



# COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION

---

DES RECHERCHES ET ETUDES RELATIVES  
A LA GESTION DES MATIERES ET DES DECHETS RADIOACTIFS

*Instituée par la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006*

RAPPORT D'ÉVALUATION N° 10

**MAI 2016**



COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION  
DES RECHERCHES ET ÉTUDES RELATIVES  
A LA GESTION DES MATIÈRES ET DES DÉCHETS RADIOACTIFS  
*Instituée par la loi n°2006-739 du 28 juin 2006*

RAPPORT D'ÉVALUATION N° 10

MAI 2016



# TABLE DES MATIERES

<b>RESUME – CONCLUSION .....</b>	<b>5</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>9</b>
<b>CHAPITRE 1 : CIGEO VERS LE DEPOT DE LA DEMANDE D’AUTORISATION DE CREATION.....</b>	<b>11</b>
1.1 LE NOUVEAU CALENDRIER DE CIGEO AVANT LA DEMANDE D’AUTORISATION DE CREATION .....	11
1.2 LE CALENDRIER DE CIGEO APRES LA DEMANDE D’AUTORISATION DE CREATION .....	12
1.3 LES DECHETS DESTINES A CIGEO .....	13
1.4 SPECIFICATIONS ET ACCEPTATION DES COLIS PRIMAIRES DANS CIGEO, CONTROLE DES COLIS .....	13
1.5 DEUX PROBLEMES PARTICULIERS .....	14
1.5.1 <i>La production d’hydrogène.....</i>	<i>14</i>
1.5.2 <i>Le co-stockage .....</i>	<i>15</i>
1.6 SPECIFICITES DE LA DEMANDE D’AUTORISATION DE CREATION DE CIGEO .....	16
1.7 LES ATTENTES SCIENTIFIQUES POUR LA DEMANDE D’AUTORISATION DE CREATION.....	17
1.7.1 <i>Le comportement thermo-hydro-mécanique du massif .....</i>	<i>18</i>
1.7.2 <i>La question de la désaturation-resaturation du massif et de la migration des gaz.....</i>	<i>19</i>
1.7.3 <i>Le dimensionnement du revêtement des galeries et des alvéoles .....</i>	<i>19</i>
1.7.4 <i>La problématique des zones endommagées par le creusement (EDZ) .....</i>	<i>21</i>
1.7.5 <i>Le rôle hydraulique des matériaux à l’extrados des revêtements.....</i>	<i>22</i>
1.7.6 <i>Le scellement des galeries et des liaisons surface-fond .....</i>	<i>22</i>
1.7.7 <i>La surveillance .....</i>	<i>23</i>
1.8 CHIFFRAGE DU COUT DE CIGEO.....	23
<b>CHAPITRE 2 : GESTION DES DÉCHETS, ENTREPOSAGE, STOCKAGE DES DÉCHETS FAVL ET TFA .....</b>	<b>25</b>
2.1 GESTION DES DECHETS.....	25
2.2 OPERATIONS DE DEMANTELEMENT.....	25
2.3 REPRISE ET CONDITIONNEMENT DES DECHETS .....	26
2.4 ENTREPOSAGE DES COLIS DE DECHETS .....	27
2.5 TRANSPORT VERS CIGEO.....	28
2.6 TFA.....	28
2.6.1 <i>Gestion des TFA .....</i>	<i>28</i>
2.6.2 <i>Valorisation des TFA .....</i>	<i>29</i>
2.7 DECHETS A RADIOACTIVITE NATURELLE RENFORCEE.....	31
2.7.1 <i>Cadre législatif.....</i>	<i>31</i>
2.7.2 <i>Déchets historiques du procédé de conversion (site AREVA de Malvési).....</i>	<i>32</i>
2.8 FAVL.....	33
<b>CHAPITRE 3 : SEPARATION – TRANSMUTATION .....</b>	<b>37</b>
3.1 ASTRID : REACTEUR ET ATELIER DE FABRICATION DU COMBUSTIBLE (AFC).....	37
3.1.1 <i>Contexte du projet Astrid.....</i>	<i>37</i>
3.1.2 <i>Caractéristiques techniques d’Astrid et options .....</i>	<i>38</i>
3.1.3 <i>SCE gaz.....</i>	<i>39</i>
3.1.4 <i>Combustible .....</i>	<i>39</i>
3.1.5 <i>Matériaux et éléments de structure .....</i>	<i>40</i>
3.2 RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT.....	40
3.2.1 <i>Séparation.....</i>	<i>40</i>
3.2.2 <i>Transmutation .....</i>	<i>41</i>
3.2.3 <i>Conclusion – recommandation .....</i>	<i>42</i>
<b>CHAPITRE 4 : RECHERCHE FONDAMENTALE .....</b>	<b>43</b>
4.1 LA RECHERCHE AMONT AU CNRS .....	43
4.2 LA RECHERCHE AMONT AU CEA.....	44
4.3 LA RECHERCHE AMONT A L’ICSM .....	44

<b>CHAPITRE 5 : PANORAMA INTERNATIONAL .....</b>	<b>45</b>
5.1 INTRODUCTION .....	45
5.2 SITUATION INTERNATIONALE .....	45
5.2.1 <i>Cadre légal international</i> .....	45
5.2.2 <i>Laboratoires de recherche ou sites de stockage géologique</i> .....	45
5.2.3 <i>Sources d'irradiation à spectre rapide</i> .....	48
5.2.4 <i>Principales activités sur les ADS</i> .....	49
5.3 PROJETS EUROPEENS DU 7 <sup>EME</sup> PROGRAMME CADRE ET H2020 .....	51
5.3.1 <i>Stockage géologique</i> .....	51
5.3.2 <i>Nouvelles filières, séparation – transmutation</i> .....	52
5.3.3 <i>Faibles doses, radioprotection</i> .....	54
5.3.4 <i>Enseignement, formation, gestion des connaissances et aspects sociétaux</i> .....	54
5.4 VOYAGE D'ETUDE.....	54
5.4.1 <i>Allegro</i> .....	55
5.4.2 <i>Entreposage et stockage des déchets en milieu géologique</i> .....	57
5.4.3 <i>Conclusion</i> .....	59
<b>ANNEXE I : COMPOSITION DE LA COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION MAI 2016.....</b>	<b>61</b>
<b>ANNEXE II : ORGANISMES AUDITIONNES PAR LA COMMISSION .....</b>	<b>63</b>
<b>ANNEXE III : LISTE DES PERSONNES AUDITIONNÉES PAR LA COMMISSION .....</b>	<b>65</b>
<b>ANNEXE IV : LISTE DES DOCUMENTS TRANSMIS A LA COMMISSION EN 2015-2016 .....</b>	<b>67</b>
<b>ANNEXE V : OPERATIONS DE REPRISE-CONDITIONNEMENT DES DECHETS ET R&amp;D ASSOCIEE .....</b>	<b>69</b>
<b>ANNEXE VI : DEMANTELEMENT ET R&amp;D ASSOCIEE.....</b>	<b>73</b>
<b>ANNEXE VII : DECHETS FAVL ET R&amp;D ASSOCIEE .....</b>	<b>75</b>
<b>ANNEXE VIII : TECHNICO-ECONOMIE DES TFA ET R&amp;D ASSOCIEE .....</b>	<b>79</b>
<b>ANNEXE IX : RECOMMANDATIONS DU GT DU PNGMDR.....</b>	<b>81</b>
<b>ANNEXE X : AVANCEES DU PROGRAMME ASTRID.....</b>	<b>83</b>
<b>ANNEXE XI : RECHERCHE FONDAMENTALE .....</b>	<b>91</b>







## RÉSUMÉ – CONCLUSION

Selon les dispositions de la loi de 2006, seuls les déchets ultimes ont vocation à être stockés. Les combustibles usés en sont donc exclus car ils contiennent des matières valorisables. Cette loi prévoit le stockage géologique des déchets de haute et moyenne activité à vie longue (HAVL, MAVL) du parc actuel dans le respect du principe de réversibilité et l'étude de la séparation-transmutation des actinides présents dans le combustible usé des réacteurs nucléaires. Le fonctionnement des installations nucléaires, le démantèlement des installations déclassées et certaines industries produisent des déchets à vie longue de faible activité (FAVL), de très faible activité (TFA) ou à radioactivité naturelle renforcée (Tenorm). Ces déchets nécessitent une gestion spécifique en raison des très grandes quantités produites.

### STOCKAGE GÉOLOGIQUE CIGÉO

Le projet Cigéo a pour finalité la construction et l'exploitation du stockage géologique des déchets radioactifs HAVL et MAVL inscrits au programme industriel de gestion des déchets (PIGD) qui couvre l'ensemble des déchets du parc actuel. Ce stockage doit être réalisé à 500 m de profondeur dans la couche d'argilite du Callovo-oxfordien (Cox), épaisse d'environ 130 m, à l'emplacement du site en Meuse-Haute Marne.

La Commission prend note que l'Andra prévoit un dépôt de la demande d'autorisation de création (DAC) à mi-2018. Celle-ci serait instruite jusqu'à mi-2021 et pourrait se conclure par la publication du décret d'autorisation de création fin 2021. Le creusement d'une première tranche du projet pourrait alors commencer pour permettre le démarrage d'une phase industrielle pilote (PIP) en 2025. Celle-ci se développerait sur une dizaine d'années. La Commission considère que la PIP sera une étape essentielle de la démonstration de la maîtrise industrielle de Cigéo, de la qualité de sa réalisation. La Commission recommande que tout au long de la phase de creusement et de la PIP, l'Andra exploite le retour d'expérience en toute connaissance du public et présente un rapport annuel d'avancement. Pour établir, dans les temps, le schéma industriel robuste indispensable à la présentation de la DAC, elle recommande que l'Andra fige au plus tôt les options techniques de réalisation de la première tranche de Cigéo, avec une grande marge de robustesse permettant la flexibilité et réserve les optimisations, qui devront encore faire l'objet d'études, aux tranches ultérieures.

La Commission considère que la compréhension des phénomènes thermo-hydro-mécaniques (THM) doit encore progresser avant le dépôt de la DAC pour concevoir l'architecture des quartiers HA1 et 2. En tout état de cause, l'Andra devra présenter une solution de référence intégrant toutes les incertitudes qui subsisteront à cette date. La réalisation de ces quartiers ne devant intervenir que dans plusieurs décennies, la Commission recommande que l'Andra, dans le cadre de la flexibilité, propose une expérience permettant de tester le modèle THM à une échelle pertinente.

L'Andra, au cours des dix dernières années, a conduit un ensemble remarquable de mesures et d'essais dans les galeries du laboratoire souterrain. Pour autant, au plan de la mécanique, l'Andra n'est pas encore parvenue à développer un modèle permettant de rendre compte de la totalité des observations. La Commission considère que les traits principaux du comportement mécanique du massif rocheux à l'échelle du siècle doivent être établis en priorité du fait de l'échelle de temps séculaire de l'exploitation du stockage.

Pour ce qui concerne les scellements, qui n'auront pu être validés à l'échelle 1 au moment de la DAC, la Commission recommande que l'Andra tire pleinement parti des expériences du laboratoire souterrain, qu'elle présente, en appui des options de conception, un modèle de fonctionnement global des scellements aux différentes phases de la vie du stockage et qu'elle établisse le détail des expérimentations à l'échelle 1 qui sont prévues dans Cigéo dès la PIP.

Les déchets destinés à Cigéo seront transportés sous forme de colis primaires. L'organisation de leur contrôle est en cours de définition par l'Andra et les producteurs. La Commission considère

comme essentiel que les processus de spécification et de contrôle des colis soient clairement définis pour le dépôt de la demande d'autorisation de création.

