoire national. Alors que les propositions initiales incluaient une formation hôte (les argiles peu indurées), la dernière proposition en date se limite à la solution de stockage géologique, mais sans préciser la roche hôte.

*L'Ondraf a précisé que « cette décision politique est également nécessaire pour estimer les coûts de la gestion à long terme. Reporter la décision ne fera qu'augmenter les coûts : l'entretien du site actuel d'entreposage des déchets coûte cher, sans compter le risque de devoir construire de nouveaux bâtiments d'entreposage si la solution se fait attendre. Si nous voulons éviter de léguer aux générations suivantes les charges liées aux déchets que nous produisons maintenant, une décision politique à court terme est nécessaire. Le futur projet de stockage doit bénéficier du soutien de la population. C'est pourquoi l'ONDRAF souhaite lancer un trajet sociétal dès que la décision politique sera prise. »*

Cependant, aucune politique concernant le stockage géologique n'a été clairement arrêtée jusqu'à présent en Belgique.

### 5.3.3 Autorisation dite « de création et d'exploitation » d'une installation de stockage de déchets nucléaires – procédures

On trouvera une description détaillée des procédures en vigueur en Belgique dans l'Annexe XI.

L'autorisation de création et d'exploitation d'une installation de stockage de déchets nucléaires requiert une procédure à l'échelon fédéral belge qui, selon le niveau de risque de l'installation

concernée, implique différents avis à d'autres échelons (communal, provincial, voire européen en cas d'impact transfrontalier potentiel).

Il convient de noter le rôle important donné à un conseil scientifique, nommé par le Gouvernement et indépendant de l'AFCN, dont l'avis est contraignant s'il est négatif.

## 5.4 CANADA

Au Canada, trois projets de stockage ont été annoncés publiquement. Ils sont portés par trois opérateurs :

- Ontario Power Generation, OPG : il prévoit de stocker les déchets de faible et moyenne activité à vie longue à proximité de la centrale nucléaire de Bruce à Kincardine (Ontario) ;
- la Société de gestion des déchets nucléaires, SGDN : elle est à la recherche d'un site pour stocker tous les combustibles usés et les déchets de haute activité du Canada ;
- les Laboratoires Nucléaires Canadiens, LNC : cette entité propose de stocker en sub-surface, jusqu'à 1 million de m<sup>3</sup> de déchets de faible activité hérités de la recherche, de l'exploitation et du démantèlement principalement sur le site du Laboratoire National de Chalk River à Ottawa.

### 5.4.1 Stockage en profondeur pour déchets de faible et moyenne activité à vie longue – OPG

Le stockage en couches géologiques profondes pour déchets faiblement et moyennement radioactifs sera situé à côté de l'installation de gestion des déchets d'OPG sur le site nucléaire de Bruce. L'installation gèrera environ 200 000 mètres cubes, provenant des centrales nucléaires appartenant à OPG ou exploitées par celle-ci en Ontario. Il est proposé que l'installation soit située à environ 680 m sous la surface, dans du calcaire à faible perméabilité et sous une couche de schiste argileux ayant une épaisseur de 200 m.

Le projet a débuté en 2001 quand la municipalité de Kincardine a demandé à OPG d'entamer des discussions préliminaires sur la gestion à long terme des déchets de faible et moyenne activité. Fin 2005, la procédure d'approbation réglementaire a été lancée avec la soumission de la description du projet de stockage après une longue phase préparatoire comprenant une étude d'évaluation indépendante, la négociation d'un accord avec la collectivité locale, et un sondage auprès de la collectivité qui a révélé un fort soutien à la réalisation du projet.

Cette procédure a conduit en 2006 à une déclaration préliminaire relative à l'étude d'impact environnemental d'un tel projet.

En 2007, le ministre de l'Environnement a demandé un complément d'instruction de cette étude d'impact et mandaté à cet effet une commission composée de membres de l'Agence canadienne d'évaluation environnementale et de la Commission canadienne de sûreté nucléaire. Trois documents ont été soumis en avril 2011 à cette commission : l'étude d'impact environnemental, le rapport préliminaire de sûreté et quelques documents complémentaires mettant en perspective les sujets de la sûreté, de la sécurité et de la protection de l'environnement. En février 2012, la commission a ouvert la période d'enquête publique. Après 15 mois d'examen des documents soumis à enquête publique, la commission a annoncé la tenue d'un débat public de quatre semaines sur le projet. La commission a conclu en mai 2015 que le site de Kincardine proposé par OPG représentait une solution technique acceptable pour la gestion à long terme des déchets faiblement et moyennement radioactifs et recommandait de donner une suite favorable à ce projet. Cependant, le projet a également rencontré une opposition à la fois des élus et citoyens tant au niveau local que national jusque dans la région des Grands Lacs aux États-Unis.

Il a été demandé à OPG de compléter son dossier par des études de solutions alternatives et par une étude d'impact des effets cumulatifs associés au stockage sur le même site de combustibles usés et de déchets de haute activité tel que proposé par SGDN.

Ainsi, le calendrier d'autorisation du projet reste incertain.

OPG estime qu'il faudra de cinq à sept ans pour à la fois obtenir le feu vert de l'administration et réaliser les travaux nécessaires (préparation du site et construction) du stockage) avant de pouvoir espérer envoyer les premiers colis de déchets.

#### **5.4.2 Stockage pour combustible nucléaire usé – SGDN**

Depuis 2010, la SGDN est engagée dans une campagne pluriannuelle de recherche de site (pilotée par la collectivité) où le combustible nucléaire usé du Canada pourrait être confiné et isolé en toute sécurité dans un stockage en couches géologiques profondes. Le gouvernement a approuvé le principe d'une telle installation de stockage à barrières multiples. Le processus de sélection d'un tel site a fait l'objet d'une large concertation qui s'est échelonnée sur deux ans. Ce processus participatif a permis de collecter les idées, l'expérience et les meilleurs conseils d'un vaste échantillon représentatif de Canadiens. Ainsi, les citoyens ont pu faire part de leur opinion sur ce qu'un tel processus de concertation (ouvert, transparent, équitable et inclusif) devrait intégrer afin d'être en mesure de prendre une décision satisfaisante.

Le processus est piloté par la collectivité. Il est conçu pour s'assurer, avant tout, que le site choisi est sûr, qu'il peut être sécurisé et qu'il est hébergé par une communauté locale pleinement informée et consentante. Ce processus doit également respecter les normes scientifiques, professionnelles et éthiques les plus élevées.

La sûreté et la pertinence de tout éventuel site seront jaugées par une série d'évaluations scientifiques, techniques et sociétales, qui seront progressivement de plus en plus détaillées.

Le processus de sélection nécessite l'adhésion des collectivités de la région concernée, i.e. qu'elles soient volontaires pour l'initier et le mettre en œuvre. Les collectivités potentiellement intéressées sont encouragées à initier un processus d'étude et d'engagement incluant les collectivités des Premières Nations et des Métis, ainsi que les municipalités environnantes. Le projet n'ira de l'avant que si les communautés intéressées, les collectivités des Premières Nations et des Métis ainsi que les municipalités avoisinantes, travaillent ensemble à sa mise en œuvre.

Le soutien au projet par la collectivité a été fort large avec près de 21 collectivités qui ont exprimé leur intérêt. La SGDN a sélectionné cinq propositions de site pour des études plus détaillées. Tous sont situés en Ontario où sont opérés la plupart des réacteurs nucléaires canadiens.

Le plan actuel prévoit que l'un des sites aura été choisi d'ici 2023 pour l'implantation du stockage. Des études géologiques exploratoires, dont des forages profonds, ont récemment été engagés sur certains des sites proposés. Des études de concept sont également en cours intégrant l'option technologique basée sur l'encapsulation des combustibles usés dans des conteneurs en cuivre pour le stockage dans une roche cristalline. Un laboratoire d'étude du système à barrières multiples (conteneur + bentonite) a été installé au nord de Toronto.

#### **5.4.3 Stockage près de la surface des déchets de faible activité - LNC**

L'installation de stockage en sub-surface est un projet envisagé sur le site des Laboratoires Nationaux de Chalk River (LCR). Le site des LCR est situé dans le comté de Renfrew, en Ontario, sur la rive de la rivière des Outaouais, à environ 200 kilomètres au nord-ouest d'Ottawa.

L'installation de stockage en sub-surface devrait être opérationnel d'ici une cinquantaine d'années ; le concept proposé est basé sur un monticule artificiel modulaire, composé de multiples cellules de stockage, elles-mêmes composées de :

- revêtements de sol à la base de chaque cellule et d'une couverture définitive ;
- systèmes de collecte des lixiviats et de détection de fuites ;
- systèmes de surveillance de l'environnement.

Les Laboratoires canadiens nucléaires ont soumis une demande de révision du projet afin d'autoriser également le stockage de certains déchets de moyenne activité, en plus des déchets de faible activité et des déchets mixtes. Tous les déchets devant être stockés devront satisfaire les critères d'acceptation des colis et contribuer ainsi à la mise en œuvre des exigences opérationnelles et de sécurité à long terme du stockage.

LCN a fourni une ébauche d'étude d'impact environnemental et des audiences publiques ont eu lieu et prépare actuellement les réponses aux commentaires reçus.

## 5.5 ESPAGNE

Le programme électronucléaire espagnol est basé sur un cycle ouvert.

Un stockage final en couches géologiques profondes est prévu pour les éléments de combustibles usés. Toutefois, il n'existe pas à ce stade de programme exploratoire pour la sélection d'un site pour un tel stockage.

La solution provisoire approuvée en 2011 consiste à construire un entreposage temporaire centralisé (TCR), en complément des trois entreposages temporaires individuels existants situés sur les sites des centrales nucléaires en opération. Le site du TCR avait déjà été choisi et se situait à Villar de Cañas, à 140 km au sud-est de Madrid. Le Conseil des ministres espagnol avait approuvé le démarrage officiel du projet le 30 décembre 2011.

Le projet progressait bien et une demande d'autorisation officielle du projet avait été adressée à l'Agence de sûreté nucléaire espagnole (CSN) par la société nationale en charge de la gestion des déchets nucléaires (ENRESA). Toutefois, le Ministère de la Transition Écologique a demandé fin 2018 à la CSN de suspendre temporairement la décision concernant l'autorisation du projet.

44

Actuellement, le Ministère réévalue la situation globale, y compris la possibilité de prolonger la durée de vie de certaines centrales jusqu'en 2025-2035. Pour évaluer cette prolongation éventuelle de la durée de vie, une étude économique détaillée est en cours par les propriétaires privés des centrales nucléaires. Le but est d'estimer la rentabilité économique des investissements nécessaires à la prolongation eu égard aux recettes attendues associées à la production complémentaire d'électricité.

## 5.6 FINLANDE

En Finlande, le processus d'implantation d'un stockage a été achevé il y a 20 ans, lorsqu'un site proche de la centrale nucléaire d'Olkiluoto a été sélectionné avec l'accord de la municipalité d'Eurajoki.

Le concept du stockage est basé sur la technologie suédoise KBS3 (stockage dans la roche cristalline du combustible usé encapsulé dans des conteneurs en cuivre). Un permis de construire - le premier au monde pour un stockage de combustibles usés - a été délivré en 2015. Aujourd'hui, les travaux de construction sont bien avancés avec environ 7 km de galeries déjà creusées. Le forage du puits destiné à acheminer dans le stockage les conteneurs de combustible irradié encapsulé est en cours de réalisation.

Un essai en maquette à l'échelle 1 utilisant des éléments de chauffage électrique pour simuler la chaleur résiduelle des combustibles usés est en cours d'installation dans une galerie du stockage dédié à l'observation dans le cadre d'un projet multilatéral de coopération (appelé FISST, Full-scale In-situ System Test) afin de :

- prouver que le processus de stockage définitif fonctionne en pratique (de la chaîne d'approvisionnement au transfert in situ des conteneurs) ;

- prouver que l'état initial (tel que prédéfini) peut être atteint en satisfaisant les exigences de sûreté en vigueur ;
- produire les premiers retours d'information (REX) sur l'évolution du stockage.

Ainsi, le projet FISST donnera l'assurance que le stockage peut être effectué grâce à une démonstration technico-scientifique dans des conditions réalistes et dans une installation de stockage réelle.

Ayant été approuvés par le STUK (l'autorité finlandaise de sûreté nucléaire), les préparatifs sont également en cours pour la construction du tunnel central (classé nucléaire).

Parallèlement aux travaux souterrains, la construction de l'usine d'encapsulation a débuté. Les travaux d'excavation et de grenailage de la fondation sont terminés. La conception détaillée et l'attribution des marchés sont en cours d'élaboration. Les principaux fournisseurs de systèmes ont déjà été sélectionnés.

Le transfert des premiers conteneurs contenant du véritable combustible usé pourrait débuter vers le milieu des années 2020.

## 5.7 ROYAUME-UNI

Les trois pays les plus avancés au monde en matière de stockage géologique profond sont la Finlande, la Suède et la France. Dans ces pays, un site a déjà été sélectionné et les demandes de construction associées ont été acceptées (Finlande), soumises et examinées en attendant une décision finale (Suède) ou sur le point d'être soumises (France). Cependant, les programmes électronucléaires et les inventaires de déchets correspondants diffèrent beaucoup entre ces 3 pays, la France présentant un cas spécifique comparé à la Finlande et la Suède dont la situation est assez similaire.

En effet, le programme français est beaucoup plus vaste et complexe car il concerne des applications civiles et militaires. Il comprend par ailleurs de nombreux réacteurs de recherche, plusieurs installations pilotes de réacteurs à neutrons rapides et dispose d'un cycle partiellement fermé (le combustible usé y est retraité).

Ainsi, le pays dont les enjeux stratégiques se rapprochent le plus de ceux posés pour le programme français est le Royaume-Uni. Le pays (également doté de l'arme nucléaire) a une longue histoire nucléaire ainsi qu'une variété d'installations et d'activités nucléaires similaires au cas de la France.

Il est donc intéressant de décrire plus en détail la situation et les projets en cours au Royaume-Uni, d'autant plus que le gouvernement britannique a très récemment lancé un nouveau programme de sélection de site pour la mise en œuvre d'une installation de stockage en couches géologiques profondes.

### 5.7.1 Inventaire de déchets

Le Royaume-Uni a accumulé depuis les années 1940 une quantité substantielle de déchets radioactifs résultant d'activités nucléaires civiles et militaires. Cette quantité est appelée à augmenter au cours du siècle prochain, au fur et à mesure que les installations nucléaires existantes seront déclassées tandis que de nouvelles centrales nucléaires, prévues par le gouvernement, seront progressivement mises en service et produiront à leur tour de nouveaux déchets. Bien qu'il existe déjà des possibilités de stockage pour les déchets peu radioactifs (comme les déchets FA qui sont stockés au comté de Cumbria), il n'existe actuellement aucune solution au Royaume-Uni pour les déchets MAVL et HA.

Le volume total de déchets conditionnés à stocker est actuellement estimé à 750 000 m<sup>3</sup>. Il comprend les déchets historiques, déjà en entreposage temporaire, les déchets de

démantèlement destinés au stockage géologique, ainsi que ceux qui proviendront du nouveau programme nucléaire.

Les principales catégories de déchets comprises dans le volume total de 750 000 m<sup>3</sup> conditionnés sont :

- déchets de haute activité, HA (verres nucléaires) : 10 000 m<sup>3</sup>,
- déchets de moyenne activité, MA : 460 000 m<sup>3</sup>,
- déchets de faible activité à vie longue, FAVL : 11 000 m<sup>3</sup>,
- plutonium, Pu : 620 m<sup>3</sup>,
- combustibles usés : 68 000 m<sup>3</sup>,
- uranium appauvri ou faiblement enrichi : 190 000 m<sup>3</sup>, actuellement stockés sur une trentaine de sites, mais principalement en surface à Sellafield (Cumbria).

### 5.7.2 Tentatives antérieures d'implantation d'installations de stockage

Au Royaume-Uni, plusieurs tentatives d'implantation d'installations de stockage géologique pour les déchets HA ont déjà eu lieu. Dans les années 1980-1990, les efforts initiaux visaient à choisir un site plutôt pour les déchets de moyenne activité par une approche top-down, entièrement réalisée à huit-clos. Cela a conduit à une demande d'autorisation de création d'une installation souterraine pour la caractérisation des roches près de Sellafield. La demande a été rejetée en appel en 1997.

Entretemps, Nirex (l'organisation chargée des installations de stockage avant la création de l'entité publique Radioactive Waste Management ou RWM, entité en charge aujourd'hui de la gestion des déchets radioactifs) était devenue la propriété directe du gouvernement. En 2005, les travaux avaient déjà coûté plus de 500 millions de livres sterling, intérêts non compris. Une grande partie de ces dépenses a été consacrée à la réalisation de campagnes et d'études de forages.

46

Une deuxième tentative pour identifier des sites appropriés a été menée de 2008 à 2013, suivant la méthodologie décrite dans le Livre blanc intitulé « Managing Radioactive Waste Safely » sur la gestion durable et en toute sécurité des déchets radioactifs. Pour ce faire, les autorités locales devaient se porter volontaires de manière proactive afin de participer et de mener des concertations afin de favoriser le soutien local à l'accueil d'un stockage. Un cadre rigide exigeait qu'elles franchissent des étapes décisionnelles dans un ordre prédéterminé. En pratique, cela plaçait les politiciens locaux dans une position très délicate, tout en empêchant aussi bien le porteur du projet (RWM) que le Gouvernement de réagir aux aspirations des communautés concernées. Le processus a été clôturé en janvier 2013 après qu'une des trois autorités locales concernées de Cumbria ait décidé de ne pas passer à l'étape décisionnelle suivante. En plus des dépenses de près de 100 millions de livres sterling déjà engagées par RWM, le gouvernement britannique a financé tous les travaux des autorités locales liés à ce processus exploratoire. Au total, le coût direct s'élevait à 4,2 millions de livres sterling.

Il convient de noter que la mise en place d'une installation de stockage géologique est essentielle pour l'autorisation de toute nouvelle centrale nucléaire au Royaume-Uni. Cela a été clairement indiqué parmi les exigences relatives aux futures décisions d'autorisation que le secrétaire d'État qualifié devra prendre à l'égard des nouvelles centrales nucléaires.

De plus, le stockage géologique est essentiel à la mission de la Nuclear Decommissioning Authority, consistant à assainir les installations arrivées en fin de vie et à gérer les déchets historiques. Les déchets HA sont actuellement entreposés dans des installations provisoires sur un certain nombre de sites nucléaires agréés (le plus important étant celui de Sellafield).

En élaborant le programme actuel de gestion des déchets, le gouvernement du Royaume Uni a stipulé les recommandations suivantes :

*« À court terme, ces déchets peuvent être gérés en toute sécurité dans ces entreposages provisoires de surface, mais il est largement reconnu qu'il ne s'agit pas d'une solution durable à*

*long terme. Stocker durablement en surface représente une responsabilité importante et permanente, exigeant une surveillance et une gestion constante des risques. Cela exige aussi des investissements soutenus, pendant une période extrêmement longue, à la fois pour le renouvellement des bâtiments de stockage et pour le reconditionnement des déchets. Tant que les déchets sont entreposés en surface, ils resteront vulnérables aux événements environnementaux et aux interférences humaines. Compte-tenu de la durée pendant laquelle ces matières demeureront dangereuses, il n'est pas crédible de compter sur une intervention humaine suffisamment qualifiée, motivée et financée pour les protéger des effets liés au changement climatique, à l'élévation du niveau de la mer, ou à d'autres menaces d'agressions externes (acte terroriste ou risque de conflit armé). Si le Royaume-Uni veut continuer à être un membre respecté et reconnu comme un acteur de premier plan par des organismes internationaux tels que l'Agence internationale de l'énergie atomique et l'Agence pour l'énergie nucléaire, il doit répondre à cette exigence fondamentale qui est de pouvoir gérer et stocker en toute sécurité et de façon durable ses propres déchets radioactifs. Il s'agit donc d'un projet d'infrastructure nationale avec une forte implication locale. Le projet ne se réalisera que s'il y a une collectivité d'accueil consentante. Toute communauté entrant dans le processus d'implantation d'un centre de stockage, et formant un partenariat communautaire, recevra un soutien financier pouvant aller jusqu'à 1 million de livres sterling par an, montant annuel qui pourra atteindre 2,5 millions de livres sterling au fur et à mesure que le processus de mise en œuvre progressera (et pourra s'étaler sur 15 à 20 ans). Pour la commune qui hébergera l'installation, un des bénéfices attendus sera la création d'un nombre important d'emplois. »*

RWM met en œuvre une démarche fondée sur le consensus.

Elle donne aux collectivités locales et à RWM un droit permanent de retrait du projet.

Les conditions requises pour garantir le succès d'une telle démarche sont les suivantes :

- avoir attiré quelques collectivités (une dizaine environ) dans le processus d'implantation ;
- avoir identifié, évalué et comparé quelques sites candidats (environ 5) ;
- recommander la caractérisation (notamment grâce à des forages) d'au moins deux sites.

Jusqu'à présent, RWM est prêt à étudier différentes formations géologiques, y compris les roches dures cristallines ou les formations argileuses. La coopération avec SKB (Suède) et l'Andra constitue un atout incontestable du projet pour le partage des connaissances sur les concepts spécifiques de stockage et des meilleures pratiques (ou bases scientifiques) en matière de sûreté et sécurité.

## 5.8 SUÈDE

### 5.8.1 Stockage du combustible irradié

Le site suédois de stockage géologique du combustible nucléaire irradié a été choisi en 2009 par SKB (société suédoise de gestion des déchets nucléaires et des combustibles usés). Ce site est situé à proximité de la centrale nucléaire de Forsmark, dans la commune d'Östhammar.

En 2011, SKB a présenté ses demandes d'autorisation de construire pour l'installation de stockage, conformément à la loi sur les activités nucléaires et au code de l'environnement.

Début 2018, après un examen approfondi, l'autorité de radioprotection « SSM » a recommandé au gouvernement d'approuver la demande de SKB. La Cour de l'environnement, après 6 semaines d'audiences publiques, a recommandé au gouvernement de demander à SKB des informations complémentaires sur cinq aspects particuliers du comportement des conteneurs en cuivre dans des conditions de stockage. Depuis lors, la SKB a préparé une réponse à cette demande et un ensemble de documents a été soumis au gouvernement début avril 2019.

Le contenu du dossier comprend :

- les réponses à toutes les questions soulevées par la Cour dans sa recommandation au gouvernement ;
- la comparaison entre les résultats obtenus sur le comportement des conteneurs lors des expériences réalisées en surface avec ceux provenant des simulations de l'évolution de ces conteneurs en conditions de stockage ;
- les conséquences radiologiques estimées pour le cas très hypothétique d'une défaillance prématurée du conteneur.

La documentation de la SKB est basée sur les résultats provenant d'un certain nombre de nouvelles expériences, de calculs et d'analyses de modèles, ainsi que du retour d'expérience déjà disponible.

Les résultats ont été compilés dans une vingtaine de nouveaux rapports et publications scientifiques. Un rapport de synthèse tire les principales conclusions sur les questions spécifiques liées à la durabilité des conteneurs et à leur rôle clé pour la sûreté du stockage après fermeture.

Tous les rapports ont fait l'objet d'une revue externe par des pairs afin d'en assurer la qualité technique et scientifique.

Les nouveaux rapports confirment les conclusions antérieures de SKB concernant la tenue du conteneur en cuivre dans l'environnement du stockage. Ils montrent qu'un stockage de combustible usé à Forsmark, selon la méthode proposée par SKB, répond aux exigences à long terme de sûreté après fermeture.

La documentation comprend également les spécifications requises concernant la conformité des conditions d'exploitation permises par rapport au Code suédois de l'environnement, une description plus claire de la zone (tant en surface que sous terre) dédiée à l'exploitation du stockage de combustible usé, et enfin les réponses aux autres documents et communications soumis.

Le Ministère de l'environnement va maintenant poursuivre l'instruction d'une décision gouvernementale. Ainsi, le processus d'autorisation du stockage définitif se poursuit sans obstacle particulier à ce stade. Le gouvernement est censé demander l'opinion de l'autorité de radioprotection (SSM), ainsi que l'opinion de tous ceux qui ont participé au débat public qui s'est tenu à l'automne 2018, sur la base des documents fournis par SKB. La Cour de l'environnement ne devrait pas être sollicitée à nouveau puisqu'elle a déjà rempli son rôle dans le processus de décision. On s'attend à ce que le gouvernement prenne une décision en 2020. Cependant, l'autorisation de construire ne pourra être accordée si la municipalité d'Östhammar exerce son droit de veto.

Parallèlement à la finalisation du processus d'autorisation, SKB prépare le début des travaux de construction de l'installation de stockage à Forsmark et de l'usine d'encapsulation à Oskarshamn respectivement prévu en 2022 et 2024, avec les premières opérations de mise en service vers 2030.

### **5.8.2 Extension du stockage souterrain « SFR » pour les déchets de faible activité**

En 2014, SKB a déposé une demande d'autorisation afin d'agrandir le stockage de déchets de faible activité à Forsmark principalement pour les déchets provenant du démantèlement de centrales nucléaires. L'autorité de radioprotection a recommandé que la demande soit approuvée et la Cour de l'environnement prévoit de tenir une nouvelle session d'audiences publiques à l'automne 2019. L'extension consistera en 6 nouveaux espaces de stockage envisagés à une profondeur de 100 à 150 m. Le début de la construction est prévu en 2023 et l'exploitation en 2029.

### 5.8.3 Stockage pour les déchets de faible activité à vie longue, « SFL »

Une installation de stockage ultime sera nécessaire pour les déchets de faible activité issus du programme suédois. L'estimation de l'inventaire, le développement de concepts technologiques dédiés et les évaluations de sûreté sont en cours. La capacité requise est assez limitée car elle concernera environ 10 000 m<sup>3</sup> de déchets conditionnés. SFL devrait être construit à une profondeur de 300 à 500 m. Le site n'a pas encore été choisi et la construction est prévue après 2030.

## 5.9 CONCLUSION

*La Commission note que dans tous les pays qui développent des centres de stockage de déchets nucléaires, la réussite repose dans tous les cas sur un processus transparent et participatif. Ce processus associe les autorités locales et les citoyens concernés localement et nationalement, les autorités de sûreté et environnementales, les organismes scientifiques. Cette concertation contribue à l'évaluation des concepts et technologies proposés. C'est sur cette base qu'un principe de décision rationnel peut être instruit dans le dialogue et le respect mutuel des parties prenantes pour mettre en œuvre une stratégie globale et durable de gestion des déchets radioactifs.*

*La Commission souligne que les processus de décisions sont souvent très longs et qu'il convient d'être persévérant pour éviter un enlisement des dossiers qui aurait pour conséquence de reporter la charge des déchets sur les générations futures.*







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

**Jean-Claude DUPLESSY** – Président de la Commission nationale d'évaluation – Membre de l'Académie des Sciences - Directeur de recherche émérite au CNRS.

**Anna CRETl** – Professeur des Universités, Université Paris Dauphine, Senior Research Fellow, Département d'Économie, École Polytechnique External Affiliate, University of California Environnement, Energy and Economics, Berkeley and Santa Barbara.

**Frank DECONINCK** – Professeur émérite de la Vrije Universiteit Brussel – Président honoraire du Centre d'études de l'énergie nucléaire de Mol, Belgique.

**Pierre DEMEULENAERE** – Professeur de sociologie à Sorbonne Université.

**Robert GUILLAUMONT** – Membre de l'Académie des Sciences – Membre de l'Académie des technologies – Professeur honoraire Université Paris Sud Orsay.

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

**Maurice LAURENT** – Directeur honoraire de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques.

**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 Géoressources, Direction Géosciences, à l'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.

**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.

**Gilles PIJAUDIER-CABOT** – Vice-président de la Commission nationale d'évaluation, Professeur de Génie Civil, Directeur exécutif E2S, Université de Pau et des Pays de l'Adour – Membre sénior de l'Institut Universitaire de France.

**Claes THEGERSTRÖM** – Président émérite de SKB (Compagnie suédoise chargée de la gestion des combustibles et des déchets nucléaires) – Membre de l'Académie royale suédoise des sciences de l'ingénieur.



## ANNEXE II : ACTIVITÉ DE LA COMMISSION

Depuis la publication de son précédent rapport en juin 2018, la Commission a présenté son rapport n°12 à l'OPECST et aux départements ministériels concernés. Une délégation de la Commission s'est rendue à Joinville le 11 octobre 2018 pour y présenter son rapport aux membres du Clis du laboratoire de Bure (Cf. Annexe III).

La Commission a suivi la même méthode de travail que les années précédentes. Elle a procédé à 11 auditions d'un jour (Cf. Annexe IV), et 6 auditions restreintes d'une demi-journée dont une sur la gestion des déchets bitumeux avec l'Andra, le CEA et les producteurs, chacune à Paris, ainsi qu'à un certain nombre de réunions complémentaires avec les acteurs de la loi. Les membres de la Commission, tous bénévoles, ont entendu 123 personnes de l'Andra et du CEA, mais également des institutions universitaires et organismes industriels, français et étrangers (Cf. Annexe V). Ces auditions rassemblaient en moyenne une soixantaine de personnes, notamment des représentants de l'Autorité de sûreté nucléaire, d'Orano, d'EDF, de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire et de l'Administration centrale.