Par un arrêté de janvier 2016 la Ministre en charge de l'énergie a retenu le chiffre de 25 milliards d'euros pour le coût de Cigéo. La Commission s'interroge sur la façon dont sera répercutée cette révision à la baisse du coût que l'Andra avait estimé. Elle rappelle sa recommandation que les options techniques de la première tranche, choisies d'un commun accord entre l'Andra et les producteurs, soient maintenues et ne soient pas affectées par des considérations budgétaires.

## LES DÉCHETS TFA, FAVL OU À RADIOACTIVITÉ NATURELLE RENFORCÉE

Les TFA sont actuellement stockés dans un centre dédié situé à Morvilliers, le Cires. La capacité autorisée de ce stockage est de 650 000 m<sup>3</sup> et il devrait être saturé vers 2030. Les besoins en capacité de stockage des déchets TFA ont été évalués jusqu'en 2080. Ils sont considérables. Au-delà de l'extension de la capacité de stockage du Cires, il faudra aussi ouvrir un nouveau centre de grande capacité pour absorber les TFA issus du démantèlement du parc. La Commission encourage les organismes de recherche, les industriels et les autorités à poursuivre leurs études sur des modalités innovantes de gestion des matériaux issus du démantèlement et classés comme des déchets bien que contenant peu ou pas de radioactivité ajoutée. Elle renouvelle sa recommandation de développer des méthodes de mesure des très faibles radioactivités de lots importants de matériaux qui devront être au point pour accompagner toute stratégie innovante de gestion des déchets TFA.

Les déchets à radioactivité naturelle renforcée connus sous le sigle anglais Tenorm sont produits par de nombreuses activités industrielles, au cours desquelles la radioactivité naturelle des matériaux traités se trouve concentrée. La transposition de la directive 2013/59/Euratom traitant de la radioprotection dans les activités humaines conduira à considérer ces déchets comme s'ils résultaient d'activités nucléaires. La Commission demande à l'Andra d'évaluer les conséquences de cette transposition sur la gestion de ces déchets.

6

Le site de Malvési, près de Narbonne contient des résidus de traitement de la conversion de l'uranium (cf. rapports n°8 & 9). Les études pour gérer à long terme les déchets de Malvési par stockage sur site n'en sont qu'à leur début. La Commission recommande d'entreprendre, en complément des études en champ proche des stockages, des modélisations d'écoulements à une échelle régionale, prenant en compte la présence de failles, de karsts et d'aquifères.

L'Andra a lancé des recherches exploratoires pour caractériser un éventuel site de stockage de déchets FAVL sur le territoire de la communauté de communes de Soulaines, dans l'Aube, où des séries argileuses pourraient permettre la création d'un stockage en sub-surface. La Commission considère que les inventaires des radionucléides présents dans les déchets FAVL doivent être consolidés et estimés plus précisément. Les résultats acquis sur le comportement de ces radionucléides dans le stockage envisagé sont encore insuffisants pour conduire une analyse de sûreté réaliste incluant tous les paramètres géologiques du site. En l'état actuel, il semble à la Commission que la gestion des déchets FAVL devrait relever de plusieurs filières.

## SÉPARATION ET TRANSMUTATION

Pour répondre aux objectifs fixés par la loi de 2006, le CEA développe le projet Astrid, démonstrateur industriel d'un réacteur à neutrons rapides de génération IV. Ce projet très innovant est une étape indispensable à l'introduction de ces réacteurs dans le parc électrogène. Astrid permettra d'évaluer la faisabilité industrielle du multirecyclage de son propre combustible.

La demande d'autorisation de création ne serait déposée qu'en 2020 en raison de la réduction des moyens humains et financiers alloués au CEA et du souhait de porter les études sur le système de conversion d'énergie avec un gaz au même niveau que celles atteintes avec le système de conversion d'énergie eau-vapeur.

La récente modification du calendrier qui le rend peut-être plus réaliste, ne remet pas fondamentalement en cause le projet Astrid mais ce retard doit être maîtrisé et utilisé pour conserver et faire progresser l'expertise et la compétence en poursuivant la R&D.

La fabrication des éléments pour le montage des assemblages de combustible est maîtrisée et la R&D pour passer à l'échelle industrielle est en cours. La Commission recommande d'assurer durablement le maintien des filières industrielles indispensables au projet. Compte tenu de l'ampleur des défis scientifiques et technologiques, la Commission recommande de lancer dès maintenant un programme de R&D à long terme pour assurer industriellement le retraitement du combustible RNR. Pour préparer l'étude de la transmutation de l'américium dans Astrid, les projets de fabrication de combustible à haute teneur en américium doivent bénéficier d'un soutien continu, sans faille, en raison des expériences très longues à réaliser.

## PANORAMA INTERNATIONAL

La France, la Finlande et la Suède sont aujourd'hui les trois pays où le processus d'obtention d'autorisation de création d'un stockage géologique profond de déchets de haute activité fait l'objet de développements significatifs. La décision du gouvernement finlandais d'accorder le permis de construire d'un stockage dans le granite pour une capacité initiale de 6500 tonnes de combustible usé est intervenue en novembre 2015. Le début de la construction, à partir de l'installation existante à Olkiluoto, est prévu en 2016. En Suède, début 2016 la Cour environnementale a annoncé sa décision de considérer la demande de SKB pour 12 000 tonnes de combustible usé comme recevable pour l'audition publique prévue début 2017.

Un effort européen significatif, dans lequel la Belgique joue un rôle moteur, porte sur les ADS (Accelerator Driven Systems) qui sont des installations, proposées comme les réacteurs à neutrons rapides pour la transmutation des actinides. Le cœur du réacteur d'une installation ADS est sous-critique, Un apport externe en neutrons y est requis pour entretenir la réaction en chaîne, ce qui constitue un avantage au plan de la sûreté. Les neutrons sont fournis à l'aide d'un accélérateur de protons de haute intensité bombardant une cible de spallation. La première tranche de l'accélérateur (100 MeV, 5 mA) est prévue pour 2024.

Le projet Allegro de réacteur à neutrons rapides avec caloporteur gaz a été lancé en 2002 dans le cadre du Forum international Génération IV. Le CEA a consacré jusqu'en 2009 des moyens importants qui lui ont permis de définir les premières caractéristiques du réacteur expérimental Allegro. En 2010, sur la proposition du CEA, trois instituts ont signé un MoU (Memorandum of understanding) pour étudier ensemble le développement et les conditions d'accueil d'Allegro : MTA-EK pour la Hongrie, VUJE pour la Slovaquie et UJV pour la République Tchèque. L'institut polonais NCBJ a rejoint ce consortium en 2012. Suite à sa visite en Europe de l'Est, la Commission comprend que le projet Allegro est encore dans une phase conceptuelle ; les questions de sûreté et les verrous technologiques ont été identifiés. La Commission a pris conscience de l'immense effort de R&D maintenant nécessaire pour atteindre les objectifs ambitieux retenus pour Allegro. Le projet Allegro ne sera qu'une toute première étape. Les RNR à caloporteur gaz ne seront pas, avant longtemps, disponibles pour un usage industriel.







## INTRODUCTION

La Commission nationale d'évaluation analyse, depuis plus de vingt ans, l'état d'avancement des recherches et des études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs. La période de septembre 2015 à avril 2016 est la 9<sup>ème</sup> année de plein exercice de la présente Commission, CNE2. L'évaluation des recherches qui lui ont été présentées durant cette période fait l'objet du présent rapport (rapport n°10). Comme les années précédentes, une grande partie de ce rapport est consacrée à l'examen de la gestion des matières et déchets nucléaires, au suivi du projet de stockage Cigéo qui concerne les déchets inscrits au plan industriel de gestion des déchets (PIGD) et au suivi du programme Astrid, qui vise la construction d'un prototype de réacteur à neutrons rapides (RNR) de Génération-IV, très innovant, et qui, seul, permettrait de tester la transmutation de l'américium à l'échelle industrielle.

Le chapitre 1 est consacré à Cigéo. La Commission prend note que le dossier de demande d'autorisation de création de Cigéo ne sera déposé qu'en 2018. La Commission évalue dans ce chapitre les spécificités d'une telle installation nucléaire, prenant en compte son implantation dans des couches géologiques profondes. Suite à cette analyse, la Commission dresse une liste des problèmes scientifiques en attente et devant être résolus pour l'établissement de cette demande qui doit s'appuyer sur une démonstration de sûreté robuste.

Le stockage souterrain des déchets HAVL et MAVL ne constitue, cependant, qu'un des problèmes que pose la gestion des déchets de l'aval du cycle du combustible nucléaire. En effet, quels que soient le calendrier d'application de la loi de transition énergétique de 2015 et celui des nouvelles réglementations en préparation, il faut envisager leurs conséquences sur la gestion des déchets et matières nucléaires. Ces nouveaux éléments renforcent la vigilance de la Commission. Elle s'est intéressée dans le chapitre 2 à la reprise et au conditionnement des déchets et à la gestion des FAVL, des TFA et des déchets à radioactivité naturelle renforcée, moins actifs mais présents en grandes quantités. Cette gestion nécessite la création de nouvelles infrastructures de stockage dont l'implantation devra être étudiée avec soin. Le démantèlement à venir des installations nucléaires, générera une quantité importante de déchets TFA pour lesquels des solutions de stockage et, le cas échéant, des procédés de réduction de leur volume restent à mettre au point.

Avant de présenter les faits marquants du panorama international et le compte rendu de sa visite dans des pays d'Europe de l'Est (chapitre 5), la Commission consacre le chapitre 3 au projet de démonstrateur industriel Astrid, réacteur de Génération-IV et le chapitre 4 à l'évolution de l'important effort de recherche fondamentale mené par la communauté scientifique nationale. La construction du démonstrateur Astrid est un enjeu majeur pour permettre à la France de vérifier sa capacité à utiliser le plutonium, l'uranium appauvri et l'uranium de retraitement pour produire de l'électricité.

\* \* \*

Depuis la publication de son précédent rapport en juin 2015, la Commission a présenté son rapport n°9 à l'OPECST et aux départements ministériels concernés. Une délégation de la Commission s'est rendue à Joinville le 29 octobre 2015 pour y présenter son rapport aux membres du Clis du laboratoire de Bure.

La Commission (cf. annexe I) a suivi la même méthode de travail que les années précédentes. Elle a procédé à 10 auditions d'un jour (cf. annexe II), et 8 autres restreintes d'une demi-journée, 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 88 personnes de l'Andra et du CEA, mais également des institutions universitaires et organismes industriels, français et étrangers (cf. annexe III). Ces auditions rassemblaient en moyenne une soixantaine de personnes, notamment des représentants de l'Autorité de sûreté nucléaire, d'Areva, d'EDF, de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire et de l'Administration centrale.

La Commission a consacré une journée à la visite de la Centrale de Chooz d'EDF.

La Commission a également effectué un voyage d'études dans des pays de l'Est du 21 au 30 septembre 2015.

Pour préparer ce rapport, la Commission a tenu un pré-séminaire de 2 jours, à l'occasion de sa visite du site d'Iter et du Centre CEA de Cadarache. Elle a tenu de nombreuses réunions internes, dont une d'une durée de 5 jours en séminaire résidentiel. La liste des auditions et visites de la Commission est donnée en annexe II du présent rapport. La liste des personnes qu'elle a auditionnées est donnée en annexe III. La liste des documents qu'elle a reçus des organismes auditionnés est donnée en annexe IV.