La Commission a consacré deux journées à la visite du Centre de la Hague à Cherbourg et une demi-journée à la visite d'ICEDA, Centrale de Bugey – EDF (Annexe III).

Pour préparer ce rapport, la Commission a tenu un pré-séminaire de 2,5 jours, à l'occasion de sa visite du Centre ICEDA (EDF). Elle a tenu de nombreuses réunions internes, dont une d'une durée de 5 jours en séminaire résidentiel. La liste des documents qu'elle a reçus des organismes auditionnés est donnée en Annexe VI.



## ANNEXE III : PRÉSENTATIONS ET VISITES DE LA COMMISSION

### *Auditions de la Commission*

23 juin 2018 : Présentation du rapport n°12 à l'OPECST

11 octobre 2018 : Présentation du rapport n°12 au Clis

### *Visites de la Commission*

12 et 14 février 2019 : Orano - Visite du Centre de La Hague

3 avril 2019 – après-midi : EDF – Visite d'ICEDA – Centrale de Bugey



## ANNEXE IV : AUDITIONS REALISÉES PAR LA COMMISSION

### AUDITIONS PUBLIQUES

18 octobre 2018 :	Andra – Réponse aux points scientifiques et techniques relevés suite à l’instruction et l’analyse du dossier de DOS : point d’avancement
14 novembre 2018 :	CEA – La gestion du plutonium et des actinides mineurs : cycle actuel, prospectives et recherches associées
15 novembre 2018 :	Andra – Quelles perspectives de gestion industrielle des déchets de faibles et très faibles activité ?
05 décembre 2018 :	CEA – La recherche fondamentale et la recherche amont dans le domaine nucléaire : Études au CEA et au CNRS
06 décembre 2018 :	Andra – L’impact environnemental et économique de Cigéo
09 janvier 2019 :	CEA – Les matériaux du nucléaire
10 janvier 2019 :	Andra – Le développement industriel et technique de Cigéo : de la conception à la réalisation incrémentale
06 février 2019 :	CEA - Panorama international des activités nucléaires
07 février 2019 :	Andra – La maîtrise de l’hydrogène dans les différentes phases de vie de Cigéo
13 mars 2019 :	Andra – La gouvernance, la DUP, et les aspects technico-économiques/coûts de Cigéo.
14 mars 2019 :	CEA – Les réacteurs du futur et les cycles du combustible associés

57

### AUDITIONS RESTREINTES

19 septembre 2018 – matin :	EDF
19 septembre 2018 – après-midi :	Andra
20 septembre 2018 – matin :	CNRS
20 septembre 2020 – après-midi :	Orano
17 octobre 2018 :	Audition restreinte Andra & CEA sur le thème : « gestion des déchets bitumineux »
05 décembre 2019 :	Administrateur général du CEA



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

### *AEN*

IRACANE Daniel  
PAILLÈRE Henri

### *ANDRA*

ABADIE Pierre-Marie  
ARMAND Gilles  
BAUER Corinne  
BÉRARD Émilie  
BOSGIRAUD Jean-Michel  
BUMBIELER Frédéric  
CALSYN Laurent  
CAMPS Guillaume  
CRUSSET Didier  
DOUHARD Séverine  
DJIZANNE Hippolyte  
GÉRARD Fanny  
HONORÉ Delphine  
HOORELBEKE Jean-Michel  
KRIEGER Jean-Marie  
LASSABATÈRE Thierry  
LANE Eric  
LAUNEAU Frédéric  
LE FAILLER Nathalie  
LEMAITRE-XAVIER Elsa  
LEVERD Pascal  
MAZOYER David  
NORTURE Anne  
PASTEAU Antoine  
PASQUIER Cécile  
PÉPIN Guillaume  
PLAS Frédéric  
POIROT Nicolas  
POISSON Richard  
QUENTEL Julie  
RABARDY Myriam  
ROBINET Jean-Charles  
SEYEDI Darius  
SCHUMACHER Stephan  
TALANDIER Jean  
THABET Soraya  
TORRES Patrice  
VINSOT Agnès  
VITEL Manon  
VOINIS Sylvie  
VU Minh Ngoc  
WENDLING Jacques  
YVEN Béatrice

ZGHONDI Jad

### *ARIANE GROUP*

CLAR Philippe

### *A3I*

VIAND Alain

### *CEA*

ABONNEAU Eric  
ADVOCAT Thierry  
BÉCHADE Jean-Luc  
BERTOLUS Marjorie  
BERTRAND Murielle  
BOURG Stéphane  
BLANC-TRANCHANT Patrick  
BOUCHET Bertrand  
BRIEULLE Pascale  
CAPDEVILA Jean-Marc  
CAVATA Christian  
CHABERT Christine  
CHAIX Pascal  
CHAPELOT Philippe  
DELAYE Jean-Marc  
DEVICTOR Nicolas  
DUBUISSON Philippe  
FERRY Cécile  
FIRON Muriel  
FRIZON Fabien  
GALLAIS-DURING Annelise  
GALLO Danielle  
GORBATCHEV Alexandre  
GUILBAUD Philippe  
HANUS Éric  
JACQ François  
GORGUE Vincent  
JOURDA Paul  
JÉGOU Christophe  
LAZAR-SURY Anne  
LORRETTE Christophe  
MASKROT Hicham  
MAZAUDIER Fabrice  
MIGUIRDITCHIAN Manuel  
MOUTIER Gilles  
PEUGET Sylvain  
PUSSIEUX Thierry

### *CEA (suite)*

RIBIS Joël  
SARRADE Stéphane  
SAUDER Cédric  
SOREL Christian  
SORNIN Denis  
STOHR Philippe  
TOURON Emmanuel  
TRIBET Magaly

### *CNRS - IN2P3*

BILLEBAUD Annick  
DAVID Sylvain  
DOLIGEZ Xavier  
PETIT Antoin  
SCHUHL Alain  
SUZUKI Tomo

### *EDF*

BENOIT Géraldine  
BUTTIN Jérémy  
GIRAUD Olivier  
ISNARD Luc  
LAUGIER Frédéric  
PAYS Michel  
ROBERT-MOUGIN Denis

SABATIER Alain  
QUINNEZ Bruno

### *ORANO*

AUGÉ Morgane  
BARTAGNON Olivier  
GAGNER Laurent  
JACQ Patrick  
LAMOUROUX Christine  
LEBRUN Marc  
PALOMAR Loïc  
ROMARY Jean-Michel  
SEMENTZ Gérald  
ZILBER Marine

### *Préfecture de la Meuse et Haute-Marne*

LERAITRE Philippe  
MASSON Jean  
VARNUSSEON Mélanie

### *SOLEIL*

SOLARI Pier Lorenzo

## ANNEXE VI : LISTE DES DOCUMENTS TRANSMIS A LA COMMISSION EN 2018-2019

### ANDRA

- Rapport d'activités scientifiques et techniques – 2017.
  
- Les déchets radioactifs immergés – Dossier thématique de l'Inventaire national des matières et déchets radioactifs – 2018.
  
- Inventaire national des matières et déchets radioactifs – 2018.
  
- Inventaire national des matières et déchets radioactifs- Les Essentiels – 2018.
  
- Inventaire national des matières et déchets radioactifs- Les Essentiels – 2019.

61

### CEA

- Rapport annuel – Le CEA au cœur des grands défis du futur – 2017.

### IRSN

- Dossier « impact cycle 2016 ».



## ANNEXE VII : POINTS SPÉCIFIQUES RELATIFS AU PROJET CIGÉO

### VII.1 LES AVANCÉES EN VUE DU DÉPÔT DE LA DAC DE CIGÉO

Les récentes avancées dans la configuration de Cigéo ont été obtenues dans l'objectif de répondre aux avis exprimés lors de l'instruction du DOS.

L'instruction du DOS par l'ASN/IRSN et son analyse par la Commission ont amené à la production de demandes par les évaluateurs et d'engagements de l'Andra portant notamment sur les trois points suivants :

- la justification des propriétés favorables du COx du point de vue des caractéristiques géométriques des constituants du stockage et du comportement thermo-hydro-mécanique (THM) de la roche;
- la justification des choix de conception portant sur les éléments d'architecture du stockage ;
- la justification de la faisabilité technologique des composants du stockage (alvéoles HA et MAVL).

#### *Consolidation des caractéristiques géométriques du Callovo-Oxfordien et de l'Oxfordien carbonaté*

Lors de l'instruction du DOS, l'Andra s'est engagée sur plusieurs axes.

- Améliorer la connaissance de la géométrie de la flexure présumée affectant les couches géologiques au nord de la Zira, pouvant avoir une influence sur la profondeur et l'épaisseur du COx. L'Andra a pour cela retraité les données de sismique 3D en affinant la correction statique. Les nouveaux résultats ne confirment pas la présence de la flexure au sein du COx qui reste cependant visible dans les formations triasiques sous-jacentes. La géométrie du COx, notamment son pendage, ne serait donc pas influencée par cette particularité structurale. L'Andra procédera par ailleurs à une nouvelle campagne de forages fin 2019 pour permettre un calage direct du bloc sismique 3D.
- Améliorer la représentation des horizons poreux de l'Oxfordien dans le modèle hydrogéologique. Cet ajustement conduit à des résultats globalement identiques à ceux présentés dans le DOS. Une confrontation du modèle avec des nouvelles données de charge hydraulique sera possible après la prochaine campagne de forage.

#### *Caractérisation et modélisation THM*

Le dimensionnement thermique des alvéoles et quartiers de stockage des déchets HA exothermiques a pour but de préserver les propriétés favorables de confinement du COx en faisant en sorte que la température du milieu environnant les déchets reste dans le domaine des comportements connus et que la roche ne se fracture pas sous l'effet des surpressions de fluides. Les remarques faites par les évaluateurs postérieurement au DOS valident la modélisation hydrothermo-mécanique adoptée par l'Andra mais recommandent de réduire les incertitudes à l'échelle de la Zira des paramètres clés tels que la perméabilité et la rigidité du COx et de consolider le caractère enveloppe du critère de rupture. L'Andra a pour cela conçu des expériences de laboratoire complémentaires destinées à consolider les résultats acquis sur éprouvette et met actuellement en place une expérience dans le laboratoire souterrain sur une maquette d'alvéole

HA visant à reproduire l'évolution THM de quelques mètres cubes de roche jusqu'à provoquer intentionnellement la fracturation. Les résultats seront disponibles pour la DAC.

L'Andra procède en parallèle à une amélioration des modèles THM en comparant différentes approches telles que le modèle thermo-poro-élasto-endommageable, le modèle thermo-poro-visco-élastique et en développant des outils capables de simuler les conséquences d'une fracturation. La conclusion actuelle est que le modèle thermo-poro-élastique est enveloppe des phénomènes redoutés. Des intercomparaisons de codes sont pratiquées au niveau international dans le cadre de l'exercice DECOVALEX 2019. Enfin, l'Andra a procédé à des tests de sensibilité de la réponse THM du milieu à l'échelle du CO<sub>x</sub>, qui confirment que les paramètres dominants sont la perméabilité et la rigidité (module d'Young) du CO<sub>x</sub> et que le raffinement du découpage des paramètres sur la verticale du CO<sub>x</sub> a peu d'influence.

### *Architecture du stockage*

Au niveau d'avancement du DOS, l'Andra avait conçu l'architecture du stockage au sein de la Zira en privilégiant les options de configuration suivantes :

- un regroupement au fond des bases des liaisons surface-fond pour limiter les gradients hydrauliques au sein de l'ouvrage ;
- un agencement suivant un mode borgne des quartiers de stockage ;
- un stockage plan pour maximiser en tout point la garde argileuse ;
- des alvéoles longs de façon à limiter les effets de bord et favoriser ainsi le transfert diffusif vertical par le CO<sub>x</sub> ;
- des scellements performants des liaisons surface-fond.

64

Afin de confirmer la pertinence de ses choix pour la DAC, l'Andra s'est engagée à procéder à une analyse des avantages et inconvénients de différentes autres options.

### *La faisabilité technologique des alvéoles HA et leur comportement (corrosion, mécanique, hydraulique, gaz)*

Concernant les alvéoles HA, les recommandations à l'issue du DOS étaient que l'Andra présente pour la DAC une conception d'alvéoles basée sur des connaissances obtenues par des essais en vraie grandeur en laboratoire souterrain et les éléments techniques pour maîtriser le risque hydrogène et surveiller l'atmosphère à l'intérieur des alvéoles.

Pour le DOS, l'Andra avait démontré, en s'appuyant sur la compréhension de la mécanique du CO<sub>x</sub>, sa capacité à réaliser des alvéoles d'au moins 100 m de longueur orientés suivant la contrainte principale horizontale majeure. La méthode de construction actuelle prévoit la mise en place à l'avancement d'un chemisage constitué d'un assemblage semi-rigide d'éléments en acier. L'utilisation d'un matériau de remplissage à l'extrados du chemisage, pour limiter les vides et réduire les phénomènes de corrosion de l'acier, a par la suite nécessité une évolution du concept afin d'assurer un meilleur centrage du chemisage en vue d'obtenir une répartition homogène du remplissage. L'Andra a ainsi démontré la faisabilité technique pour un alvéole de 112 m réalisé selon le séquençement : creusement du trou nu, mise en place du chemisage, remplissage de l'annulaire. L'Andra doit à présent démontrer pour la DAC que la technique ainsi mise au point permet de réaliser des alvéoles de 150 m de longueur prévus pour les quartiers HA1/2 dans la configuration de référence.

En parallèle de l'étude de la faisabilité technologique des alvéoles, l'Andra prépare un programme de mesure et de surveillance de leur comportement thermo-hydro-mécanique et chimique (THMC). Ce programme qui doit produire des premiers résultats avant la DAC concerne :

- l'instrumentation externe du chemisage en fibres optiques pour suivre son comportement thermo-mécanique ;
- la qualification de capteurs pour le suivi des paramètres chimiques (gaz, corrosion, prélèvements) au sein de l'alvéole ;
- la validation d'un procédé d'inertage de l'atmosphère.

Il est prévu de tester ces équipements après le dépôt de la DAC sur un banc d'essai en surface et sur un alvéole témoin représentatif du concept HA0, en laboratoire souterrain.

### *Galeries et alvéoles MAVL (faisabilité, tenue mécanique)*

Pour le DOS, l'Andra avait acquis une large expérience en laboratoire souterrain pour le creusement de galeries de grands diamètres (jusqu'à 9 m) selon différentes méthodes (machine à attaque ponctuelle ou tunnelier) et comportant différents modes de soutènement/revêtement. L'usage de différentes méthodes de creusement est en effet requis pour s'adapter aux différentes géométries du tracé des galeries souterraines. Les études avaient montré la possibilité de construire des ouvrages orientés suivant la contrainte principale horizontale majeure ou mineure, cette dernière configuration offrant des conditions plus difficiles de réalisation. Elles avaient également montré l'intérêt d'intégrer au soutènement des éléments compressibles pour limiter le chargement sur les ouvrages, engendré par la convergence du massif rocheux, quelle que soit la méthode de creusement. L'Andra doit à présent pour la DAC consolider les méthodes jusqu'à une qualification industrielle, notamment pour ce qui concerne la pose des matériaux compressibles. Après le dépôt de la DAC, l'Andra prévoit en laboratoire souterrain la construction d'un démonstrateur d'alvéole MAVL d'environ 9,65 m de diamètre utile par la méthode traditionnelle utilisant une machine à attaque ponctuelle. Les dimensions du laboratoire souterrain ne permettent en effet pas de mettre en œuvre un tunnelier d'un diamètre suffisant. L'Andra étudiera également le comportement particulier des carrefours de galeries.

Ce programme technologique s'accompagne d'un programme scientifique qui depuis le DOS a visé à améliorer la compréhension du comportement mécanique de la roche en liaison avec la méthode de creusement et celle du rôle de la zone endommagée (EDZ). Les principaux résultats nouvellement acquis concernent :

- l'absence d'effet d'échelle sur la nature de la fracturation de la zone endommagée et sur la vitesse de déformation des ouvrages entre les galeries de 5 m et celles de 9 m de diamètre ;
- la constatation de l'auto-colmatage des fractures sous l'effet de l'hydratation dans l'unité argileuse (UA) du COx. Ce phénomène est toutefois moins marqué ou n'apparaît pas dans l'unité silto-carbonatée (USC) située au sommet du COx.

## **VII.2 LA MAÎTRISE DE L'HYDROGÈNE DANS CIGEO**

### *La maîtrise de l'hydrogène pendant l'exploitation*

L'identification des sources d'hydrogène dans Cigéo permet de prendre des mesures de prévention contre les risques ATEX (ATmosphères EXplosives).

#### **Équipements**

Les batteries de certains équipements constituent des sources ponctuelles d'hydrogène. La gestion du risque associé fait partie des dispositions classiques dans l'industrie. Elle repose sur un zonage du risque ATEX, la mise en place de locaux dédiés protégés et équipés de détecteurs pour la recharge des batteries et l'utilisation de soupapes de sécurité.

## **Quartiers MAVL**

La radiolyse dans certains déchets MA-VL contenant des matières hydrogénées est également génératrice d'hydrogène. Le nombre important de colis dans une zone confinée impose de prendre en compte le risque ATEX.

Les émissions d'hydrogène font l'objet d'une spécification d'acceptation aux producteurs, avec une limite à 40 L H<sub>2</sub>/colis/an pour la majorité des colis, et jusqu'à 120 ou 300 L H<sub>2</sub>/colis/an pour un nombre limité de colis qui feront l'objet d'un traitement spécifique.

La résistance des conteneurs a été testée au laboratoire. Le relâchement au long terme d'H<sub>2</sub> est simulé par l'injection directe d'He sur différents types de conteneurs (vissé ou clavé). La mesure des flux de gaz en surface et de la pression en interne est effectuée. Les tests ont démontré que les propriétés des conteneurs permettent à l'essentiel de l'H<sub>2</sub> injecté de s'évacuer sans montée en pression. La surpression est négligeable (inférieure à 0,004 bar avec un débit équivalent poussé à 90 000 L H<sub>2</sub>/colis/an), ce qui exclut tout endommagement des colis. Lors de ces essais, la composition équivalente dans le colis reste très en dessous du seuil de risque ATEX : 0,06 % de la limite inférieure d'explosivité pour les colis vissés à 100 L/an, 11 % pour les colis clavés.

Des essais ont également été menés pour tester la résistance à l'endommagement des conteneurs dans le cas d'une explosion interne. Pour cela, un mélange air/H<sub>2</sub> a été injecté artificiellement dans un conteneur, afin de créer les conditions de réactivité maximale. Avec les caractéristiques de l'hydrogène, l'énergie libérée reste faible : la température interne monte à 260°C, puis redescend très rapidement (50°C à 1 minute, température initiale à 30 minutes), la surpression est limitée (5 bar, et retour à l'initial en 3 secondes). Les gaz libérés (vapeur d'eau) se dissipent par l'interface conteneur-couvercle et condensent. Après l'essai, le passage des gaz a décollé le liant entre le corps du conteneur et son couvercle ; cependant, corps et couvercle gardent leur intégrité, ce qui permet d'envisager un traitement normal en manutention pour la reprise.

66

Le stockage est conçu pour évacuer les gaz. Un dispositif spécifique est prévu pour éliminer les gaz produits en cas d'immobilisation dans les hottes de manutention. Dans l'alvéole MAVL, les gaz sont évacués par la ventilation. Des calculs d'aéraulique montrent l'absence de point d'accumulation locale entre les conteneurs : le dimensionnement des débits est bien au-delà des besoins, avec une marge de sécurité de trois ordres de grandeurs vis-à-vis du risque ATEX (teneur en H<sub>2</sub> < 0,003 % pour une limite inférieure d'explosivité (LIE) de 4 %)

La résilience de la ventilation a fait l'objet de soins particuliers : redondance (des ventilateurs de soufflage et d'extraction), ségrégation de ces équipements, dimensionnement pour la résistance au séisme, alimentation électrique de secours. Enfin, en cas de défaillance, le dimensionnement de la ventilation naturelle et la répartition des colis en fonction de leurs émissions assurent un maintien sur 100 jours en dessous du risque ATEX (75 % de la limite inférieure d'explosivité). Ce délai doit permettre une intervention pour rétablir la ventilation avant d'atteindre la zone de risque.

## **Quartiers HA**

Pour les alvéoles HA, la corrosion des aciers de chemisage et des conteneurs en conditions anoxiques produit de l'hydrogène. Ces conditions sont remplies après fermeture de l'alvéole qui se trouve isolé de l'atmosphère des galeries et après consommation de l'oxygène résiduel par les réactions d'oxydation en champ proche. L'hydrogène produit dans ces conditions, en l'absence d'oxygène, ne conduit pas à des risques ATEX spécifiques. Le risque apparaît en cas de mélange avec l'oxygène en provenance des galeries, lorsque la concentration du gaz dépasse 4.5 % en oxygène. Ceci peut se produire de manière ponctuelle en cas d'ouverture des alvéoles pour récupérer des colis, ou de manière diffuse par migration des gaz entre alvéole et galerie à travers les dispositifs de fermeture ou l'EDZ.

Pour faire face à ce risque, l'Andra s'appuie d'abord sur des dispositions constructives passives. L'injection d'un matériau de remplissage de l'annulaire diminue les volumes de vide disponibles pour l'accumulation de gaz. L'étanchéité de la tête d'alvéole est renforcée par la pose d'une membrane d'étanchéité autour du massif d'accostage. Enfin, la diffusion à travers la roche entre

l'alvéole et la galerie est limitée par l'injection de matériau colmatant dans la roche à proximité de la tête d'alvéole.

L'Andra étudie actuellement une évolution de conception des alvéoles HA avec des dispositifs actifs destinés à assurer une teneur en oxygène inférieure à 1 % dans l'alvéole. Le dispositif repose d'une part sur des sondes de prélèvement de gaz derrière la tête d'alvéole, d'autre part sur le balayage à l'azote de l'alvéole. Il s'agit d'une évolution significative : le chemisage intégrerait ainsi en partie supérieure un guide pour plusieurs tubages destinés à injecter l'azote en fond d'alvéole, et permettre un retour du gaz prélevé en différents points. L'azote nécessaire pour le balayage serait produit dans une unité spécialisée probablement installée dans Cigéo. La conception complète du dispositif, de sa mise en œuvre et de l'instrumentation associée, en APD sera prête pour le dépôt de la DAC. Des tests sont prévus après le dépôt de DAC, au laboratoire souterrain pour étudier la faisabilité et sur banc d'essai en surface pour l'ensemble du dispositif.

### *La maîtrise de l'hydrogène après l'exploitation*

L'estimation des termes sources après exploitation sur l'ensemble du stockage constitue la base de la maîtrise de l'hydrogène. Elle repose sur la comptabilité des termes sources (types de colis) et la connaissance de processus bien identifiés (corrosion anoxique et radiolyse). Les termes sources peuvent alors être transformés en chroniques de production d'hydrogène afin d'alimenter les simulations numériques de transfert de l'hydrogène.

Les calculs THM intègrent ainsi la production de l'hydrogène en fonction de l'âge des colis, de l'avancement des phases de resaturation. Les calculs peuvent quantifier les différents flux autour du stockage. Ils montrent que la diffusion vers le COx est le principal mode de migration de l'hydrogène. Par ailleurs, l'impact de la production d'hydrogène sur les pressions et les contraintes est quantifié. Il est pris en compte dans les calculs de dimensionnement de l'ouvrage.

Les calculs en cours visent à réduire les incertitudes. Elles proviennent d'une part de choix de conception à finaliser (notamment masse d'acier, et surface développée), d'autre part de processus (cinétiques de corrosion pour la production de gaz, réactions chimiques avec le COx pour sa consommation).

## **VII.3 LES RETOMBÉES RÉGIONALES DE CIGÉO**

La création du laboratoire souterrain de Meuse-Haute Marne a nécessité, indépendamment de la qualité du sous-sol, que des collectivités territoriales se portent volontaires pour accueillir cet ouvrage. En effet, le législateur a, dès la Loi du 15 juillet 1982 d'orientation et de programmation pour la recherche et le développement technologique, envisagé des mesures d'accompagnement et proposé la création d'un groupement d'intérêt public (GIP) pour les mettre en œuvre. La Loi du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs rappelle, dans son article 12, la possibilité de créer un GIP, en vue de mener des actions d'accompagnement et de gérer des équipements de nature à favoriser et à faciliter l'installation de chaque laboratoire.

Les GIP « Objectif Meuse » et « Haute-Marne » ont ainsi été créés respectivement par arrêtés interministériels les 20 mai et 16 août 2000. Ils ont été renouvelés par arrêtés interministériels le 9 mai 2007 (modifié le 29 juin 2007 pour le GIP « Haute Marne » pour corriger une erreur matérielle sur le nom des communes) pour tenir compte des modifications apportées par la Loi du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs.

Les deux GIP sont chargés de la mise en œuvre des mesures d'accompagnement du laboratoire souterrain de recherche de l'Andra et du projet Cigéo.

Ils ont pour vocation de :

- gérer des équipements de nature à favoriser et à faciliter l'installation et l'exploitation du laboratoire ou d'un éventuel centre de stockage ;
- mener, dans les limites des deux départements concernés, des actions d'aménagement du territoire et de développement économique ;
- soutenir des actions de formation ainsi que des actions en faveur du développement, de la valorisation et de la diffusion de connaissances scientifiques et technologiques.

Ils bénéficient, pour ce faire, d'une part de la taxe additionnelle sur les installations nucléaires de base qui se décompose entre une dotation de diffusion technologique et une dotation d'accompagnement. Leur action recouvre respectivement l'ensemble des départements de la Meuse et de la Haute-Marne, mais certains territoires, proches du laboratoire souterrain de Bure, sont également habilités à bénéficier d'un appui particulier ; ils correspondent à la zone de proximité.

En 2018, le financement accordé par le GIP « Objectif Meuse » était de 30 millions d'euros environ. Une attention particulière était portée à la zone de proximité qui bénéficiait de 84 % des aides.

En 2018, le financement accordé par le GIP « Haute-Marne » était de 29 millions d'euros environ. Depuis la création de ce GIP, la quasi-totalité du financement est distribué sous forme de subventions, c'est-à-dire d'aides financières ne requérant pas de retour : environ 1/3 est affecté aux entreprises et à l'innovation, un autre 1/3 aux équipements et services à la population et 1/5 aux réseaux (accès routiers, eau et assainissement, numérique...). En 2018, 63 % des financements mis en place étaient destinés à la zone de proximité qui représente 41 % de la population du département de la Haute-Marne.

Il est difficile d'apprécier l'influence de ces financements sur le tissu économique de ces deux départements. Les chiffres manquent pour estimer les retours sur investissement ou encore le nombre d'emplois créés ou préservés. En parallèle des actions menées par les GIP, EDF, le CEA et Orano œuvrent également en faveur du développement économique local en créant des installations ou en aidant les entreprises locales à se spécialiser pour mieux répondre aux demandes des exploitants nucléaires. Des chiffres fournis par l'Andra font état de 1773 emplois créés ou soutenus entre 2006 et 2014 grâce à ces différentes actions. Cette activité devrait s'amplifier significativement lors du passage à la phase de construction, avec des créations d'emplois directs et indirects.

Les principes d'accompagnement économique du territoire par l'Andra sont aujourd'hui structurés pas la présence du laboratoire souterrain. En cohérence avec les leviers déjà mentionnés, ils reposent sur un ancrage local de ses activités : politique d'achat local, accueil des démonstrateurs sur le territoire (par exemple démonstrateur de la descenderie implanté par POMA à Froncles en Haute-Marne). Une politique d'accompagnement des initiatives locales est également mise en œuvre par l'Andra et les producteurs. Le CEA accompagne et structure l'accueil d'activités technologiques et industrielles innovantes dans la zone de proximité, avec la création du Parc'Innov de Bure-Saudron.

Un diagnostic pour la gestion prévisionnelle de l'emploi et des compétences territoriales a été mené avec tous les acteurs concernés, en particulier en lien avec les besoins et opportunités générés par Cigéo. L'Andra contribue à la formation, avec l'apprentissage et la formation continue, et des partenariats avec les lycées professionnels de la région.

## ANNEXE VIII : ÉTUDES ET R&D DANS LE CONTEXTE DE LA STRATÉGIE ÉLECTRONUCLÉAIRE ACTUELLE

Les études et la R&D conduites par le CEA, EDF, Orano et le CNRS qui ont été présentées cette année à la Commission ont été conduites avec divers objectifs, mais pour une grande partie elles l'ont été dans le cadre du programme Astrid. La Commission les évalue toutes, et souligne que les recherches conduites pour la GenIV ont aussi des retombées pour le parc actuel. Ces études bénéficient de la recherche fondamentale ; il convient donc de la maintenir au plus haut niveau.