\* \* \*



## CHAPITRE 1 : CIGÉO

### VERS LE DÉPÔT DE LA DEMANDE D'AUTORISATION DE CRÉATION

Le projet Cigéo, en application de la loi de juin 2006, a pour objectif la conception, la construction et l'exploitation d'un stockage géologique réversible des déchets radioactifs HAVL et MAVL inscrits au programme industriel de gestion des déchets (PIGD). Le stockage doit être réalisé à 500 m de profondeur dans la couche d'argilite du Callovo-oxfordien (Cox), épaisse d'environ 130 m, présente dans la zone d'intérêt pour une reconnaissance approfondie (Zira) identifiée en 2009 par l'Andra en Meuse-Haute Marne. Ce projet a vu le jour après des études et recherches développées sur plus d'une vingtaine d'années et qui ont démontré l'excellente aptitude du Cox à confiner les radionucléides contenus dans les déchets.

Assistée de son maître d'œuvre système Gaya, l'Andra, agissant comme maître d'ouvrage, a achevé l'avant-projet sommaire (APS) en juin 2015. Cet APS a été examiné par une revue de projet commanditée par la DGEC, dite revue de définition préliminaire, qui a fait 35 recommandations portant sur la R&D, l'ingénierie et la gouvernance ; ces recommandations concernent :

- les problèmes liés à l'évolution thermo-hydro-mécanique (THM) à long terme de la formation géologique ;
- le dimensionnement des revêtements des galeries ;
- l'allongement des alvéoles HAVL ;
- la géométrie des alvéoles MAVL ;
- les spécifications des colis ;
- les chroniques de réalisation des infrastructures ;
- la sûreté ;
- le pilotage et la relation Andra-producteurs.

---

11

Les recommandations de la revue de projet concernant la R&D rejoignent celles de la CNE. En conséquence de la revue de projet, l'Andra a révisé son calendrier et s'est engagée progressivement dans l'avant-projet détaillé (APD).

#### 1.1 LE NOUVEAU CALENDRIER DE CIGÉO AVANT LA DEMANDE D'AUTORISATION DE CRÉATION

La phase d'APD se déroulera sur les années 2016-2017 en prévision d'un dépôt de la demande d'autorisation de création (DAC) à mi-2018. Au cours de cette période, en vue de préparer l'instruction du dossier de la DAC, l'Andra a remis à l'ASN, et à la Commission en avril 2016, les documents suivants :

- dossier d'options de sûreté (DOS),
- dossier d'options techniques de récupérabilité (DORec),
- projet de plan directeur d'exploitation (PDE).

En outre, le document d'étude d'impact environnemental est prévu pour fin 2016.

Les trois premiers documents seront instruits par l'ASN qui rendra un avis ; la Commission en fera de même. Les résultats de l'APD, disponibles fin 2017, seront ensuite examinés par une revue de projet (revue de conception détaillée). L'ensemble de ces évaluations sera pris en compte dans la demande d'autorisation de création et dans une mise à jour du plan directeur d'exploitation au cours du premier semestre 2018.

L'Andra possède actuellement la quasi-totalité de la maîtrise foncière des terrains nécessaires aux installations de Cigéo ; elle procède dès maintenant aux investigations d'archéologie préventive.

*La Commission constate un réaménagement du calendrier par l'Andra pour préparer progressivement les éléments constitutifs de la Demande d'autorisation de création.*

*La loi de 2006 prévoit que le Parlement fixe les conditions de la réversibilité. Dans cette attente, la Commission analysera le DOS, le DOREC et le PDE à la lueur de la définition de la réversibilité qu'elle a proposée dans son rapport n°8.*

## **1.2 LE CALENDRIER DE CIGÉO APRÈS LA DEMANDE D'AUTORISATION DE CRÉATION**

La demande d'autorisation de création serait instruite jusqu'à mi-2021 ; cette phase d'instruction pourrait se conclure par la publication du décret d'autorisation de création fin 2021. Une première tranche de travaux pourrait alors commencer et permettre le démarrage d'une phase industrielle pilote (PIP) en 2025.

La phase industrielle pilote se développerait sur une dizaine d'années, entre 2025 et 2035, avec une première étape d'une durée de cinq ans où il serait procédé à des essais de fonctionnement du stockage avec des colis inactifs. Les premiers colis actifs seraient ainsi descendus à partir de 2030, après obtention de l'autorisation de mise en service. Il s'en suivrait une montée en cadence du stockage avec comme objectif de démontrer qu'il est possible d'atteindre, en fin de PIP, des conditions d'exploitation compatibles avec le rythme de livraison maximal de 3000 colis primaires par an, tel que prévu par le PIGD. L'expérience acquise au cours de cette phase industrielle pilote serait employée pour une mise à jour du plan directeur d'exploitation.

La DAC devra présenter des solutions enveloppes robustes pour l'ensemble du projet Cigéo, dont la mise en œuvre sera validée pendant la phase industrielle pilote. La PIP sera aussi une période pendant laquelle des pistes d'optimisation seront qualifiées. Elle préfigurera ainsi la flexibilité nécessaire à la conception d'un ouvrage destiné à une exploitation centennale.

*La Commission constate que le calendrier reste très serré pour établir le schéma industriel robuste indispensable à la présentation de la demande d'autorisation de création. La Commission recommande que l'Andra fige au plus tôt les options techniques de réalisation de la première tranche de Cigéo, avec une grande marge de robustesse et réserve les optimisations, qui devront encore faire l'objet d'études, aux tranches ultérieures.*

*La phase industrielle pilote sera une étape essentielle de la démonstration de la maîtrise industrielle de Cigéo, de la qualité de sa réalisation et de la flexibilité de son fonctionnement. Pendant cette phase industrielle pilote, l'Andra devra garantir la possibilité de récupérer les colis. La Commission recommande que tout au long de la phase de creusement et de la phase industrielle pilote, l'Andra exploite le retour d'expérience en toute transparence et présente un rapport annuel d'avancement.*

### 1.3 LES DÉCHETS DESTINÉS À CIGÉO

Dans son inventaire des matières et déchets radioactifs de 2015, l'Andra présente une vision prospective des déchets qui seraient produits en fin de vie des installations dont les déchets entrent dans le cadre du PIGD. Deux scénarios contrastés, reposant tous deux sur l'hypothèse d'une durée de vie de 50 ans des installations, sont présentés :

- le premier scénario considère la poursuite de la production électronucléaire et le maintien de la stratégie actuelle en matière de traitement des combustibles usés, ce qui sous-entend que l'uranium et le plutonium de ces combustibles sont des matières qui sont utilisables dans le parc actuel ou le seront dans un parc futur. Dans ces conditions, les déchets HAVL obtenus après traitement sont tous vitrifiés pour devenir des déchets ultimes destinés à Cigéo et tous les déchets MAVL sont conditionnés pour y être stockés.
- Le second scénario considère le non-renouvellement du parc existant, ce qui implique l'arrêt du traitement des combustibles usés au moment opportun pour ne pas constituer de stock de plutonium séparé. Dans ces conditions, les déchets HAVL seront constitués de déchets vitrifiés et de combustibles usés UOx et MOx et les déchets MAVL seront ceux produits au moment de l'arrêt du traitement.

*La Commission note que ces deux scénarios représentent des situations contrastées mais plausibles de la gestion des déchets du parc électronucléaire, en lien avec les évolutions possibles de la politique énergétique française. En présentant ces deux scénarios, l'Andra remplit ses obligations réglementaires.*

Les déchets destinés à Cigéo sont ceux pris en compte par le PIGD. Ils comprennent les déchets des installations nucléaires en service ou autorisées à fin 2013. Ils doivent être ultimes au sens de l'article L542 du code de l'environnement. Les combustibles usés des réacteurs électrogènes ne sont pas des déchets ultimes.

Toutefois l'Andra a vérifié à la demande du PNGMDR qu'il n'y avait pas d'obstacle rédhibitoire à les manipuler dans les installations de Cigéo.

Pour la préparation de la demande d'autorisation de construction, l'Andra prend en compte actuellement l'inventaire de référence (PIGD) complété par un inventaire de réserve au cas où les études en cours conduiraient à stocker dans Cigéo certains déchets FAVL en l'absence de stockage dédié.

*La Commission considère que la demande d'autorisation de création de Cigéo doit prendre en compte une configuration de référence pour laquelle l'inventaire doit être figé, portant sur des déchets ultimes au sens de l'article L542 du Code de l'environnement.*

### 1.4 SPÉCIFICATIONS ET ACCEPTATION DES COLIS PRIMAIRES DANS CIGÉO, CONTRÔLE DES COLIS

La Commission a décrit dans son rapport n°9 (annexe VIII) le processus itératif engagé depuis 2012 par l'Andra et les producteurs de déchets pour établir les spécifications d'acceptation des colis primaires de déchets et pour définir les contrôles de vérification de la conformité aux spécifications des colis agréés par l'Andra. En effet, les colis répondant déjà aux spécifications et,

ceux à venir devront avoir fait l'objet d'agrément donné par l'Andra aux producteurs avant leur prise en charge par l'Andra.

En fin d'APS, des spécifications préliminaires ont été établies pour tous les colis primaires, qu'ils soient destinés à être mis en colis de stockage de référence ou en colis de stockage renforcés vis-à-vis du confinement, ou bien à être déposés tels quels. Cependant cette version des spécifications est toujours en discussion. L'ASN se prononcera sur la version qui est présentée par l'Andra dans le DOS. La concertation engagée entre l'Andra et les producteurs se poursuivra durant l'APD sur la base de l'amélioration des connaissances des colis et de leur comportement et d'une optimisation technico-économique. L'Andra présentera donc dans la demande d'autorisation de création une version consolidée de ses spécifications préliminaires. Les spécifications définitives ne seront arrêtées par l'ASN que lors de la mise en service du stockage.

L'organisation du contrôle des colis primaires, esquissée en 2015, est en cours de définition par l'Andra et les producteurs. Elle sera adaptée aux catégories de colis et comportera un dernier contrôle par l'Andra dans les installations nucléaires de surface de Cigéo. L'Andra prévoit une première version de l'organisation du contrôle pour la demande d'autorisation de création. Pour l'instant, un groupe de travail Andra-producteurs a été mis en place avec l'objectif de définir la stratégie de maîtrise de la qualité des colis, selon des jalons calés sur ceux de l'APD. Cette stratégie doit respecter les responsabilités propres de l'Andra et des producteurs définies par l'ASN :

- les producteurs doivent caractériser les déchets et les colis et prouver qu'ils sont conformes aux spécifications ;
- l'Andra doit avoir un programme de surveillance de la fabrication des colis primaires chez les producteurs.

L'Andra prévoit de poursuivre son travail sur les modalités du contrôle des déchets avec les producteurs jusqu'à la mise en service de Cigéo.

*La Commission prend acte de l'avancement des études devant conduire à l'admission dans Cigéo des colis primaires de déchets. Elle demande que l'Andra explicite, en toute transparence, comment une incertitude de connaissance sera palliée par la mise en œuvre de dispositifs de sûreté plus importants.*

*La Commission considère donc comme essentiel que les processus de spécification et de contrôle des colis soient clairement définis pour le dépôt de la demande d'autorisation de création. En conséquence, la Commission recommande d'accélérer les études et la R&D qui resteraient nécessaires.*

*Elle souhaite connaître comment un label "colis accepté pour le stockage" serait donné à chacun des colis primaires arrivant sur le site de Cigéo par les agents de l'Andra.*

## 1.5 DEUX PROBLEMES PARTICULIERS

### 1.5.1 La production d'hydrogène

La production d'hydrogène dans le stockage est un phénomène qui est pris en compte dans la démonstration de sûreté du stockage. Elle provient de la radiolyse dans les colis de déchets MAVL et à long terme de la corrosion des matériaux métalliques. Selon la nature du colis primaire

plusieurs codes de calcul de la production d'hydrogène de radiolyse sont utilisés par Areva et le CEA. La R&D conduite en laboratoire et sur des installations d'entreposage de colis (Annexe V) permet de valider les codes. La radiolyse conduit aussi à la dégradation de la matière organique qui produit des espèces chimiques pouvant modifier à long terme, lors de la ruine des colis, le confinement des radionucléides.

*La Commission considère que les conséquences des effets de la radiolyse sur les conditions d'exploitation des alvéoles MAVL de Cigéo sont telles que la R&D sur ce sujet doit être intensifiée. L'Andra devra donc disposer de données consolidées et cohérentes sur la production des espèces radiolytiques pour la demande d'autorisation de création.*

*La Commission souhaite également que lui soit présenté le modèle de production globale d'hydrogène dans l'ensemble du stockage après sa fermeture.*

### 1.5.2 Le co-stockage

Il y a au total 176 000 colis primaires MAVL à stocker. L'Andra est parvenue à réduire à sept le nombre de modèles de conteneurs de stockage. L'Andra étudie la possibilité de les stocker dans une cinquantaine d'alvéoles.

Ainsi, dans un souci d'optimisation du stockage par réduction du nombre d'alvéoles MAVL, l'idée de co-stocker dans un même alvéole des colis MAVL de natures physico-chimiques et radiochimiques différentes est à l'étude depuis plusieurs années. La Commission a mentionné dans son rapport n°9 le processus de sélection des colis co-stockables et la R&D l'accompagnant. En fin d'APS, l'Andra a consolidé le classement des 79 familles de colis MAVL en 7 catégories, MA-VL1 à 7, se distinguant par leurs contenus physico-chimiques.

15

Catégorie	Nombre de familles	Nombre de colis primaires	Volume (m <sup>3</sup> )	Type de déchets
MA-VL1	11	20878	6494	Quantité significative de sels / non bitumés
MA-VL2	6	41071	13673	Bitumés
MA-VL3	40	40683	27957	Matières organiques
MA-VL4	6	21720	16155	Cimentés, faiblement exothermiques ne contenant ni sel ni organiques
MA-VL5	11	50274	9074	Non-cimentés, faiblement exothermiques ne contenant ni sel ni organiques
MA-VL6	3	1347	242	Vitrifiés, faiblement exothermiques
MA-VL7	2	8	13	Sodés

Par construction, les colis d'une même catégorie physico-chimique sont co-stockables. L'Andra poursuit les études sur les conséquences des interactions physico-chimiques entre colis pour déterminer d'éventuelles possibilités de co-stockage de colis appartenant à des catégories différentes. La faisabilité du co-stockage repose sur la connaissance qu'a l'Andra de la production d'hydrogène, du relâchement/transfert des radionucléides et de la dégradation des matériaux (organiques, cimentaires, métalliques) des colis dans les conditions thermiques et hydriques du stockage. L'Andra a procédé à des analyses qualitatives croisées d'interactions entre toutes les

familles de colis de déchets sur la base des dossiers de connaissances fournis par les producteurs, et de ses propres travaux sur le comportement des radionucléides en situation de stockage et en présence de complexants issus de la radiolyse des matériaux organiques. Les conséquences des interactions entre colis sont examinées de façon conservative, toute incertitude significative conduisant au rejet du co-stockage.

Toutes ces données vont être prises en compte, au cours de l'APD, pour définir le mode de remplissage optimal des alvéoles MAVL dédiés.

L'Andra conclut d'ores et déjà que sont co-stockables les colis de déchets MA-VL4 et MA-VL5, cimentés ou non, parce qu'ils ne contiennent ni composés organiques, ni sels.

Dans l'état actuel des évaluations, l'ensemble des colis MAVL pourrait être stocké dans 50 alvéoles.

*La Commission soutient l'Andra dans son choix raisonnable de ne co-stocker que les déchets des catégories MA-VL4 et MA-VL5.*

## 1.6 SPÉCIFICITÉS DE LA DEMANDE D'AUTORISATION DE CRÉATION DE CIGÉO

La loi du 28 juin 2006, relative à la gestion des matières et déchets radioactifs, précise que les centres de stockage de déchets radioactifs en couche géologique profonde constituent des installations nucléaires de base (INB).

La création de Cigéo devra donc être autorisée par un décret en conseil d'Etat pris après avis de l'Autorité de sûreté nucléaire et après enquête publique. De surcroît, selon les termes de cette loi, le dossier de demande de création devra aussi être accompagné d'un compte rendu d'un Débat public et d'un rapport de la CNE.

Après évaluation du dossier par l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST), le Gouvernement devra soumettre au Parlement un projet de loi fixant les conditions de réversibilité de ce stockage. Cette disposition, prévue par la loi de 2006, donnera ainsi l'occasion au Parlement de prendre connaissance du dossier et de statuer sur la réversibilité.

Cette procédure spécifique aura l'avantage de livrer les éléments du dossier à la connaissance du public à travers les travaux et les débats parlementaires, mais qu'en serait-il si une des exigences de la loi fixant les conditions de la réversibilité n'était pas compatible avec les dispositions prévues dans le dossier de demande d'autorisation de création qui aura déjà été déposé ?

L'ouvrage Cigéo comprend un certain nombre de spécificités auxquelles devra s'adapter la demande d'autorisation de création :

- Cigéo sera une INB particulière par son implantation simultanée en surface et en grande profondeur ;
- Cigéo est destiné à être exploité sur une durée plus que centenaire ;
- Cigéo doit prendre en compte le principe de réversibilité dans des conditions qui ne sont pas encore précisées par la loi ;
- la partie souterraine de Cigéo n'est pas destinée à être démantelée en fin de vie mais à être fermée et à fonctionner en mode passif.

De telles exigences impliquent une flexibilité dans le processus de construction et d'exploitation permettant d'intégrer le retour d'expérience de différentes étapes de la vie de l'ouvrage et les progrès de la R&D.

L'ASN attend des documents (DOS, DORec et PDE) les informations qui préfigureront celles qu'il sera souhaitable de trouver dans la Demande d'autorisation de création. En parallèle à sa propre analyse, l'ASN sollicitera une analyse supplémentaire des dossiers de sûreté par un collège d'experts internationaux. L'ASN émettra un avis et des recommandations sur ces documents qui devront être pris en compte dans la Demande d'autorisation de création.

Le dossier d'options de sûreté (DOS) sera une façon de préparer la rédaction de la demande d'autorisation de création, en conformité avec l'approche itérative définie dans le guide de sûreté de l'ASN. Dans le même esprit, le dossier d'options techniques de récupérabilité (DORec) pourrait fournir les éléments techniques préparatoires à l'élaboration de la loi sur la réversibilité.

Ainsi, le réaménagement du calendrier présenté par l'Andra (Cf. 1.1) devrait permettre au Parlement de disposer de tous les éléments nécessaires au débat sur la réversibilité.

Dans son dossier de demande de création de Cigéo, l'Andra devra être à même de démontrer que les dispositions techniques prévues pour la création, l'exploitation, la fermeture et le démantèlement des installations de surface sont de nature à prévenir ou du moins à limiter les risques et inconvenients que l'installation pourrait présenter pour les populations et l'environnement.

La combinaison des règles générales relatives à la création des INB et des dispositions spécifiques aux stockages de déchets radioactifs, fait que la préparation du dossier de demande d'autorisation de création est particulièrement complexe. L'évaluation de la demande d'autorisation de création, qui est une première en France, fera l'objet d'examen approfondis.

Lors de la création de Cigéo et pendant toute la durée de son fonctionnement, l'exploitant sera soumis aux règles très précises du décret du 2 novembre 2007 relatif aux INB. Il pourra solliciter, au cours de la vie de cette INB, un décret modificatif pour en changer la nature, en augmenter la capacité ou procéder à des modifications essentielles.

*Pour toute modification majeure de Cigéo, la Commission rappelle son attachement au respect de toutes les garanties et à une large information du public.*

## **1.7 LES ATTENTES SCIENTIFIQUES POUR LA DEMANDE D'AUTORISATION DE CRÉATION**

Les travaux de l'Andra ont démontré l'excellente aptitude de l'argilite du Callovo-oxfordien (COx) à confiner les radionucléides. Ceci tient aux qualités particulières du massif rocheux à différentes échelles :

- sa stabilité à l'échelle des temps géologiques ;
- la faible porosité de l'argilite et sa très faible perméabilité qui minimise à l'extrême la circulation de l'eau ;
- la capacité de rétention de l'argile qui ralentit considérablement la migration par diffusion d'un grand nombre de radionucléides ;
- l'homogénéité de la couche sur au moins 130 m d'épaisseur et sur l'étendue de la Zira ;
- l'absence de failles et de fracturation pouvant remettre en cause cette homogénéité.

La sûreté du stockage est donc assurée en premier lieu par la barrière géologique. Les colis de stockage et les barrières ouvragées (scellements) constituent des facteurs de confinement complémentaires assurant une redondance qui renforce la sûreté conformément au principe de défense en profondeur.

Il est donc essentiel de pouvoir garantir que les propriétés de la couche hôte à différentes échelles seront préservées pendant toute la durée nécessaire au confinement.

Dans ses rapports précédents, la Commission avait attiré l'attention sur les questions scientifiques qu'il importera de maîtriser au moment de la demande d'autorisation de création pour garantir le fonctionnement de Cigéo dans un contexte de sûreté en exploitation et de sûreté à long terme. Ces questions, qui n'apparaissent pas encore toutes parvenues à maturité, sont reprises ci-après.

### 1.7.1 Le comportement thermo-hydro-mécanique du massif

Dans son rapport n°9, la Commission a noté que l'Andra avait fait évoluer son modèle du comportement du massif d'argilite sous l'effet du dégagement de chaleur des déchets HA exothermiques. Cette évolution était motivée par une révision des paramètres hydro-mécaniques et par une modification de l'architecture des zones de stockage HA visant à réduire la longueur de galerie d'accès aux alvéoles. Les études récentes ont conduit à la réduction de près d'un ordre de grandeur de la perméabilité de l'argilite et à une augmentation de la raideur de la roche. Ceci a pour conséquence que le critère de fracturation de la roche sous l'effet de l'accroissement de la pression interstitielle a pris le pas sur le critère de température atteinte dans l'argile au contact des alvéoles de stockage, pris en compte dans les études antérieures. Si l'Andra semble avoir adopté des hypothèses prudentes dans son calcul thermo-hydro-mécanique (THM) permettant l'évaluation de ce critère, l'incertitude qui règne encore sur certains paramètres tels que le module d'Young incite à la plus grande prudence sur l'évaluation des conséquences du dépassement du critère.