### ASTRID ET LES PROGRAMMES GEN IV ASSOCIÉS

Le déploiement d'un parc de RNR n'est désormais envisagé qu'à la fin de ce siècle. En conséquence, le programme Astrid a été fortement réduit. Le CEA a présenté à la Commission un bilan du programme Astrid. Le bilan définitif « Dossier de fin de convention » est attendu pour fin 2019. Par ailleurs la Loi TECV va conduire à la réduction du nombre de réacteurs du parc actuel et à des modifications de leur gestion. C'est dans ce contexte que la commission évalue les recherches.

#### *Scénarios*

La Commission a fait état dans ses précédents rapports des études de scénarios de transition du parc actuel vers un parc de RNR. Les exercices scénarios reposent sur des codes de calculs pouvant être activés pour éclairer différentes voies stratégiques du cycle et tester la sensibilité des résultats aux hypothèses : puissance du parc, durée de vie des réacteurs, disponibilité des installations du cycle. L'article 51 du décret PNGMDR du 23 février 2017 (PNGMDR 2016-2018) a demandé aux producteurs de déchets (CEA, EDF, Framatome, Orano) de compléter les études précédentes (inventaires en Pu, U, AM aux diverses étapes du scénario, contraintes industrielles, renouvellement des installations du cycle), et de préciser, avec l'Andra, dans chaque option, les impacts sur la gestion des déchets destinés au stockage profond. L'étude montre que le multi-recyclage en REP conduit à une accumulation d'actinides mineurs dans le cycle et, in fine, à une plus grande emprise dans Cigéo.

Le CNRS étudie des scénarios de gestion d'évolution du parc électronucléaire suivant une méthodologie différente de celle du CEA. Elle consiste à optimiser l'atteinte d'un objectif en jouant sur les possibilités offertes par un parc, par exemple parc de REP ou parc mixte REP/RNR. La méthode examine une quasi infinité de trajectoires définies par des jeux d'hypothèses pour déduire le ou les scénarios conduisant à l'objectif. Les hypothèses des trajectoires changent tant que l'objectif n'est pas atteint. Le code CLASS du CNRS permet d'explorer de nombreuses trajectoires mais consomme beaucoup d'heures de calcul. Par exemple pour stabiliser la quantité de Pu en cycle dans un parc de REP ou REP/RNR dont la puissance diminue l'analyse de 10 000 trajectoires permet de définir les proportions de réacteurs REP mixés ou le nombre de RNR par rapport aux REP et de quantifier d'autres caractéristiques du mix proposé.

#### *Assemblage de combustible RNR*

L'assemblage de combustible MOx est l'objet élémentaire du cœur d'un RNR. C'est un objet complexe. Le CEA, EDF et Orano étudient depuis 10 ans la fabrication d'un assemblage de combustible pour le réacteur Astrid. La Commission a analysé les progrès continus et innovants du CEA sur l'élaboration de l'oxyde mixte, la fabrication des pastilles, leur gainage et la mise en œuvre en tube hexagonal des aiguilles. L'objectif du CEA était de maîtriser tous les paramètres de la fabrication du combustible : prédire les caractéristiques de l'oxyde mixte (microstructure, granulométrie, coulabilité, ...), des pastilles (densité, ...), des gaines et du tube hexagonal et développer les outils utilisés pour leur fabrication industrielle. Le CEA disposera alors d'un outil de calcul scientifique complet.

## *Matériaux pour les réacteurs de Gen IV*

Le CEA a présenté à la Commission un bilan de la R&D sur les matériaux de gainage des combustibles et de structure des RNR Gen IV, refroidi au sodium (SFR) ou au gaz (GFR et VHTR). Ces matériaux doivent résister 1) à des hautes températures en service normal : 350-550 °C pour SFR, 600-1200 °C pour GFR et 400-1100 °C pour VHTR, mais aussi en situations incidentelles ou accidentelles à des températures atteignant jusqu'à 2000 °C 2) à des irradiations jusqu'à 150 dpa, 3) à des pressions du caloporteur de 70 bars pour GFR et VHTR.

Pour les SFR type Astrid, les phénomènes redoutés sont le fluage thermique du tube hexagonal et des gaines en acier inoxydable. Il se traduit par des déformations irréversibles. Il est connu depuis quelques années que les aciers type Fe-C-Cr-W-Ti dans lesquels on fait précipiter des nanoparticules de  $Y_2Ti_2O_7$  ne présentent pas ce phénomène au moins jusqu'à 160 dpa (aciers ODS). Les oxydes bloquent les mouvements des dislocations. Le CEA a déjà l'expérience de la fabrication au laboratoire des aciers ODS à 9 et 14 % de Cr et des gaines pour RNR (tubes de 0,5 mm d'épaisseur, 1 cm de diamètre et de 2,5 m de long). Leur caractérisation microscopique et macroscopique montre que des échantillons irradiés à haute température ont une bonne résistance mécanique. Elle est due au comportement du chrome aux joints de grains. Compte tenu de la réorientation du projet Astrid ce programme n'est plus prioritaire.

Le carbure de silicium SiC est le matériau connu pour être le plus performant aux hautes températures (1000 à 2000°C) et sous rayonnements, en termes de résistance à l'oxydation et de résistance thermique mais il est fragile comme toute céramique et il subit une perte de conductivité en fonction de la température. Son emploi dans le nucléaire nécessite de l'utiliser sous forme composite, par exemple des fibres de SiC enrobées d'une matrice SiC ou SiC fibre-métal. La fabrication des objets nécessite le tressage de SiC-fibre autour d'un tube de Ta pour réaliser des gaines. La résistance mécanique et la tenue à l'irradiation par les neutrons (120 dpa) ou encore l'étanchéité (à l'aide d'un liner métallique) à l'hélium sous pression et aux produits de fission volatils doivent être appréhendées et modélisées. De même, l'étude de l'oxydation de SiC par  $O_2$  ou  $H_2O$  vapeur (ou encore celle de son comportement vis à vis du sodium et du combustible) doit être complétée. Le CEA participe à un programme de recherche européen Matisse dédié à toutes ces recherches et il prévoit une collaboration avec les USA (ORNL).

70

## *Recyclage du Pu et S&T*

On sait que le procédé Purex doit être adapté pour séparer U et Pu des combustibles riches en Pu comme le MOx REP ou les MOx RNR usés. Le CEA met au point depuis 2013 un nouveau procédé fondé sur l'extraction de U (VI) et Pu (IV) par un monoamide dans une phase organique et leur dés extraction en phase aqueuse en un cycle par une simple modification de la teneur en acide nitrique. En 2017, le CEA a déposé un brevet pour la séparation Pu et U d'une solution nitrique simulée de combustible UOx usé (mise en jeu d'un mélange de 2 monoamides) et un autre brevet ne faisant intervenir qu'une seul monoamide. En 2018, le CEA a mené un essai pilote sur une solution simulée de MOx REP (Pu/ (U + Pu) = 10 % avec ce procédé et a sélectionné 5 nouvelles molécules alliant une bonne viscosité, un bon facteur de charge de U + Pu et une bonne sélectivité. Le CEA perfectionne également les mélangeurs décanteurs et les colonnes pulsées.

Comme pour les autres expériences, les procédés sont modélisés. L'ambition du CEA est d'établir la faisabilité technique puis l'extrapolation au niveau industriel.

C'est l'initiative Gen IV qui a relancé la R&D dans le domaine de la séparation de U, Pu, des actinides mineurs et des produits de fission à partir d'un combustible UOx/MOx usé. La première étape concerne le recyclage de Pu et U, qui n'a atteint le niveau industriel que pour le combustible UOx REP. La seconde concerne la séparation des actinides mineurs au niveau du laboratoire. La France, les USA et le Japon ont développé des procédés différents et, dans le cadre de l'Europe, plusieurs pays ont participé à des programmes du 7ème PCRD, dont Sacsess. En Europe, tous les procédés ont finalement convergé sous l'impulsion française vers l'hydrométallurgie. L'utilisation de molécules extractantes type mono-amides ou di-amides associées à d'autres molécules complexantes permet de séparer et d'atteindre les facteurs de

décontamination recherchés. L'OCDE vient de publier un état de l'art sur les connaissances en la matière.

Au niveau mondial, comme en France, les études sur les actinides mineurs sont en baisse. Seules des collaborations permettent de maintenir un minimum d'études qui se focalisent sur la séparation de l'américium. C'est pourquoi l'Europe vient de lancer le programme Geniors-H2020 (2017-2021) : 24 partenaires et 11 pays avec la collaboration du DOE des USA avec un budget de 7,5 Meuros sur 5 ans. L'objectif est de revisiter les procédés déjà étudiés, mais au niveau du laboratoire. Il n'y a pas d'essais prévus sur des solutions réelles.

L'activité du CEA au niveau de la transmutation consiste à examiner des échantillons de couvertures chargées en américium (oxydes U/Am/O) irradiés un an dans le HFR entre 2011 et 2012 (expérience analytique Marios, 4 mini-aiguilles et 6 disques différant par leur porosité). Marios permet d'obtenir les taux de transmutation et de fission et de caractériser le comportement de l'hélium en fonction de la microstructure (porosité, ...) et de la température. D'autres échantillons ont été irradiés (expérience analytique Diamino dans Osiris), expériences semi-intégrales Marine et Sphère.

Les premiers examens montrent qu'il est préférable que l'oxyde U/Am/O soit à porosité ouverte pour éviter le gonflement. Les valeurs théoriques et mesurées des taux de transmutation sont en excellent accord.

Onze pays européens ont soumis à l'Union Européenne le programme Transmeets pour poursuivre les examens des échantillons irradiés par le CEA et améliorer/développer des codes pour la conception et la qualification de combustibles de transmutation sur la base de tous les résultats des programmes antérieurs. Transmeets s'inscrit dans la plateforme SNETP et a le label EERA-JPNM. La décision de lancer Transmeets est attendue pour fin 2019.

## R&D EN SOUTIEN AU CYCLE ACTUEL

71

### *La Hague*

L'atelier TCP (Traitement des Combustibles Particuliers) en construction à La Hague en amont de UP2 800 vise à augmenter la capacité de l'usine à retraiter du combustible civil et militaire MOx, riche en Pu, ou bien des assemblages de réacteurs expérimentaux. Il devrait être opérationnel en 2026. Ses fonctions sont de cisailer les assemblages et de dissoudre le combustible (750 tMLi sur 30 ans). S'agissant de la dissolution des insolubles de Pu(IV), le CEA étudie en détails un procédé par oxydation à  $Ag^{2+}$  produit in situ dans l'acide nitrique.

### *Fabrication des assemblages de combustible UOx et MOx*

Le CEA, EDF et Framatome sont très engagés dans le développement de gainages innovants (gaines revêtues de chrome ou utilisant des matériaux céramiques) pour les combustibles UOx et MOx des REP. Ces gaines renforceraient la sûreté en situation accidentelle. Le CEA a une installation pilote qui produit ces gaines : tissage autour d'un tube en Ta de SiC-fibre (infiltré ensuite par dépôt vapeur de SiC), revêtement interne du même matériau sur Ta (Programme sur combustible dit E-ATF). Le tube en Ta assure l'étanchéité, le tissage la protection mécanique et chimique externe, et le revêtement interne de SiC la protection chimique vis-à-vis du combustible. Les développements en cours sont nombreux

Il existe des programmes européens lancés dans le cadre de l'initiative H2020 sur le sujet incluant des irradiations en réacteurs d'échantillons voire de crayons chargés en combustible. Le CEA estime être au niveau 4 à 5 sur l'échelle TRL.

Par ailleurs, le CEA développe des procédés innovants de fabrication additive (FA) pour réaliser différentes pièces métalliques complexes de réacteurs, de plus ou moins grandes dimensions (plateforme Samanta à Saclay). Les épaisseurs ajoutées successivement par fusion vont de 15 microns à 15 mm selon les appareils. La R&D qui accompagne ces réalisations concerne

l'optimisation et la maîtrise des paramètres (taille des grains de poudre, vitesse des dépôts, contrôle qualité, ...) qui conditionnent la microstructure du métal et sa tenue à l'irradiation.

## Verre nucléaire

La caractérisation physico-chimique temporelle des verres nucléaires et l'étude de leur comportement en présence de solutions aqueuses variées (au laboratoire ou in situ) a conduit à un solide corpus de connaissances dont il a été tenu compte dans les analyses de sûreté en vue de leur stockage géologique. Pour autant, les mécanismes fondamentaux des phénomènes de radiolyse ne sont pas tous connus. Les verres nucléaires sont soumis à des débits de doses considérables et intégreront des doses non moins considérables avant d'être lixiviés. Il faut connaître la dose cumulée maximum pour laquelle les verres vieillissent conserveront les propriétés sur lesquelles s'appuie la modélisation à long terme de leur comportement. Jusqu'à aujourd'hui, aucune mesure n'a été faite sur un verre industriel.

Le CEA a présenté un état de l'art sur l'auto-radiolyse d'échantillons de verres nucléaires fondé sur des expériences récentes (2014-2018) et sur les résultats de plus de 20 ans de recherche sur le verre R7T7.

L'auto-irradiation des verres par les rayonnements beta et gamma modifie les interactions électroniques, les rayonnements alpha quant à eux produisent de l'hélium et des noyaux de recul qui créent des lacunes. Les effets séparés des débits de dose électroniques et nucléaires sur les propriétés des verres (structure et réactivité) n'ont jamais été quantifiés.

Le CEA a présenté une série de résultats issus d'expériences avec des verres dopés ( $^{239}, ^{238}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ ), irradiés avec des faisceaux d'électrons ou d'ions (He, Au, Kr) ou avec des ions (He,  $^7\text{Li}$ ) produits in situ en réacteur dans des verre dopés au  $^{10}\text{B}$  ( $^{10}\text{B}$  ( $n,\alpha$ ) $^7\text{Li}$ ). Ces résultats confirment que le verre nucléaire est particulièrement résistant aux cumuls de doses avec des effets de saturation. À partir d'une certaine dose seuil (2 à 3 GGy pour les  $\alpha$   $\beta$   $\gamma$ ), ses propriétés (dureté qui diminue, densité qui augmente, ténacité qui augmente, microstructure, changement de coordination du bore et d'autres éléments, modification chimiques redox, défauts qui augmentent, ...) ne varient quasiment plus. Il se produit un recuit interne quand l'énergie stockée atteint 100 J/g (vers  $10^{18}$   $\alpha$  /g, soit une dose nucléaire évaluée à 40 MGy). C'est la dose nucléaire qui contrôle l'état microstructural. L'état vitreux est conservé après les doses de stabilisation. La solubilité de He peut aller jusqu'à 3 atomes % avant l'apparition de bulles, limite loin d'être atteinte dans les verres en stockage. Plus le verre est complexe du point de vue chimique (type R7T7 par exemple) moins les effets sont marqués.