*Considérant que la question du comportement THM est de la plus grande importance pour garantir la pérennité des caractéristiques essentielles de confinement du COx, la Commission demande :*

18

- *que l'Andra indique quelles sont les part respectives de l'évolution des paramètres et des modifications d'architecture ayant entraîné le passage du critère thermique au critère de fracturation ;*
- *que l'Andra tire tout le parti des résultats existants et de l'interprétation des expériences thermiques menées dans le laboratoire souterrain pour valider le modèle THM utilisé ;*
- *que l'Andra entreprenne les études nécessaires pour évaluer les conséquences d'une éventuelle fracturation hydraulique sur les propriétés de confinement du COx et les implications qui en résulteraient sur la sûreté.*

*Dans l'état actuel, la Commission considère que le modèle THM doit encore progresser avant le dépôt de la Demande d'autorisation de création. En tout état de cause, l'Andra devra présenter pour la solution de référence qui sera retenue une architecture des quartiers HA compatible avec le respect du critère THM en intégrant toutes les incertitudes qui subsisteront à cette date.*

*Dans le cadre de la flexibilité de la réalisation du quartier HAVL de Cigéo, qui n'interviendra que dans plusieurs décennies, la Commission recommande que l'Andra propose une expérience permettant de tester le modèle THM à une échelle pertinente.*



### 1.7.2 La question de la désaturation-resaturation du massif et de la migration des gaz

L'Andra a étudié pour son dossier 2009 les transitoires de désaturation-resaturation du massif au cours de la vie du stockage. Selon l'Andra, il semble que la ventilation engendre une désaturation qui se développe au moins jusqu'aux limites de la zone endommagée autour des ouvrages et que ce phénomène ne soit pas empêché par la présence d'un revêtement en béton. En revanche, l'arrêt de ventilation ne provoque pas un retour de l'eau aussi rapide que son départ, de sorte que la resaturation est bien plus longue que la désaturation. Ce mécanisme tient au fait que les conditions à la limite du problème hydrique sont très dissemblables dans les deux cas. Une faible humidité est imposée lorsque la ventilation est active, alors que l'humidité est laissée libre de remonter vers l'équilibre hydrique dans le cas contraire.

La teneur en eau au sein de l'argilite intervient au moins à deux niveaux affectant le champ proche.

1. Un premier niveau concerne le gonflement de l'argilite au cours de la resaturation, phénomène avéré pouvant avoir des conséquences mécaniques sur le revêtement tel qu'évoqué ci-après ;
2. Un second niveau implique la migration de l'hydrogène dans la porosité ou la microfissuration de l'argilite du champ proche et des matériaux de structure. Une faible teneur en eau favorise la migration du gaz et la dissipation de la pression alors que l'argilite resaturée constituera une barrière qui provoquera une augmentation de la pression du gaz avec risque de fracturation.

*La Commission recommande à l'Andra de s'assurer que tous les transitoires faisant intervenir les mécanismes de désaturation-resaturation et de dégagement d'hydrogène ont bien été pris en compte, eu égard aux incertitudes sur le régime thermique et aux couplages hydrauliques entre les différentes zones du stockage.*

19

### 1.7.3 Le dimensionnement du revêtement des galeries et des alvéoles

L'Andra, au cours des dix dernières années, a conduit un ensemble remarquable de mesures et d'essais mécaniques dans les galeries du laboratoire souterrain. Cet ensemble se place au meilleur niveau de ce qui a été fait dans le monde dans des installations comparables. Il concerne aussi bien la description des fractures affectant la zone endommagée et l'observation du comportement thermo-hydro-mécanique intrinsèque de l'argilite que des essais plus technologiques comparant diverses méthodes de creusement, divers choix de revêtement et d'instant de pose du revêtement.

Pour autant, l'Andra n'est pas encore parvenue à proposer un modèle du comportement mécanique permettant de rendre compte de la totalité des observations. Plusieurs modèles paraissent coexister – c'est-à-dire ceux des producteurs, de l'Ineris, des maîtres d'œuvre, des partenaires universitaires – qui ne sont pas complètement compatibles entre eux. L'absence d'une vision unifiée et partagée s'explique par la complexité du problème, le comportement du matériau étant viscoplastique et hydromécanique, affecté aussi bien par les variations de température que par le niveau de saturation. La différence très marquée entre les formes prises par la zone endommagée (désigné par l'acronyme anglais *excavation damaged zone* EDZ) suivant l'orientation des galeries/alvéoles est très bien décrite mais difficile à expliquer, l'écart entre contraintes horizontales principales n'étant pas extrêmement important.

On dispose donc d'une très grande richesse de données, qui permettent une bonne connaissance empirique du comportement – bien supérieure à celle dont on dispose en général lors de la construction d'un tunnel, par exemple – mais qui concernent des durées de temps encore inférieures à la dizaine d'années. Par contre il manque un modèle et un ensemble de relations mathématiques qui permettraient une extrapolation bien fondée à des durées plus longues, de l'ordre du siècle ou supérieures.

### a) Spécificité du stockage profond

Les galeries et alvéoles du stockage ne sont pas des ouvrages parfaitement comparables à un tunnel – dont la durée de vie peut être aussi longue. En effet, même s'il sera sans doute possible d'exercer une surveillance, il deviendra notamment extrêmement difficile après un certain temps d'accéder à certains alvéoles remplis de déchets et donc d'y effectuer des réparations ou confortements. Il est plus important dans le cas de Cigéo que dans celui d'un tunnel ordinaire d'effectuer d'emblée un dimensionnement des revêtements qui tienne compte des charges réellement supportées à long terme (résultant des déformations différées du revêtement et de la roche hôte). Il faut donc pouvoir extrapoler les connaissances acquises à des durées beaucoup plus longues. L'absence d'un modèle robuste et validé se fait alors sentir.

### b) Caractériser les grands traits du comportement à long terme (au-delà d'un siècle)

Plusieurs hypothèses peuvent être faites ; elles ne dépendent pas du détail du comportement de la roche dans les conditions réelles de l'ouvrage, mais plutôt de quelques grands traits du comportement du massif (et de l'EDZ) qui déterminent le dimensionnement du revêtement (épaisseur et/ou qualité du béton).

Dans la plus simple des hypothèses, l'argilite se comporte à l'échelle du siècle comme un fluide visqueux, le revêtement supportant à terme la totalité des contraintes naturelles qui semblent légèrement anisotropes mais proches du poids des terrains sur-incombants, soit de 11 à 13 MPa. Le revêtement doit être calculé en conséquence, avec les marges nécessaires.

Dans la plus favorable des hypothèses, l'argilite présente un seuil suffisamment grand en-dessous duquel il n'y a pas de déformations viscoplastiques ; ou encore, compte tenu de la viscosité de l'argilite, de la raideur et du temps de mise en place du revêtement, l'équilibre ultime n'est atteint qu'après des périodes beaucoup plus longues qu'un siècle. La discussion est compliquée par la constatation suivant laquelle les déformations différées sont surtout actives dans la zone micro-fracturée. Le revêtement ne supporterait à long terme qu'une certaine fraction du poids des terrains. Le revêtement peut alors être moins épais que dans la première hypothèse.

La troisième hypothèse, beaucoup plus défavorable et sans doute trop pessimiste, est celle dans laquelle, à terme, le massif ferait porter au revêtement plus que le poids des terrains sur-incombants. Ce ne serait pas impossible si le gonflement de l'argilite en présence d'eau – dont l'existence est tout à fait avérée – se manifestait avant une durée d'un siècle. En effet, on ne peut écarter d'emblée l'hypothèse qu'au moins localement, la resaturation, bien que très lente, soit plus rapide que prévu et engendre un gonflement dont les effets s'ajouteraient alors à ceux du poids des terrains. Dans ce cas le revêtement devrait sans doute être particulièrement épais.

*La Commission considère que le point à traiter en priorité est celui de la nature exacte du comportement mécanique du massif rocheux à l'échelle du siècle qui est celle requise pour le fonctionnement de l'ouvrage en mode actif.*

La Commission observe que l'Andra paraît privilégier un modèle, dit de l'Ineris/Andra, qui prévoit un seuil visco-plastique et une décroissance au cours du temps de la vitesse de déformation sous charge constante – deux hypothèses plutôt optimistes qui conduisent à sélectionner un revêtement moins épais.

*La Commission estime qu'il est essentiel que les traits principaux du modèle de comportement mécanique à long terme du massif rocheux soient justifiés par une argumentation très solide.*

*La Commission souhaite disposer dans les plus brefs délais d'une étude comparative des différents modèles de comportement différé de la roche hôte.*

#### **1.7.4 La problématique des zones endommagées par le creusement (EDZ)**

Le rôle pour la sûreté de la zone endommagée par le creusement, à la paroi des galeries (EDZ), est une préoccupation commune à tous les projets de stockage, quelle que soit la roche hôte. On peut craindre qu'une telle zone ne forme, entre le massif intact et les galeries remblayées ou scellées, un "fourreau" plus perméable qui permette la circulation des eaux, éventuellement chargées de radionucléides, vers les ouvrages d'accès, constituant ainsi un court-circuit de la barrière géologique. Un tel mécanisme exige, toutefois, en plus d'une perméabilité accrue, l'existence de gradients hydrauliques qui constituent le moteur d'une circulation. Dans le cas des massifs argileux, les conséquences de ce mécanisme sont vraisemblablement grandement atténuées par la capacité de sorption par l'argile d'au moins certains radionucléides, qui retarde sensiblement la circulation effective de ceux-ci.

##### **a) L'EDZ dans Cigéo**

L'Andra a acquis une bonne image des zones endommagées, dont la forme dépend beaucoup de l'orientation des galeries, et dispose de nombreuses mesures de la perméabilité locale, qui est une perméabilité de (micro) fracture. En revanche, elle ne dispose pas de mesure de la perméabilité à plus grande échelle (décamétrique pour fixer les idées) dans la direction parallèle à l'axe des galeries. Une telle mesure permettrait d'apprécier le rôle éventuel de court-circuit hydraulique du "fourreau" mais elle est difficile à faire par construction. En l'état actuel la détermination de la perméabilité en grand de l'EDZ relève de la modélisation.

##### **b) La cicatrisation de l'EDZ**

L'Andra estime que la perméabilité artificielle de l'EDZ pourrait diminuer au cours du temps (à l'échelle séculaire) sous l'effet de deux mécanismes :

- d'une part, la convergence du massif vers les galeries revêtues reconstituera au moins en partie l'état de contraintes naturel du massif, ce qui contribuera à refermer les (micro) fractures et à rétablir une faible perméabilité. Des essais de poinçonnement du massif, inspirés de ceux conduits au Mont-Terri, ont bien mis en évidence ce phénomène. Toutefois l'Andra dispose de résultats qualitatifs qui ne sont pas généralisés sous forme d'équations de comportement, ce qui amoindrit leur portée. Par ailleurs l'hypothèse faite par l'Andra que l'argilite est visco-plastique implique aussi que la restitution de l'état de contraintes initial n'est pas complète, et donc que la perméabilité naturelle ne sera pas rétablie.
- d'autre part, l'Andra estime que le matériau endommagé reconstituera son étanchéité sous l'effet de la resaturation qui engendrera un gonflement d'une partie de la fraction argileuse du matériau rocheux. Il s'agit là aussi d'un phénomène avéré ; mais il semble que la resaturation soit un phénomène lent, réglé par la perméabilité du massif intact, qui est faible. Il faudrait en préciser la chronologie et pouvoir décrire via des relations de comportement la cinétique du gonflement.

La Commission doute que ces deux mécanismes conduisent à un retour rapide vers une faible perméabilité de l'EDZ dans le cas des revêtements souples, et ceci d'autant plus quand une couche très poreuse et perméable est interposée entre le revêtement et le massif pour différer l'application de contraintes élevées sur le revêtement. Ce point sera évoqué au paragraphe suivant.

*La Commission souhaite savoir comment l'Andra envisage de traiter la question de l'EDZ dans la demande d'autorisation de création. Elle souhaite en particulier être informée sur les modèles qui seront mis en œuvre et sur le scénario enveloppe qui sera, le cas échéant, produit. Elle recommande que le cas de la migration éventuelle des radionucléides qui sont faiblement retenus par l'argile soit examiné.*

#### **1.7.5 Le rôle hydraulique des matériaux à l'extrados des revêtements**

Outre la question de l'EDZ dans le champ proche, évoquée ci-dessus, la Commission s'interroge sur le rôle des matériaux placés à l'extrados des galeries et des alvéoles de stockage sur le déplacement des fluides.

De récentes évolutions de concept de la part de l'Andra proposent que des matériaux compressibles, et donc poreux et perméables, soient placés entre le revêtement et la roche afin de différer l'application d'une partie du chargement tout en permettant la pose précoce du revêtement définitif. Ces zones verront leur perméabilité diminuer au fur et à mesure de la convergence du massif, mais resteront vraisemblablement longtemps très perméables en comparaison de l'argilite saine et même de l'argilite endommagée dont les fissures se seront finalement cicatrisées. La question de leur influence sur la circulation des fluides dans le champ proche des alvéoles et des galeries se pose donc. Ce rôle pourra concerner l'hydrogène issu de la radiolyse ou de la corrosion anoxique mais aussi l'eau pendant la phase de resaturation. Cette situation complique la modélisation des différents phénomènes transitoires et de leurs couplages.

*La Commission demande à l'Andra de s'assurer que l'utilisation de matériaux compressibles à l'extrados des galeries et alvéoles de stockage n'induit pas, aux différentes époques de la vie du stockage, de circulation de fluides préjudiciables à son bon fonctionnement.*

#### **1.7.6 Le scellement des galeries et des liaisons surface-fond**

La Commission a, à plusieurs reprises, insisté sur la nécessité de disposer en 2018, dès le dépôt de la demande d'autorisation de création, d'un concept crédible pour le scellement des galeries. Elle remarque que les éléments nécessaires n'auront pas tous pu être validés à l'échelle 1 à cette étape de la procédure. L'Andra aura cependant à ce moment réuni un important corpus de résultats d'expériences et de modélisations portant sur le comportement des différents composants des scellements et sur les moyens de les mettre en œuvre.

*Concernant les scellements, la Commission recommande donc que pour la demande d'autorisation de création, l'Andra :*

- *tire pleinement parti des expériences en surface ou en souterrain ;*
- *présente, en appui des options de conception, un modèle de fonctionnement global des scellements aux différentes phases de la vie du stockage ;*
- *établit le détail des expérimentations à l'échelle 1 qui sont prévues dans Cigéo dès la phase industrielle pilote et définit les objectifs qui seront plus particulièrement recherchés dans ces expériences et leur échéancier.*

### 1.7.7 La surveillance

La surveillance sera nécessaire pendant toute la phase active du stockage. La phase industrielle pilote aura pour rôle de tester les équipements de surveillance et leur utilisation dans les conditions réelles de livraison des colis prévus dans le PIGD. Cette tâche devra s'appuyer sur un programme spécialement conçu pour évaluer le comportement des différents composants.

Les modalités de la surveillance au cours de la vie du stockage différeront selon la destination des ouvrages ; on peut ainsi distinguer :

- les ouvrages d'infrastructure et de service qui devront rester opérationnels pendant toute la phase d'exploitation jusqu'à la fermeture définitive du stockage. Ces ouvrages pourront être visités et entretenus ; leur surveillance sera utile pour acquérir des informations sur le long terme et anticiper des incidents ;
- les alvéoles de stockage inactifs de démonstration prévus en phase industrielle pilote qui pourront faire l'objet d'une surveillance renforcée sans craindre de compromettre la sûreté du fonctionnement à long terme ;
- les alvéoles de stockage en situation réelle qui sont destinés à être fermés et à fonctionner en mode passif à une échéance à déterminer. La surveillance doit y être conçue pour ne pas compromettre la sûreté à long terme ; elle sera adaptée en fonction des niveaux de récupérabilité qui seront atteints.

*La Commission recommande que, pour la demande d'autorisation de création, l'Andra définisse le programme de surveillance et les moyens qui permettront de le réaliser en distinguant les différents types d'ouvrages et leur fonction au cours de la vie du stockage.*

## 1.8 CHIFFRAGE DU COÛT DE CIGÉO

En 2014 l'Andra estimait le coût total à 33 milliards d'euros environ, un chiffre contesté par les producteurs qui à l'époque avançaient un chiffre proche de 20 milliards. La structure du coût était alors la suivante selon l'Andra : 19,8 milliards pour l'investissement, 8,8 milliards pour l'exploitation jusqu'en 2144 et 4,1 milliards d'impôts et taxes diverses. Après discussion avec les producteurs et convergences sur certains postes, au cours d'un processus dit d'optimisation au sein d'un groupe de travail mise en place par la DGEC, ce coût avait été ramené à un peu moins de 30 milliards courant 2015. Ces chiffres ne prenaient toutefois pas en compte certaines "optimisations supplémentaires" souhaitées par les producteurs. Sur cette base le coût de la première tranche semblait pouvoir se situer entre 5 et 6 milliards celui des autres tranches entre 8 et 9,5 milliards ; les coûts de fermeture étaient de l'ordre de 1 milliard et les coûts de jouvence avaient été estimés à 4,2 milliards. L'investissement total semblait donc avoisiner les 20 milliards. A cela s'ajoutaient les frais de fonctionnement sur la période durant laquelle le stockage est réputé demeurer ouvert, alors estimés à 9,4 milliards, ce qui faisait un total de 29,4 milliards pour ce projet.

La Commission estime qu'il n'y a rien de choquant à constater qu'il est aujourd'hui difficile d'estimer un tel coût sur une aussi longue période et que de nombreuses incertitudes subsistent. L'important à ses yeux est qu'une réévaluation périodique soit faite et qu'un accord existe sur le coût de la première tranche, qui est la plus proche donc la plus facile à estimer.

Comme l'a fait remarquer la Cour des comptes dans ses rapports de 2013 et 2014, le coût du stockage des déchets ne représente qu'entre 1 et 2 % du coût de production du kWh nucléaire. C'est donc nettement moins que 1 % du prix TTC du kWh payé par un consommateur domestique en France qui comprend le coût de production, le coût des réseaux et les taxes.

La Commission avait observé qu'il y avait un accord sur la conception d'ensemble du projet, au moins au niveau de la tranche 1 (phase de creusement et PIP), entre l'Andra et les producteurs, ce dont elle s'était félicitée. La Commission avait recommandé toutefois de procéder à une exploration de la zone MAVL par une galerie de reconnaissance développée au-delà de la zone concernée par la phase industrielle pilote sur la totalité du domaine des phases ultérieures. Cette option n'est pas chiffrée.

La Commission avait recommandé également de développer des efforts de R&D pour explorer les opportunités en débat. Il est à noter que les dépenses du Laboratoire de Bure ne sont pas comptabilisées ici, ce qui est normal puisqu'elles sont financées aujourd'hui par une taxe spécifique sur les INB. Il conviendrait de préciser ce que sera la situation demain, surtout si l'on souhaite, comme l'a déjà demandé la Commission, que des études de R&D y soient poursuivies dans le futur.

Un des enjeux des controverses qui opposent les producteurs de déchets à l'Andra réside dans le fait que la fixation du coût global du projet a un impact direct et immédiat sur le montant des provisions que les producteurs doivent prévoir. Une réévaluation importante du coût engendre *de facto* une augmentation sensible des provisions, ce qui peut peser sur la trésorerie des entreprises et indirectement sur le cours éventuel de l'action. La Commission avait recommandé pour cette raison de procéder tous les 3 à 5 ans à une réactualisation des estimations du coût de Cigéo, afin que les producteurs de déchets ne se retrouvent pas face à un effet "falaise" en raison d'un laps de temps trop long entre deux réévaluations.

Par un arrêté de janvier 2016 la Ministre en charge de l'Energie vient de retenir le chiffre de 25 milliards d'euros pour ce projet. C'est sur cette base que les producteurs doivent aujourd'hui ajuster leurs provisions. C'est donc sensiblement moins que le dernier chiffre que semblait retenir l'Andra.

*La Commission prend acte de ce chiffre officiel mais s'interroge sur la façon dont l'Andra va répercuter cette révision à la baisse et sur quels postes vont porter les ajustements.*

*La Commission recommande que les options techniques de la première tranche choisies d'un commun accord entre l'Andra et les producteurs soient maintenues et ne soient pas affectées par des considérations budgétaires.*

*Concernant les tranches suivantes, la Commission s'inquiète de percevoir des premiers signes d'une révision à la baisse des redondances et des marges (comme la substitution de certains scellements par des remblais). La Commission rappelle, à ce sujet, que la loi de 2006 indique que "Lors de l'examen de la demande d'autorisation de création, la sûreté du centre est appréciée au regard des différentes étapes de sa gestion, y compris sa fermeture définitive".*

## CHAPITRE 2 : GESTION DES DÉCHETS, ENTREPOSAGE, STOCKAGE DES DÉCHETS FAVL ET TFA

### 2.1 GESTION DES DÉCHETS

Le 21 avril 2015 l'ASN a émis une décision (DC-0508) concernant la gestion des déchets radioactifs et conventionnels produits dans les INB tout au long de leur vie. Elle reprend, en fait, de façon cohérente les dispositions antérieures et couvre les principes de zonage des INB, le contenu et les modalités des études dues au titre de divers décrets et les contenus des bilans de déchets que les producteurs doivent faire. Tous les aspects de la gestion des déchets doivent être examinés : réutilisation, recyclage et valorisation avant leur élimination dans une filière de stockage opérationnelle ou en devenir.

L'envoi en stockage est précédé d'un entreposage. La plupart des déchets à vie longue sont dans cette situation. Mais il existe de nombreux déchets en attente de reprise pour conditionnement et les déchets de démantèlement sont à venir. Les premiers sont surtout des déchets MAVL, les seconds sont surtout des déchets TFA.

Tous les déchets allant en stockage doivent être conditionnés pour répondre aux spécifications d'acceptation (voir rapport n°9). Les procédés de conditionnement sont au point pour la plupart des déchets issus des INB en exploitation. Pour les autres, de nouveaux conditionnements doivent être mis au point selon un référentiel qui est soumis à l'ASN pour obtenir les autorisations de production. Ces autorisations sont des gages de recevabilité ultérieure des colis en stockage. Par ailleurs le PNGMDR suit avec vigilance les actions de gestion des divers déchets et matières nucléaires et impose de nombreux points de rendez-vous aux producteurs de déchets ainsi que la tenue des inventaires. L'ASN a rendu début 2016 plusieurs avis concernant leur gestion.

La typologie des familles de colis de déchets à stocker est très variée. Il serait intéressant que la qualité de tous les colis primaires puisse être appréciée au regard de leur coût et performances sur la base de critères simples. A cet égard Areva utilise une approche rationnelle pour qualifier ses colis en examinant toutes les performances attendues en situation d'entreposage, d'exploitation du stockage et après fermeture de celui-ci.

Areva a ainsi défini 6 paramètres : 2 économiques (taux d'incorporation du déchet brut, économie du procédé de conditionnement) et 4 d'intégrité (matrice, conteneur, radiolyse, relâchement des constituants). Lors de la conception du colis les valeurs de chaque paramètre doivent être évaluées dans différentes conditions enveloppes. C'est l'objet de la R&D conduite autour du colis. On peut alors lui attribuer une note qualitative. Le colis idéal est celui pour lequel les notes ont chacune la valeur maximale. Cette méthodologie pourrait être étendue à tous les colis.