La modélisation atomistique par dynamique moléculaire classique des effets de collisions entre des noyaux de recul et les atomes du verre permet de prévoir statistiquement les changements de position des atomes et par conséquent la structure du verre perturbé. Le CEA a conduit des simulations sur un verre à trois composantes ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ) et retrouve les variations expérimentales des propriétés macroscopiques du verre (densité, dureté, ténacité) et les effets de saturation, qui sont liés à la dose nucléaire.

L'altération du verre nucléaire par l'eau est étudiée depuis longtemps et on dispose de modèles phénoménologiques pour en rendre compte. Il y a plusieurs régimes de vitesse d'altération qui peut être mesurée par le relâchement du bore en solution. Schématiquement, la vitesse initiale  $V_0$  (micromètre/jour) correspond à la lixiviation du verre lorsque le réseau vitreux commence à s'hydrolyser en surface. Elle décroît rapidement et se stabilise à une valeur résiduelle  $V_r$  (nanomètre/an) lorsque la surface est recouverte de silicates hydratés. Le CEA a étudié les effets des débits de dose  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , et des doses cumulées sur les vitesses  $V_0$  et  $V_r$  à partir de verres dopés ou d'irradiations externes, en prenant comme témoins des verres non radioactifs. L'ensemble des résultats montre l'absence d'effets sur  $V_0$ . La vitesse  $V_r$  est insensible aux débits de dose au moins jusqu'à 3 500 Gy/h en  $\alpha$  et 10 000 Gy/h en  $\beta$ ,  $\gamma$ . Elle augmente d'un facteur 3 avec le cumul de dose alpha jusqu'à 15 MGy ( $10^{18}$   $\alpha$ /g) et se stabilise au-delà et est insensible au cumul de dose  $\beta$ ,  $\gamma$ , au moins jusqu'à 0,5 GGy. Ces données couvrent les conditions d'un verre en condition de stockage. Les mesures se poursuivent pour couvrir d'autres conditions de lixiviation et de plages de cumuls de doses.

En janvier 1994, Cogéma a réalisé deux prises d'échantillon sur une coulée de verre dans l'installation T7. 13 g de verre réduits en poudre ont été lixiviés dans 130 ml d'eau pure à 90°C, le tout dans un réacteur en inox sous atmosphère argon. Dans ces conditions expérimentales, la vitesse  $V_r$  est plus élevée (d'un facteur 10) que pour un verre inactif de même composition (expérience Scores 1). Bien que cette augmentation n'ait aucune conséquence sur l'analyse de sûreté fondée sur la vitesse initiale  $V_0$ , en 2015 l'expérience Scores 2 a été mise en route pour comprendre cet écart qui reste encore inexpliqué. Les expériences se poursuivront jusqu'en 2023.

## RECHERCHE FONDAMENTALE

### *CEA-DEN*

Les développements des procédés de séparation ou les expériences d'irradiation en vue de la transmutation ont été fortement soutenus au CEA par la recherche fondamentale

Plusieurs exemples de simulations en cours de développement sur la base d'études antérieures ont été présentés à la Commission : comportement multi-échelles des matériaux métalliques irradiés, évolution de la micro-structure des pastilles de combustible, comportement du Pu et autres actinides dans le cycle, sonochimie de solutions nucléaires.

La modélisation multi-échelles/multi-physique développée par le CEA et EDF pour simuler les effets de l'irradiation des matériaux métalliques par les neutrons est appropriée et a presque atteint la modélisation d'un échantillon macroscopique. Celle de l'évolution des propriétés des oxydes d'actinides doit progresser car les phénomènes induits par la fission et les réactions nucléaires sont très nombreux. La modélisation du changement des propriétés mécaniques des pastilles en fonction de l'évolution de la microstructure est encore loin d'être maîtrisée, même sur  $UO_2$ .

S'agissant de la séparation, la modélisation des espèces en solution et aux interphases progresse grâce au couplage de nombreuses techniques expérimentales et théoriques. La simulation des procédés à partir des caractérisations à l'échelle moléculaire est un travail de longue haleine. De très nombreuses collaborations sont engagées.

La sonochimie est bien développée à Marcoule (ICSM). Les bulles de cavitation acoustique sont des microréacteurs (haute température et haute pression) qui génèrent des radicaux libres efficaces pour développer des réactions oxydantes (sous oxygène) ou réductrices (sous Ar). La physico-chimie dans les bulles a fait de très grands progrès et peut être simulée en elle-même pour des ondes ultrasonores de 16k Hz à 1MHz sous différentes atmosphères. La sonolyse peut faciliter la dissolution des solides, comme les oxydes d'actinides, ou produire des degrés d'oxydation instables d'actinides sans apport de réactifs chimiques dans le milieu, évitant ainsi les phénomènes secondaires comme la corrosion. Ce fort potentiel de réactivité est en cours d'étude dans plusieurs domaines du cycle du combustible où l'on rencontre de nombreux systèmes hétérogènes solide-liquide ou liquide-liquide. La simulation vise à cerner les applications comme la dissolution réductrice de Pu(IV).

### *CNRS et Universités*

Le CNRS a décidé de relancer le programme NEEDS en 2020 avec pour objectifs l'étude des mécanismes / processus fondamentaux et l'acquisition de données de base d'intérêt pour l'énergie nucléaire en déclinant trois grandes thématiques : réacteurs et transition énergétique, déchets caractérisation et stockage et, ressources, environnement et territoires.

Par ailleurs, le CNRS (IN2P3 et INC) a créé, début 2018, le GDR SCINEE (Sciences nucléaires pour l'énergie et l'environnement). Les 4 thèmes du GDR sont : systèmes nucléaires et scénarios, cycle du combustible, matériaux sous stress et radiochimie environnementale, radio-écologie. Il rassemble et donne de la visibilité aux études de la communauté scientifique universitaire travaillant dans le domaine nucléaire. Elle fait un large appel aux grands laboratoires et aux

grands instruments comme Soleil. Cette réorganisation devrait favoriser les collaborations qui permettront de répondre aux appels d'offres. Ce GDR coexiste avec d'autres programmes CNRS comme les Projets Masters de l'IN2P3 (stockage, irradiations).

La présence de radionucléides dans l'environnement est ubiquitaire et soulève des interrogations quant à leurs impacts potentiels sur les systèmes vivants. En dernière analyse, le comportement des radionucléides dans l'environnement ne peut être correctement prévu que si on connaît les formes physicochimiques dans lesquelles ils sont impliqués. C'est pourquoi la spéciation des radionucléides est au cœur des nombreuses études du thème 4 du GDR SCINEE. Plusieurs domaines sont couverts : comparaisons de zones anthropisées (zone minière) et naturelles (Mercantour), Pu (colloïdes) et U (carbonate mixte avec Ca) dans l'eau de mer et Pu/U (complexes métallo-protéiniques) dans les organismes marins (oursins), complexation des actinides par des ligands biologiques.

La recherche fondamentale a également permis l'acquisition de connaissances scientifiques clefs pour la conception d'un stockage géologique profond. L'effort de recherche devra se poursuivre et doit se poursuivre pendant la construction de Cigéo. Subatech (CNRS et IN2P3) est engagé dans l'étude des grands problèmes relevant de la physicochimie, notamment dans le cadre de projets européens (cf. projet EURAD). Ainsi Subatech contribue à développer des simulations en 3D d'un stockage en augmentant la complexité des systèmes et des composants pris en compte (composants envisagés pour Cigéo par exemple). Subatech est aussi partie prenante dans l'étude intégrée Carbone 14 pilotée par l'Andra et Orano.

### *Soleil*

La ligne Mars (Multi-Analyses on Radioactive Samples) de soleil (CEA DEN et DAM) est ouverte à la communauté scientifique pour la caractérisation par rayons X (absorption, fluorescence, diffusion et diffraction dans le domaine 3,5 à 35 KeV) d'échantillons radioactifs (bientôt jusqu'à 18 GBq). C'est un outil remarquable. Le domaine de fréquence permet de caractériser les actinides et les principaux produits de fission. Le CEA et le CNRS ont présenté à la Commission plusieurs résultats récents dont les premiers spectres de diffraction sur un échantillon de 1 mm pris sur un rayon de la coupe d'une aiguille irradiée dans un REP de Gravelines de 50 microns d'épaisseur (5 ans d'irradiation, 23 ans de refroidissement).

## **CONCLUSION**

L'abandon du programme Astrid impacte directement l'avenir de la R&D de la DEN du CEA et de l'ingénierie nucléaire. Il aura aussi des conséquences sur la R&D conduite par les autres organismes tant que les futurs programmes de R&D ne seront pas complètement définis.

La Commission considère qu'un nouveau programme de R&D, soutenue par une forte recherche fondamentale, est maintenant à bâtir pour relever les nombreux défis liés à cette nouvelle stratégie et entraîner l'ensemble de la communauté scientifique et technologique dans une action d'envergure.

## ANNEXE IX : PRINCIPALES TENDANCES CONCERNANT LE DÉVELOPPEMENT DE PROGRAMMES ÉLECTRONUCLÉAIRES DANS LE MONDE

L'audition du CEA du 6 février consacrée au panorama international des activités nucléaires montre clairement une montée en puissance de l'Asie.

La Chine développe ses propres designs, part à la conquête du marché international (cf. projet HPR 1000 en Angleterre), et opte pour le cycle fermé du combustible.

La Russie garde un programme national ambitieux et un tissu industriel fort, couvre l'ensemble des technologies clés (REP, RNR, cycle du combustible), dispose d'une offre (intégrée) très agressive à l'export à la fois en matière de réacteurs et de services pour le cycle du combustible ; elle développe une option de multi-recyclage de MOx (procédé REMIX) pour ses clients étrangers.

Certains pays asiatiques (Japon, Corée du Sud), voyant le soutien de leur opinion publique faiblir, se tournent vers l'export ou tentent de développer une expertise incontournable en matière d'assainissement – démantèlement (cas particulier de la Corée du sud en phase-out).

Les Etats-Unis s'appuient sur le DOE et la NRC pour favoriser l'innovation (nucléaire en compétition avec le gaz), simplifier le licensing, associer au plus tôt le régulateur dans le développement des nouveaux concepts (pre-licensing), développer des partenariats public-privé pour financer la R&D (sans oublier les start-ups) et ouvrir les laboratoires nationaux au secteur privé (initiative GAIN) pour qu'il puisse accéder aux installations expérimentales indispensables pour la qualification des nouveaux concepts ; Les américains tentent de rester dans le coup en s'attaquant à des marchés de niche et optent pour des réacteurs de plus petite taille (SMR, micro-réacteurs) qui ouvrent de nouvelles perspectives de marché (co-génération, chaleur industrielle pour différentes industries, ...).

75

L'Angleterre, dans un contexte de Brexit, essaye de reconstituer une expertise et de redémarrer son programme électronucléaire en s'appuyant sur des projets à court terme (EPR, HPR 1000) faisant l'objet de contrats avec des partenaires étrangers, et à plus long-terme sur des développements adossés à des partenariats public-privé faisant l'objet d'appels à manifestation d'intérêt plutôt centrés sur des petits réacteurs (SMR et AMR, pour Advanced Modular Reactors), notamment pour gérer ses stocks de Pu.

La situation en Suède et en Finlande a été traitée dans le rapport n° 11.

L'Europe est en perte de vitesse et compte bon nombre de pays anti-nucléaires, et tente de minima de maintenir une expertise en matière de sûreté et de coordonner les activités de R&D consacrées à l'A&D et la gestion des déchets au travers de plateformes technologiques (ou de consortia) qui établissent une feuille de route commune et gèrent par délégation les appels à projets ainsi que le partage des financements (objectif pour la Commission : faire des économies en évitant les doublons). À noter l'adoption par la Commission européenne en 2011 d'une directive sur la gestion des CU et déchets qui a fait l'objet d'un premier bilan montrant de fortes disparités dans les documents produits, avec des difficultés à définir la phase d'après fermeture du stockage géologique de déchets (pour ceux qui investiguent cette option) ;

Dans ce contexte, les initiatives multilatérales qu'elles soient portées par EURATOM (plateforme technologique SNETP, volet EURATOM-fission du programme H2020, divers projets de programmation conjointe du type « European Joint Program » avec par exemple le projet JOPRAD consacré au stockage géologique, ...), l'AEN (GIF, IFNEC, MDEP, NI2050...) ou l'AIEA (INPRO, ...) ont une importance capitale afin de partager les efforts de R&D et d'harmoniser les référentiels méthodologiques ou bonnes pratiques notamment en matière de sûreté, de radioprotection et de gestion des déchets.

L'AEN quant à elle s'est fixé pour objectif par exemple de fédérer les efforts visant à pérenniser les connaissances (explicites ou implicites, cf. activités de la Nuclear Data Bank), à identifier les options technologiques permettant d'optimiser les coûts, ou encore à partager les meilleures pratiques en matière d'innovation (cf. Nuclear Innovation 2050) et de pre-licensing des nouveaux designs proposés (réacteurs avancés de type SMR à court terme, ou réacteurs de 4<sup>ème</sup> génération à plus long terme, cf. activités du WGSAR). La montée en puissance du thème consacré au démantèlement a conduit à la mise en place d'un comité dédié à l'AEN.

Soulignons en effet que 162 réacteurs ont été arrêtés dans le monde. Certains pays ont un REX important (USA, Corée, Angleterre, Allemagne, France/Japon, Lituanie, ...) plus ou moins soutenus selon les pays (programme DOE-USA de 6600 milliards de dollars). L'optimisation des coûts est indispensable et il faut au plus vite mutualiser le REX au plan international en créant des réseaux.

Le programme européen « Share » soumis en 2018 à la Commission (probablement accepté en juin 2019) a pour but de mutualiser le REX et les bonnes pratiques en matière d'A&D (standardisation, roadmap pour les 10-15 ans à venir, apport des nouvelles technologies ...). Le lancement d'un consortium européen associant également l'EPRI est en cours d'instruction. Le projet ELINDER concerne la formation. Le programme INSIDER est destiné à la caractérisation des installations à démanteler.

La France quant à elle a des atouts indéniables. Le CSFN (comité stratégique de la filière nucléaire) a produit un rapport sur les perspectives de marché à l'international. Le CSFN et le GIFEN (groupement des industriels français de l'énergie nucléaire) ont pour objectif de structurer la filière française sur ce thème ainsi que sur l'offre technologique à l'export en matière de réacteur nucléaire (développement d'un concept SMR, salon World Nuclear Exhibition organisé tous les 2 ans à Paris à l'image de l'événement organisé au Bourget pour la filière aéronautique, etc ...). Notons par ailleurs que le CEA a développé en coopération avec Orano et Véolia dans le cadre du projet Demeterres un procédé de décontamination (« par mousse de flottation ») qui a été testé avec succès au Japon sur plusieurs centaines de kilogrammes de terre de la région de Fukushima.