*La Commission encourage tous les producteurs à présenter les caractéristiques des colis primaires de déchets de façon homogène. L'approche d'Areva pourrait être étendue à tous les colis.*

### 2.2 OPÉRATIONS DE DÉMANTÈLEMENT

Areva, EDF et le CEA ont déjà conduit des opérations importantes d'assainissement - démantèlement (A&D) et ont plusieurs chantiers en cours, détaillés dans l'Annexe VI. Ces opérations sont suivies par l'ASN qui attend plusieurs dossiers d'Areva et du CEA sur le démantèlement et la gestion des déchets qui seront produits (point décennal attendu pour juin 2016). L'avancement du démantèlement des réacteurs UNGG d'EDF est lié à la mise en service

d'Iceda. L'A&D du réacteur de Chooz est la première expérience d'EDF en matière de démantèlement d'un réacteur REP.

Les enjeux de l'A&D sont partagés par l'Andra et les producteurs :

- inventaires des déchets au plus juste,
- spécifications des colis pour prise en charge en stockage,
- réduction des volumes à stocker au vu des capacités limitées de stockage des déchets TFA,
- recyclage des TFA et optimisation économique

La projection de l'Andra pour les déchets montre que les principaux problèmes de gestion viendront des TFA.

La R&D qui soutient les enjeux est assurée par le CEA pour les producteurs :

- caractérisation des installations et des déchets,
- traitement des effluents,
- des solides et conditionnement des déchets,
- outils d'intervention et de gestion.

Le CEA travaille avec de nombreux industriels. Le marché international du démantèlement est déjà conséquent et devrait croître.

L'Andra et l'agence nationale de la recherche (ANR) ont lancé fin 2014 un appel à projets innovants pour le soutien au démantèlement. Il visait tous les acteurs de la R&D du monde académique et industriel. Le deuxième appel d'offres vient d'être lancé (décembre 2015 – mars 2016).

*La Commission approuve la synergie qui existe entre les producteurs et l'Andra pour assurer la cohérence de la gestion des déchets de démantèlement et le lancement du premier appel d'offres de l'Andra pour une gestion optimisée de ces déchets.*

### 2.3 REPRISE ET CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS

Plusieurs opérations de reprise et conditionnement des déchets (RCD) se poursuivent (Annexe V). Elles concernent essentiellement les déchets MAVL historiques en entreposage à Marcoule et la Hague qui présentent une grande variété de typologies. Les difficultés de reprise conduisent à des opérations de grande ampleur qui s'étaleront encore sur des décennies.

Toutes ces opérations demandent *a minima* de caractériser les déchets avant conditionnement (inventaire en radionucléides et composition chimique) et de caractériser les colis primaires. Souvent la R&D concerne aussi le développement de nouveaux matériaux de confinement compatibles avec la nature physico-chimique des déchets. L'incidence de la radiolyse doit être appréciée dans chaque cas.

Les opérations de RCD du CEA et d'Areva sont programmées selon un calendrier compatible avec les chroniques du PIGD de Cigéo et l'ouverture d'un stockage FAVL. Areva prévoit de rédiger les dossiers de spécification des nouveaux colis primaires de la Hague (CSD-C HA0 et CFR-HA0) pour 2016. Pour les autres, la R&D doit avancer avant d'aboutir à cette étape. Les spécifications préliminaires pour acceptation dans Cigéo sont en cours de discussion entre les producteurs et l'Andra (voir rapport n°9 et chapitre 1). Rien ne concerne pour l'instant les colis de déchets FAVL.



Le conditionnement différé comporte plus de contraintes que le conditionnement en ligne, sans parler de la récupération et, s'il est possible, du tri des déchets. En effet il concerne souvent des lots de déchets très hétérogènes, chaque constituant ayant ses propres caractéristiques, et le conditionnement doit en tenir compte. Par ailleurs les lots sont parfois de faible tonnage.

*La Commission est attentive aux développements de la reprise et du conditionnement des déchets qui sont entreposés depuis des décennies. Elle souligne la nécessité d'aboutir à des colis primaires robustes compatibles avec le stockage.*

*La Commission recommande d'accélérer la R&D sur le conditionnement des déchets à reprendre sur les sites du CEA et d'Areva. Elle considère qu'une meilleure coordination des acteurs de la R&D devrait être envisagée et souhaite que lui soit présentée une synthèse de l'avancement de ces travaux.*

## 2.4 ENTREPOSAGE DES COLIS DE DÉCHETS

L'entreposage des colis de déchets est nécessaire à la gestion courante des déchets mais il s'inscrit, s'il dure longtemps, dans la complémentarité du stockage (flexibilité d'attente de mise en service des stockages, décroissance d'activité des déchets avant stockage, surveillance des colis). Un entreposage serait de nouveau nécessaire au cas où la décision de récupérer des colis de Cigéo serait prise.

Aujourd'hui 60 % des colis de déchets MAVL et 30 % des colis HA du PIGD sont déjà produits. Ils sont en entreposage en attente d'expédition vers Cigéo. Les premiers colis MAVL sont attendus dans les alvéoles de Cigéo dans la seconde phase de la PIP (vers 2030) ainsi que les premiers colis HA0. Les premiers colis HA1 devraient arriver en 2075.

27

Le retour d'expérience sur l'entreposage industriel des colis s'accumule depuis plus de 50 ans. Les entreposages récents sont adaptés aux débits de dose des colis, au temps prévisible d'entreposage (entre 50 et 100 ans) et aux besoins des producteurs. Toutefois, la construction des entreposages est longue et les prévisions doivent être évaluées une décennie avant le besoin.

Le CEA entrepose depuis 2006 ses colis MAVL (hors bitume) dans Cedra (Cadarache) et depuis 2000 ses colis MAVL et FAVL bitumes dans EIP (Marcoule). Les colis HA0 sont dans l'entreposage SEV à Marcoule. L'entreposage Diadem à Cadarache pour les déchets FMA-VC et MAVL alpha de démantèlement sera mis en service en 2018. Areva entrepose depuis 1989 les colis HA à La Hague dans plusieurs installations et en construit périodiquement de nouvelles. Il en est de même pour les colis MAVL depuis 1987. EDF construit Iceda sur le site du Bugey pour entreposer à partir de 2018 des déchets d'exploitation et de démantèlement des centrales.

D'après le PIGD (version D de 2014) la totalité des colis de déchets HA1 et 2 (51 886 colis) qui doivent refroidir pendant au moins 75 ans, sera entreposée à La Hague avant leur envoi à Cigéo (entre 2075 et 2140).

L'entreposage sur le site de Cigéo sera limité à la gestion des flux de colis.

L'entreposage des déchets FAVL destiné au stockage FAVL ou en attente d'être repris pour un conditionnement provisoire ou définitif est traité dans la section 2.8 et l'Annexe VII.

## 2.5 TRANSPORT VERS CIGÉO

Tous les colis HA1 et HA2 resteront à la Hague jusqu'en 2075 et il n'y a pas d'urgence particulière à définir comment ils seront acheminés vers Cigéo. Pour les autres colis les chroniques de transport du PIGD prévoient des transferts dès 2030 depuis la Hague (21 % des colis CSD-U HA0, 51 % des colis MAVL) et depuis les entreposages CEA (Marcoule et Cadarache) et EDF (Bugey).

Cela exige des emballages de transport agréés et une flotte adaptée. L'expérience d'Areva dans ces domaines est conséquente tant dans la conception, la fabrication et l'exploitation des emballages que dans la logistique de transport. En effet Areva a déjà retourné à ses clients étrangers des colis CSD-V et CSD-C et transporte couramment les assemblages de CU et les matières nucléaires du cycle.

La plupart des emballages qui pourraient servir pour le transport des colis MAVL et HA0 existent déjà. Il faut cependant, pour la plupart, aménager leur structure interne pour les adapter à la géométrie et la masse des colis à transporter et il faut qu'ils soient agréés par l'ASN pour les usages envisagés. Cela implique de la R&D (matériaux, radiolyse, ...) au moins pour tous les colis qui diffèrent des colis standard type CSD-V et CSD-C. Seuls les emballages pour ces colis sont agréés (TN843 et TN28).

Tous les emballages retenus seront disponibles ou pourront être fabriqués en quantités suffisantes pour les besoins d'Areva tout au long de l'exploitation de Cigéo. Areva propose de coordonner les programmes d'études de transport des différents acteurs. Areva présentera un nouvel état de la question des transports des colis vers Cigéo en 2016.

*La Commission prend acte des études et propositions d'Areva concernant le transport des colis de déchets vers Cigéo. Les transports seront nombreux et seront une partie visible de l'exploitation de Cigéo. La Commission souhaite être informée de l'évolution du dossier en rapport avec les chronologies de livraison du PIGD et des prévisions relatives aux déchets secondaires issus de l'exploitation des emballages.*

## 2.6 TFA

### 2.6.1 Gestion des TFA

Le Cires (ICPE) situé à Morvilliers est un centre de stockage des déchets TFA en alvéoles-tranchées dans l'argile de l'Aptien. Il est doté d'installations de traitement des déchets par compactage (déchets métalliques et plastiques) et de plusieurs bâtiments pour le regroupement de déchets radioactifs non nucléaires (et de tri à partir de 2016) et leur entreposage pour décroissance (déchets d'assainissement de sites pollués). La capacité autorisée de stockage est de 650 000 m<sup>3</sup>. Lorsqu'une tranchée a été remplie sous abri elle reçoit immédiatement une couverture définitive.

Le taux de remplissage du Cires est de plus de 40 %. Le flux est de 25 à 30 000 m<sup>3</sup>/an dont presque la moitié de TFA quasiment inactifs (radioactivité estimée inférieure au Bq/g). Il sera saturé vers 2030.

Les spécifications d'acceptation des déchets portent à la fois sur la radioactivité des colis de déchets (activité massiques et quantités), sur leur contenu physico-chimique et sur leur conditionnement. Elles permettent une exploitation souple et en continu des déchets TFA. Au-delà des colis classiques (big-bag, fûts, paniers et caissons injectés de ciment) le Cires accepte de grosses pièces unitaires (entre 12 et 24 tonnes). Pour les objets au-delà de cette taille (dits

hors normes), un alvéole est en cours de construction pour les recevoir avec des équipements lourds de manutention (portique).

Les besoins en capacité de stockage des déchets TFA ont été évalués jusqu'en 2080. Ils sont considérables. La première disposition pour assurer la continuité du stockage des TFA est une extension de la capacité du Cires dès 2030. Elle est possible jusqu'à 900 000 m<sup>3</sup> sans en augmenter l'emprise et sans compromettre le confinement des radionucléides après fermeture, qui repose sur la garde d'argile (7 m) sous les tranchées. L'Andra doit déposer une demande d'autorisation d'extension.

Au-delà de l'extension de la capacité de stockage du Cires, il faudra aussi ouvrir un nouveau Centre de stockage pouvant accepter 30 000 m<sup>3</sup>/an avec une capacité de 0,6 à 1,2 million de m<sup>3</sup> pour absorber les TFA issus du démantèlement du parc d'ici à la fin du siècle. La fourchette dépend des possibilités de recyclage des métaux et des gravats. En particulier, les flux volumiques de TFA pourraient être réduits par fusion des métaux (12 000 m<sup>3</sup>/an), incinération (2000 m<sup>3</sup>/an) et compactage (2000 m<sup>3</sup>/an) de matériaux (Annexe VIII).

L'Andra a établi en accord avec les producteurs de déchets TFA un schéma industriel de gestion des TFA comportant plusieurs scénarios conformes à la stratégie énergétique actuelle de la France mais préservant dans tous les cas la continuité du service. Ce schéma doit être optimisé et consolidé. L'Andra envisage la possibilité d'un stockage TFA simplifié sur sites (de démantèlement par exemple) qui pourrait être l'alternative à la "libération" pratiquée à l'étranger en matière d'économie de capacité de stockage. En effet, en France, la réglementation actuelle relative aux déchets produits dans les installations nucléaires conduit à gérer les déchets contaminés ou activés, mais aussi des déchets susceptibles de l'être, dans des filières dédiées.