## ANNEXE X : PANORAMA INTERNATIONAL DES PROGRAMMES ÉLECTRONUCLÉAIRES

Le CEA a présenté à la Commission la stratégie en matière de développement des réacteurs et du cycle du combustible associé des principaux pays producteurs d'électricité d'origine nucléaire. La Commission examine dans cette annexe les principaux éléments qui caractérisent ces pays au regard de la situation en France.

### CHINE

La stratégie de cycle fermé et le stockage en couche géologique profonde ont été réaffirmés l'an dernier dans un projet de loi. Trois compagnies gèrent actuellement un parc de 45 réacteurs (58 GWe en 2020, soit 4 % du mix électrique) : CNNC, CGN et la State Power Investment Corporation.

Douze réacteurs sont en construction et 30 en projet (120 GWe en 2030).

La Chine teste toutes les technologies (GEN-II, III et IV) et gammes de puissances: CANDU, REP (dont VVER, AP1000, EPR, et SMR...), RNR, HTR, MSR (projet TMSR), se les approprie, développe des concepts de marque chinoise et se positionne sur le marché à l'export (cf. projet au Royaume Uni).

Le 13<sup>ème</sup> plan quinquennal (2015-2020) prévoit la mise en chantier de réacteurs tête de série de GEN III de conception chinoise (CAP 1400, Hualong 1) et étrangère (AP 1000), sans citer explicitement la mise en service des EPR de Taishan.

Après s'être fait la main sur un RNR expérimental de conception Russe (CEFR, 20 MWe), la Chine développe son propre programme avec un démonstrateur de 600 MWe (CFR-600) puis un réacteur commercial de 1000 MWe (CFR-1000).

De même, la Chine s'appuie sur l'Université de Tsinghua qui exploite un petit réacteur HTR de 10 MWe de conception allemande pour développer un démonstrateur de 600 MWe (réacteur en construction).

Les CU sont entreposés en piscine sur site auprès des centrales (pour 10 à 20 ans), toutes en bordure de mer, ainsi qu'à sec sur deux sites, et il existe 2 entreposages centralisés en piscine en Mongolie intérieure (Jinta, capacité de 1200 t, et Diwopu, capacité de 500 t qui sera étendue à 800 t).

La Chine a mis en service en 2010 une usine de retraitement pilote à Diwopu (500 t) utilisant la technologie PUREX pour produire du combustible RNR pour le CEFR. Une deuxième unité sur le site de Jinta (200 t/an) devrait être opérationnelle en 2023 toujours pour produire du MOx RNR. Un projet d'usine commerciale (800 t/an) sur technologie PUREX est à l'étude pour produire cette fois-ci du MOx REP.

Il existe 3 sites de stockage pour les déchets FMA-VC (dont 1 dans le Guangdong en zone côtière où sont principalement situés les réacteurs et grandes villes, et 2 à l'intérieur des terres dans les provinces du Gansu et du Sichuan). Cinq autres centres sont prévus en zone côtière au titre du 13<sup>ème</sup> plan quinquennal (le volume des déchets FMA-VC devant atteindre 34 800 m<sup>3</sup> en 2020).

La sélection de sites pour le stockage géologique des déchets HA dans la région granitique du désert de Gobie (région de Beishan) est en cours (un labo souterrain sera construit à partir de 2020). Le concept est proche du concept Suédois KBS 3.

## RUSSIE

Rosatom (structure étatique) gère tous les réacteurs russes et toutes les usines du cycle.

Le parc en exploitation (capacité de 29 GWe sur 10 sites, 204 TWh produits en 2018, représentant 20 % de la production d'électricité) compte 38 réacteurs dont 20 REP (VVER), 15 réacteurs modérés au graphite et refroidis à l'eau (concepts RBMK et EG-P46), 2 RNR (BN 600 et BN 800) et 1 réacteur barge récemment inauguré (le « Akademik Lomonosov » équipé de deux réacteurs KLT-40C de 35 MW chacun).

Quatre VVER 1200 sont en construction.

La Russie, qui dispose d'un tissu industriel très vivace, est très présente à l'export avec près de 33 projets de réacteurs à l'étranger dans 12 pays et offre des facilités pour le financement de ces projets.

Elle a depuis longtemps opté pour le cycle fermé mais rencontre quelques difficultés à maîtriser la fabrication de MOx-RNR sous forme de pastilles et développé un concept basé sur le vibro-compactage de l'oxyde directement inséré dans la gaine combustible.

Le programme RNR étant désormais confirmé et consolidé sur le long-terme, la Russie a renoncé à moxer ses REP mais développe toutefois une offre technologique (procédé REMIX annoncé comme similaire au procédé COEX<sup>TM</sup> développé par la France sans séparation de U et Pu) pour ses clients étrangers désireux de s'engager sur une stratégie de mono- ou multi- recyclage du MOx en REP (VVER).

L'usine de retraitement RT1, située à Mayak, dispose d'une capacité de 230 t/an. Ce site héberge également un entreposage centralisé de CU et permet d'entreposer les verres.

78

L'usine RT2 (en cours de construction) devrait permettre de retraiter à terme du MOx REMIX.

Outre la filière RNR à caloporteur sodium, d'autres concepts de réacteurs avancés offrant des capacités de séparation-transmutation sont étudiés en Russie :

- la filière RNR à caloporteur plomb (ou plomb-bismuth), cf. projet BREST, utilisant un combustible dense (nitruure) qui fait l'objet de développements spécifiques en matière de conception, de fabrication et de traitement-recyclage ;
- la filière RSF (réacteur à sel fondu) ou MSR en anglais (Molten Salt Reactor) ;

Concernant cette fois-ci la gestion des déchets, une loi fédérale a été promulguée en 2011 afin d'instaurer un principe « pollueur-payeur ».

Il existe en effet un lourd passif de déchets à traiter, essentiellement centralisés à Mayak, pris en charge par l'opérateur NORAO. Le classement des déchets est fait selon les règles de L'AIEA.

Le stockage des TFA est autorisé sur site (s'il est éloigné des villes).

Un seuil réglementaire de libération est défini pour chaque isotope.

Par ailleurs, pour un déchet dont la composition isotopique n'est pas connue, le seuil de libération est fixé à 0,3 Bq/g.

Enfin, il y a un projet de stockage géologique dans le granite à Krasnoyarsk (mise en service d'un laboratoire souterrain en 2024 en vue d'un stockage vers 2035) qui fait l'objet d'échanges avec l'Andra.

## USA

La part de l'électronucléaire dans le Mix des USA reste stable (~20 %). L'utilisation du charbon est en baisse, compensée par une contribution croissante dans le mix provenant du gaz (gaz de schiste notamment) et des énergies renouvelables.

Il y a aujourd'hui 98 réacteurs en exploitation (65 REP et 33 REB) dans 30 états avec un taux de disponibilité (Kp) élevé (les réacteurs fonctionnent en base aux USA contrairement à la France qui s'autorise à faire du suivi de charge avec son parc électronucléaire), et 2 réacteurs (AP 1000) en construction.

Cependant, le marché de l'électricité étant partiellement dérégulé (50 % seulement des réacteurs bénéficient de contrats de longue durée), certains réacteurs sont arrêtés (8 depuis 2013) faute de compétitivité dans un contexte de gaz (non conventionnel) peu cher et abondant. C'est la raison pour laquelle certains États ont mis en œuvre des mesures de soutien au nucléaire.

Le pays cherche toutefois à amortir autant que possible le parc existant (87 réacteurs ont vu leur licence d'exploitation prolongée à 60 ans et 6 font l'objet d'une demande d'extension de durée de vie à 80 ans) et investit les options possibles pour renouveler ce parc à l'horizon 2035.

Trois types de technologies innovantes sont envisagées visant principalement à améliorer la sûreté et la compétitivité du nucléaire :

- les SMR (d'une puissance inférieure à 300 MWe) avec notamment le projet NuScale initié par un laboratoire national (Idaho National Environment & Engineering Laboratory, INEEL) en coopération avec une université (Oregon State University) devrait aboutir à une première réalisation sur le site de l'INL à l'horizon 2025 associant 12 modules de 50 MWe. Plusieurs autres concepts de SMR sont portés par le secteur privé ;
- des concepts de réacteurs de 4<sup>ème</sup> génération couvrant une large gamme de filières que l'on peut tenter de lister par ordre de maturité technologique décroissante : SFR (Sodium Fast Reactor avec au moins deux projets TWR et AFR1000), HTR et VHTR (Very High Temperature Reactor : projets NGNP et Xe100), GFR (Gas-cooled Fast Reactor : projet EM<sup>2</sup> porté par GA), LFR (Lead-cooled Fast Reactor, projet SSTAR par exemple), et MSR (Molten-Salt Reactor : projets MCFR, FHR) ;
- des designs de microréacteurs (1-20 MWe) pour des marchés de niche (co-génération par exemple en zone isolée) souvent développés à l'initiative du DOD (Department of Defense) qui défend le concept de petit réacteur scellé (pour des raisons de résistance à la prolifération), refroidi au plomb (cf. projet porté par Oklo Inc. Faisant l'objet d'un pre-licensing par la NRC), et principalement destiné à l'export.

Face à ce foisonnement de concepts, l'administration américaine tente de reprendre la main et d'accompagner les opérateurs du secteur privé grâce à l'initiative GAIN (ouverture des moyens expérimentaux des labos du DOE pour la qualification des concepts, contribution de la NRC pour simplifier le licensing des réacteurs avancés sortant de la technologie classique des REP).

Côté cycle et gestion des déchets, la stratégie des USA reste inchangée depuis le Non-Proliferation Act de Carter (1979) : elle est toujours basée sur le cycle ouvert et fait l'objet d'une loi (Nuclear Policy Act de 1982 amendé en 1987).

Cependant, les combustibles usés n'ont toujours pas d'exutoire puisque le projet de stockage géologique de Yucca Mountain fait toujours l'objet d'affrontements politiques, ce qui a conduit le DOE à payer des indemnités aux exploitants (près de 6 milliards déjà versés). Les CU sont pour l'instant entreposés sur les sites des réacteurs en piscine ou dans l'un des 75 entreposages à sec (répartis dans 34 États) qui seront bientôt saturés. Dans ce contexte, la construction d'un entreposage centralisé semble être une solution d'attente à l'origine de deux projets concurrents, l'un porté par Orano dans le Texas et l'autre par Holtec dans le Nouveau-Mexique.

Il existe à ce jour 4 sites de stockage des TFA (Richland, Clive, Andrews, Barnwell).

Le Wipp (Waste Isolation Pilot Plant) est quant à lui réservé au stockage de déchets militaires (transuraniens). Arrêté suite à un incident, son exploitation a redémarré en 2017 après une révision de la ventilation.

Le domaine de l'assainissement-démantèlement, réglementé par la NRC, compte déjà un REX important (dix réacteurs ont déjà été démantelés avec succès) et présente des perspectives importantes de développement. Il est en pleine restructuration avec l'émergence d'un nouveau modèle économique basé sur un transfert de propriété des installations à démanteler et du fonds dédié à un acteur privé mis en œuvre pour la première fois sur le site de Vermont Yankee à NorthStar. La NRC vérifie systématiquement que le consortium (ou la société) portant le projet a de solides moyens pour reprendre le site. In fine, c'est le DOE qui reprendra la propriété des combustibles usés en vue du stockage.

## JAPON

Avant l'accident de Fukushima (2011), il y avait 54 réacteurs en fonctionnement au Japon (49 GWe, 29 % du mix). Ils ont tous été arrêtés après l'accident. Depuis, de nouvelles normes de sûreté ont été instaurées tirant le retour d'expérience de cet événement.

En janvier 2019, le constat est le suivant : 9 réacteurs (répondant à ces nouvelles normes) ont pu redémarrer (dont 8 sont potentiellement moxables), et 6 autres font l'objet de dernières vérifications avant de pouvoir être autorisés à reprendre du service.

Cependant, l'arrêt de ces réacteurs a conduit le Japon à importer massivement des énergies fossiles pour faire face à ses besoins (détérioration de sa balance commerciale) et à augmenter ses émissions de CO<sub>2</sub> de 6,3 % entre 2009 et 2016. Dans le même temps, le prix de l'électricité a connu une hausse de l'ordre de 26 %.

80

Le Gouvernement a du coup révisé sa politique énergétique en 2018 et réaffirmé son engagement dans la filière nucléaire et l'option du cycle fermé (avec le développement de la filière RNR) malgré l'hostilité de l'opinion publique. Il s'est fixé un objectif de 22 % de nucléaire à l'horizon 2030 principalement grâce à l'extension de la durée de vie des centrales en fonctionnement jusqu'à 60 ans.

Face à l'atonie du marché domestique, l'industrie japonaise s'est tournée vers l'export et la prise de participation dans des groupes étrangers. Cependant, certains de ces projets à l'export étant suspendus, les industriels japonais (MHI, Toshiba, Hitachi) connaissent tous des difficultés financières.

En matière de cycle et gestion des déchets, le Japon dispose d'une usine d'enrichissement et d'un site stratégique (Rokkasho-Mura) pour l'entreposage des déchets FMA, des déchets HA et des combustibles usés. C'est également à Rokkasho-Mura que se trouvent une usine de retraitement (dont le démarrage a été mainte fois repoussé et est désormais annoncé pour 2021) et un atelier de fabrication de combustible MOx (J-MOX) en cours de construction. Ces installations devront satisfaire les nouvelles normes de sûreté (avec une attention particulière à la tenue au séisme).

Le programme RNR connaît également quelques difficultés (arrêt de Monju et redémarrage de Joyo qui n'est pas acquis) et la nouvelle feuille de route sur la filière RNR (de 2018) réouvre le champ des possibles (elle n'est plus focalisée sur les RNR-Na et intègre l'option « réacteur rapide à sel fondu comme combustible et caloporteur») et mise sur des collaborations internationales (avec la France et les États-Unis).

Notons par ailleurs que le Japon s'est engagé au travers d'un accord bilatéral avec les États-Unis à réduire ses stocks de plutonium (accord 123 renouvelé en 2018).

Enfin, signalons que le Japon a lancé en 2000 une démarche visant à rechercher (dans une approche graduelle) un site de stockage géologique et a créé à cet effet une agence (baptisée NUMO) dédiée à la gestion des déchets nucléaires.

## CORÉE DU SUD

C'est un acteur majeur au plan international avec une capacité nucléaire installée de 22,4 GWe (27 % du mix en 2017) constituée de 24 réacteurs (20 REP et 4 CANDU), 5 tranches (de 1400 MWe) de 3<sup>ème</sup> génération en construction et très présent à l'export (projet Barakah aux Emirats-Arabis-Unis et JRTR en Jordanie).

Cependant, son programme électronucléaire est remis en cause depuis l'élection du Président Moon Jae-In en 2017 qui a annoncé une sortie complète du nucléaire à l'horizon 2060.

Deux réacteurs commerciaux ont d'ores et déjà été définitivement arrêtés et la réalisation de 6 nouvelles tranches a été annulée.

La filière industrielle coréenne en est donc fragilisée et se tourne plus que jamais vers l'export avec l'objectif de vendre 6 réacteurs d'ici 2025. Elle ambitionne également de capitaliser et valoriser ses compétences en matière d'assainissement et démantèlement.

Contrainte par un accord 123 avec les États-Unis en matière de résistance à la prolifération (signé en 1973 et renouvelé en 2015), la Corée du sud a adopté une stratégie de cycle ouvert qui lui interdit toute activité d'enrichissement ou de retraitement sur son sol (l'option d'un retraitement de ses combustibles usés à l'étranger a été un temps envisagé).

La gestion des combustibles usés et déchets HAVL fait l'objet d'un plan (« Basic Plan ») fortement inspiré de la stratégie en vigueur aux États-Unis basée sur un entreposage intermédiaire suivi d'un stockage définitif dont l'exploitation est annoncée pour 2053, avec un choix de site en 2029.

Aujourd'hui, les combustibles usés (en augmentation de 800 t/an) sont entreposés sur les sites des réacteurs dont les capacités de stockage sont proches de la saturation (~ 70 % pour les CU REP et ~85 % pour les CU des CANDU). C'est clairement un sujet de préoccupation.

L'agence fédérale Korad créée en 2009 gère les déchets radioactifs FMA-VC dans un stockage centralisé en profondeur mis en service en 2015 et faisant déjà l'objet d'une instruction pour son extension afin d'accueillir les déchets provenant des réacteurs en cours d'A&D.

## EUROPE

L'Europe comptait 128 réacteurs en fonctionnement (840 TWh, 26 % du Mix UE) en 2016, répartis dans 14 pays.

Le panorama global est très hétérogène avec 4 pays ayant clairement annoncé leur volonté de sortir du nucléaire (Allemagne, Suède, Belgique, Espagne), 5 pays disposant de chantiers effectifs (France, Finlande, Royaume-Uni, Slovaquie, Hongrie) dont certains connaissent des retards à répétition, et 2 pays ayant clairement annoncé une volonté forte de lancer de nouveaux projets (Angleterre, Pologne).

L'Angleterre, en dépit des incertitudes liées au Brexit (mais ayant bien préparé sa sortie d'EURATOM), s'est engagée dans une démarche ambitieuse reposant sur deux piliers :

- des projets à court terme testant un nouveau modèle économique pour le nucléaire (« Contract for difference ») et mobilisant les savoir-faire développés à l'étranger (projet d'EPR à Hinkley point porté par EDF, projet de HPR 1000 Huanlong de conception chinoise à Bradwell B accompagné par EDF) ;
- des appels à expression d'intérêt adossés à des financements publics pour mobiliser le secteur privé pour développer à moyen-long terme des réacteurs de type SMR ou AMR (Advanced Modular Reactors de type Sodium Fast Reactor ou Molten Salt Reactor) et reconstituer une expertise dans le domaine du nucléaire.

La Pologne dont la production d'électricité dépend massivement des centrales thermiques à charbon souhaite quant à elle développer un projet de réacteur HTR (High Temperature Reactor) offrant des perspectives de cogénération et d'utilisation de la chaleur industrielle notamment pour procéder à la liquéfaction du charbon, et in fine de réduction de ses émissions de CO<sub>2</sub>.

Dans ce contexte de désaffection du nucléaire par certains pays européens ayant une minorité de blocage (cas de l'Allemagne par exemple) dans le lancement de programme commun de R&D ambitieux dans le cadre du traité EURATOM datant de 1957 (privilégiant un mode de décision par consensus), l'Europe tente de pérenniser (dans le cadre d'un budget consacré à la fission de plus en plus réduit au profit de la fusion) une expertise minimale (et les moyens expérimentaux associés) visant à renforcer les standards de sûreté et de radioprotection, et à promouvoir une gestion durable et responsable des déchets.

Pour ce faire, les instruments utilisés dans le cadre d'EURATOM/H2020 (horizon 2020) pour fédérer les efforts de R&D et capitaliser les meilleures pratiques sont les plateformes technologiques (Sustainable Nuclear Energy Technology Platform par exemple) et les EJP (European Joint Programming, cas du projet JOPRAD par exemple, Joint Programme on Radioactive Waste Disposal).

La plateforme SNETP quant à elle concerne les technologies de réacteurs avec 3 piliers : NUGENIA pour les réacteurs de générations 2 et 3, ESNII pour les réacteurs de 4<sup>ème</sup> génération (projets ALFRED, ALLEGRO, MYRRHA, ASTRID) et NC2I pour la cogénération.

On note cependant une volonté de la Commission européenne de dépoussiérer le traité EURATOM pour accompagner la mise en œuvre du prochain programme cadre financier pluriannuel (2021-2027) pour la R&D (PCRD) afin de mettre en place un processus de décision à la majorité qualifiée afin de sortir du consensus mou autour du plus petit dénominateur commun.

Signalons enfin deux sujets qui montent en puissance dans ce PCRD :

- les SMR (vus sous l'angle de la sûreté) : un effort de standardisation est souhaité ;
- la volonté de fédérer et capitaliser au niveau européen les compétences en matière d'assainissement et démantèlement grâce au projet SHARE.

La Commission européenne souhaite également renforcer la mise en œuvre de la Directive de 2011 pour la gestion responsable des déchets et CU. En effet, le premier rapport de bilan est sorti et révèle que seuls 3 pays rendent des rapports (déclaratifs) satisfaisants.

## ANNEXE XI : PROCÉDURES EN VIGUEUR EN BELGIQUE CONCERNANT L'AUTORISATION D'UN STOCKAGE DE DÉCHETS

### *Autorisation dite « de création et d'exploitation » d'une installation de stockage de déchets nucléaires – procédures.*

L'autorisation de création et d'exploitation d'une installation de stockage de déchets nucléaires requiert une procédure à l'échelon fédéral qui, selon le niveau de risque de l'installation concernée, implique différents avis à d'autres échelons (communal, provincial, voire européen en cas d'impact transfrontalier potentiel).

Pour une installation de stockage de déchets nucléaires, l'obtention de l'autorisation de création et d'exploitation se déroule selon la chronologie suivante.

1. L'Ondraf introduit la demande d'autorisation auprès de l'Agence Fédérale de Contrôle Nucléaire (AFCN). La demande comporte les informations générales concernant l'installation, le rapport préliminaire de sûreté et un rapport d'évaluation des incidences sur l'environnement<sup>1</sup> conformément aux directives européennes et aux recommandations d'Euratom.
2. L'AFCN étudie le dossier et vérifie s'il est complet. L'AFCN est aidée dans cette tâche par sa filiale technique, Bel V, suite à quoi elle demande à l'Ondraf de compléter le cas échéant le dossier.
3. L'Ondraf prend les actions nécessaires pour répondre aux questions posées par l'AFCN et compléter le dossier<sup>2</sup>.
4. Si l'AFCN considère que le dossier est complet, elle l'envoie à son conseil scientifique<sup>3</sup> pour avis.

---

<sup>1</sup> Le rapport d'incidences comporte :

1. Une description des activités et du champ d'application géographique, dont un schéma d'implantation et le rayon dans lequel l'activité est susceptible d'avoir une influence.
2. Une analyse des incidences nuisibles. Il s'agit d'identifier toutes les nuisances potentielles à l'environnement (humains, faune, flore, patrimoine, climat, bruit, ...), les conséquences de ces nuisances, des solutions pour prévenir les nuisances ou y remédier.

<sup>2</sup> Le dossier de sûreté comporte les chapitres suivants :

1. Organisation du dossier et informations générales
2. Politique de sûreté, stratégie de sûreté et concept de sûreté
3. Système de gestion
4. Caractéristiques du site et de son environnement
5. Connaissance de la phénoménologie des barrières artificielles dans leur environnement
6. Déchets
7. Conception et construction des colis de stockage
8. Conception et construction du stockage
9. Exploitation
10. Fermeture du stockage
11. Mesures après fermeture (phase de contrôle)
12. Radioprotection
13. Évaluation de sûreté – sûreté opérationnelle
14. Évaluation de sûreté – sûreté à long terme
15. Critères de conformité des colis de stockage
16. Monitoring
17. Spécifications techniques

<sup>3</sup> Le conseil scientifique de l'AFCN est un organe indépendant et pluridisciplinaire auquel siège une vingtaine de membres, nommés par le gouvernement et possédant une expertise en matière nucléaire. Ceux-ci délivrent entre autres des avis concernant les autorisations des grandes installations nucléaires.

5. Le conseil scientifique rend un avis préalable provisoire et pose éventuellement des questions supplémentaires à l'Ondraf.
6. L'Ondraf introduit ses remarques, voire un dossier modifié.
7. Le dossier de demande d'autorisation est ensuite soumis à l'avis des instances suivantes :
  - les communes dans un rayon de 5 km autour de l'installation. La population dispose de trente jours pour consulter le dossier et formuler des remarques ; les administrations communales ont quant à elles soixante jours, à compter de la date de réception du dossier, pour formuler un avis.
  - la province. Le gouverneur de la province soumet le dossier à la députation permanente. Celle-ci dispose de trente jours, à compter de la date de réception du dossier par le gouverneur, pour rendre un avis.
  - la Commission européenne : dans le cas d'une installation de stockage, la Commission européenne émet dans les six mois un avis sur un éventuel impact transfrontalier de l'installation.
8. L'AFCN rassemble tous ces avis, qui ne sont pas contraignants, et les soumet à son conseil scientifique.
9. Le conseil scientifique rend un nouvel avis provisoire motivé qui, s'il est favorable, peut comporter des conditions d'autorisation particulières.
10. L'Ondraf dispose de trente jours pour introduire ses remarques.
11. L'avis du conseil scientifique est considéré comme définitif en l'absence de remarques. En cas de remarques, le conseil délibère à nouveau et donne un avis définitif. Un avis négatif est contraignant. Un avis favorable ne l'est pas. L'autorisation de création et d'exploitation nucléaire peut dans ce cas être accordée par arrêté royal, sur proposition de la tutelle de l'AFCN.
12. L'Ondraf informe la Commission européenne du projet, comme prévu à l'article 41 du traité Euratom (« Les personnes et entreprises relevant des secteurs industriels énumérés [...] sont tenues de communiquer à la Commission les projets d'investissement concernant les installations nouvelles [...] »).
13. Après la construction, l'AFCN vérifie la conformité de l'installation aux conditions de l'autorisation. Si le rapport de réception est favorable, le Roi confirme l'autorisation d'exploitation, sur proposition de la tutelle de l'AFCN.

L'autorisation de création et d'exploitation nucléaire est une matière fédérale belge. L'autorisation de création et d'exploitation pour le volet non nucléaire du dossier est une matière régionale qui, selon la région (Flandre, Bruxelles, Wallonie), peut répondre à d'autres critères. Il n'y a pas, actuellement, de hiérarchie claire entre les autorisations fédérales ou régionales en cas de conflit. Il n'y a pas non plus de réglementation ni de procédure dédiée spécifiquement au stockage de surface ou géologique.

*Il convient de noter le rôle important donné au conseil scientifique, organe indépendant de l'AFCN, dont l'avis, s'il est négatif, est contraignant.*

## *Quelques éléments marquants de l'année 2018*

### La sortie progressive de l'énergie nucléaire

La loi sur la sortie progressive de l'énergie nucléaire a été adoptée par le Parlement belge en 2003. Elle imposait la fermeture des centrales nucléaires après 40 années de fonctionnement. Les trois premières centrales auraient dû fermer en 2015 et les dernières en 2025. En 2013 et 2015, des lois ont prolongé la durée de vie des trois premières centrales jusqu'en 2025.

La part du nucléaire dans la production électrique belge est de 50 % environ. Étant conscient de la difficulté, sinon de l'impossibilité de remplacer 50 % de la production par d'autres sources d'ici 2025, les producteurs et l'AFCN se préparent à l'éventualité d'un nouveau report de la sortie du nucléaire.

### Le projet Recumo

Depuis des décennies, la Belgique produit et distribue des radio-isotopes médicaux, dont le Mo-99. Ce radio-isotope est produit par irradiation de cibles d'uranium dans le réacteur de recherche BR2 du Centre d'Étude de l'Énergie Nucléaire (SCK•CEN) à Mol. Ces cibles sont ensuite traitées par processus chimique à l'Institut National des Radioéléments (IRE) à Fleurus. Les résidus hautement radioactifs issus de ce processus chimique contiennent encore des matières valorisables. Ils seront traités au SCK•CEN dans le cadre d'un partenariat public-public qui court jusqu'en 2045. L'État belge assurera le financement du projet à hauteur de 255 millions d'euros.

### Myrrha

Le gouvernement fédéral a décidé en 2018 de financer la première phase du projet Myrrha. Une fois construit sur le site du SCK•CEN à Mol, Myrrha sera le premier prototype au monde d'un réacteur nucléaire piloté par un accélérateur de particules. Le financement de 558 millions d'euros servira à la construction de la première partie de l'accélérateur de particules et de ses stations d'irradiation.

Le Conseil des ministres a également approuvé la constitution de l'ASBL MYRRHA. Une Association Internationale Sans But Lucratif est une association dont le statut juridique est adapté aux projets d'envergure dont le financement est co-assuré par plusieurs États étrangers.



# COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION

Membres de la Commission Nationale d'Évaluation :

**Jean-Claude DUPLESSY**

**Anna CRETI**

**Frank DECONINCK**

**Pierre DEMEULENAERE**

**Robert GUILLAUMONT**

**Vincent LAGNEAU**

**Maurice LAURENT**

**Emmanuel LEDOUX\***

**Mickaële LE RAVALEC**

**Maurice LEROY**

**José-Luis MARTINEZ**

**Gilles PIJAUDIER-CABOT**

**Claes THEGERSTRÖM**

Secrétaire général & Conseiller scientifique :

**François STORRER**

Président honoraire :

**Bernard TISSOT**

Secrétariat administratif :

**Véronique ADA-FAUCHEUX**

**Florence LEDOUX**

# COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION

---

Président : **Jean-Claude DUPLESSY**

Vice-Présidents : **Maurice LEROY & Gilles PIJAUDIER-CABOT**

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

Secrétariat administratif : **Véronique ADA-FAUCHEUX & 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