## 2.6.2 Valorisation des TFA

Actuellement seul un volume très limité d'acier est valorisé sous forme de protections radiologiques dans des colis de déchets radioactifs.

Beaucoup de discussions technico-économiques sur la valorisation des TFA, s'appuyant sur des projets concrets ont eu lieu au niveau du PNGMDR (Annexe VIII). A cet égard la Commission a auditionné la DGEC sur les travaux du PNGMDR le 9 décembre 2015 et a assisté à l'audition de l'IRSN du 17 février 2016 par l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et techniques.

### a) Les travaux du PNGMDR

Le groupe de travail mis en place dans le cadre du PNGMDR s'est attaché à définir les conditions favorables à la valorisation de matériaux contaminés, activés ou susceptibles de l'être, produits dans les installations nucléaires.

Il s'est plus particulièrement intéressé aux conditions de valorisation de matériaux métalliques ferreux qualifiés de très faible activité. Il formule des recommandations et propose des axes de travail sur :

- le plan technique, avec notamment l'identification de typologies de matériaux et procédés permettant l'obtention de caractéristiques physico-chimiques et radiologiques favorables pour la valorisation ;
- les filières de valorisation, avec l'identification d'installations adaptées en fonction des enjeux sanitaires, environnementaux, sociétaux et de radioprotection posés par la typologie des substances à chacune des étapes de traitement et des modalités de traçabilités associées ;
- les débouchés envisageables, en proposant une hiérarchisation de ces derniers visant à garantir autant que possible la traçabilité des matériaux valorisés ;
- l'analyse des options de gestion, une analyse globale (cycle de vie) devant permettre de comparer les inconvénients et avantages des différentes solutions envisageables ;

- les modalités d'information et de participation des parties prenantes, sur le plan local et national ;
- le contenu des dossiers de dérogation prévus par la réglementation dans le cas d'une valorisation en dehors de l'industrie nucléaire.

Le groupe de travail a produit 14 recommandations ayant trait à la valorisation des déchets (Annexe IX).

#### **b) Les travaux de l'IRSN<sup>1</sup>**

L'IRSN estime "que la reconduction à l'identique des modes de gestion actuels n'est pas nécessairement la solution optimale, et que la diversification des solutions de gestion est souhaitable dès lors qu'elle permet la minimisation et un partage équitable des risques et nuisances de toute nature induits par les modes de gestion envisageables et qu'elle favorise un usage de ressources mieux proportionnées au risque réel que présentent les déchets."

L'IRSN estime "que les choix d'évolution de doctrine ne pourront toutefois être valablement arrêtés que si la société civile y est pleinement associée. Il y a donc lieu de créer les conditions permettant de débattre des enjeux et des voies à explorer."

A cet égard, l'IRSN considère "que tous les aspects du sujet doivent être abordés, qu'il s'agisse des méthodologies techniques à mettre en œuvre pour caractériser les risques tant radiologiques que conventionnels associés aux modes de gestion, ou des questions éthiques pouvant découler par exemple de la définition de seuils radiologiques de gestion et d'un niveau de dose en deçà duquel les modes de gestion susceptibles de la délivrer, aujourd'hui comme dans le futur, pourraient être considérés comme "optimisés" et équitables."

#### **c) Point de vue de l'ASN**

30

Dans l'avis 2016-AV-0258 l'ASN exclut toute notion de seuil de libération pour les TFA des INB (sauf rares dérogations). Cet avis est motivé par des considérations de santé publique et la nécessité de garantir, comme pour les autres déchets, la traçabilité des TFA dans des filières spécifiques, ce dernier point relevant de considérations réglementaires. L'ASN endosse les recommandations du PNGMDR pour les déchets métalliques et les gravats, et à cet égard, elle attend des propositions d'Areva (diffuseurs d'Eurodif) et d'EDF (générateurs de vapeur) pour y répondre. Elle attend aussi des producteurs une diminution des volumes à stocker (tri, incinération, densification) et des propositions pour un nouveau site de stockage TFA et des installations locales de stockage dédiées.

#### **d) Conclusion et recommandation**

Dans son rapport n°9, la Commission avait analysé la gestion des déchets à l'international. Elle a noté la disparité des solutions adoptées. Elle s'était inquiétée de ce que les démantèlements programmés et à venir allaient générer de grandes quantités de déchets TFA et que la capacité du Cires serait notoirement insuffisante pour les accepter. Elle attirait également l'attention sur les incertitudes de l'inventaire.

*La Commission encourage les organismes de recherche, les industriels et les autorités à poursuivre leurs études sur les modalités innovantes de gestion des matériaux issus du démantèlement, classés comme des déchets bien que contenant peu ou pas de radioactivité ajoutée.*

---

<sup>1</sup> Rapport IRSN/DG/2016-00002

*La Commission renouvelle sa recommandation au sujet de la mesure des très faibles radioactivités de lots importants de matériaux : celle-ci devra être au point pour accompagner toute stratégie innovante de gestion des déchets TFA.*

## 2.7 DÉCHETS À RADIOACTIVITÉ NATURELLE RENFORCÉE

Ces déchets sont aussi connus sous le sigle anglais Tenorm (Technical Enhanced Natural Occuring Radioactive Materials). Ils proviennent du traitement de minerais ou de matériaux (dits Norm) qui, en raison de l'ubiquité de la radioactivité naturelle, concentre le <sup>40</sup>K et les radioéléments des chaînes naturelles. Contrairement à certains déchets TFA issus d'INB potentiellement radioactifs il n'y a pas d'ambiguïté sur l'origine de la radioactivité des Tenorm.

Les Tenorm sont produits en grandes quantités par de très nombreuses activités industrielles bien répertoriées. Leur activité massique (1 à 100 Bq/g) peut atteindre (voir dépasser) les limites de celle des TFA. Certains sont valorisés (cendres dans le ciment, remblais, produits de construction, ...) mais la plupart sont stockés *in situ* ou dans des installations habilitées de stockage de déchets conventionnels dangereux (4 ISDD en France ont reçu 120 000 t de Tenorm durant les dix dernières années) ou encore avec les TFA au Cires (2 100 m<sup>3</sup> stockés fin 2013) et certains devraient même aller en stockage FAVL (industries des terres rares et zircon, 21 000 m<sup>3</sup> prévus).

### 2.7.1 Cadre législatif

Les déchets Tenorm-TFA et Tenorm-FAVL qui sont bien identifiés à l'inventaire Andra bénéficient d'une double appellation portant à confusion dans le langage courant. Beaucoup de déchets Tenorm sont entreposés sur les sites de production en attente d'un mode de gestion.

La circulaire du 25 juillet 2006 donne le cadre de la gestion des Tenorm. La transposition de la directive 2013/59/Euratom traitant de la radioprotection dans les activités humaines est en cours. Elle conduira à considérer ces déchets comme des déchets résultant d'activités nucléaires. Ce changement de statut complique leur gestion. Il pose les problèmes généraux de cohérence de la gestion des déchets de très faible activité massique au regard de leurs impacts radiologiques : exemption (Norm peu radioactifs) et libération (Tenorm). Les déchets Tenorm ne sont pas soumis aux mêmes corpus réglementaires que les déchets TFA mais les considérations de santé publique demeurent. En dessous des seuils de libération (quelques Bq/g) ils rejoindraient les différentes ISDD selon leur nature chimique et les filières TFA et FAVL au-dessus des seuils. Ce nouveau statut pose aussi les problèmes particuliers des déchets en grandes quantités : inventaires, stockage *in situ*, stockage centralisé, transport et celui de la reprise éventuelle des Tenorm déjà stockés dans les ISDD. La nouvelle façon de prendre en compte les Tenorm dans la législation appelle une clarification dans la classification des déchets de très faible radioactivité en fonction des filières.

Ces nouvelles dispositions renvoient, pour ce qui concerne la R&D, à la caractérisation radiologique des Tenorm aussi, sinon plus difficile, que celle des TFA, qui viendra en sus de leur caractérisation du point de vue de la toxicité chimique. La liste des industries non nucléaires en cause, déjà longue, est en cours d'extension à des industries jusqu'ici non concernées par la législation.

*La Commission demande à l'Andra d'évaluer les conséquences de la transposition de la Directive 2013/59/Euratom en l'absence de toute valorisation/dérogation sur le volume de TFA à traiter.*

## 2.7.2 Déchets historiques du procédé de conversion (site AREVA de Malvési)

Dans ses rapports n°8 et 9, la Commission a fait état de l'existence sur le site de Malvési, près de Narbonne, de résidus de traitement de conversion de l'uranium (RTCU). Ils résultent de la production d'UF<sub>4</sub> par l'usine Comurhex I. Certains déchets anciens produits à partir d'uranium de retraitement contiennent des traces de produits de fission et d'émetteurs alpha ce qui a conduit à la création de l'INB Ecrin pour leur gestion. Les autres déchets produits à partir d'uranium naturel sont des Tenorm et sont gérés dans une ICPE.

Le décret du 12 juillet 2015 autorise Areva à créer et exploiter l'INB d'entreposage Ecrin pendant 30 ans. Elle va regrouper les déchets RTCU déposés dans les bassins B1 et B2, les déchets des bassins B5 et B6 et éventuellement des déchets à produire sur 30 ans (voir ci-dessous). Il faut 5 ans pour la mise en service d'Ecrin. L'autorisation est donnée pour 400 000 m<sup>3</sup> et 120 TBq dans Ecrin. Le reste des 690 000 m<sup>3</sup> à l'inventaire 2015 seront gérés dans l'ICPE. Les dépôts de déchets dans Ecrin recevront sur 6 hectares une couverture bitumineuse multicouche pour la durée de vie de l'INB.

A moyen terme, l'usine Comhurex II, qui est prête à démarrer, devrait bénéficier de plusieurs innovations visant à réduire le volume de ses effluents, et donc celui des nouveaux déchets qui seront produits jusqu'à la fin de vie des deux usines. Compte tenu en particulier des modifications importantes du futur procédé de purification de l'uranium, 90 % des futurs déchets d'exploitation pourront être gérés dans la filière TFA. Les 10 % restants (boues déshydratées des traitements des nitrates et gypse) posent des problèmes de procédé (réduction de leur teneur en nitrates) et des problèmes de gestion (stockage FAVL sur site ou à proximité). Leur stockage dans Ecrin semble écarté.

Areva envisage en fin de vie d'Ecrin un stockage définitif, sur site ou à proximité, des déchets historiques (Comhurex I) et d'une fraction des déchets à venir (Comhurex II). Sa faisabilité est examinée depuis quelques années. La R&D est pilotée par un groupe d'experts internationaux et est programmée jusqu'à la fin de 2017, date à laquelle pourrait être sélectionné un scénario de stockage.

L'inventaire des déchets est connu. Les radionucléides à confiner contenus dans les divers déchets sont l'uranium, le thorium et <sup>226</sup>Ra, en proportion variables, et leurs descendants. Ils sont plus ou moins lixiviables à partir des minéraux où ils se trouvent et plus ou moins retenus par les matériaux géologiques. Les mesures en cours pour caractériser leurs comportements montrent que les stériles miniers de la mine de soufre utilisés en sous-bassement des bassins sont de bons capteurs de l'uranium, seul élément vraiment lixiviable.

*La Commission considère que les études pour gérer à long terme les déchets de Malvési par stockage in situ n'en sont qu'à leur début. Elle suivra avec attention le déroulement de la R&D en amont de la qualification d'un concept de stockage, R&D qui est à la fois générique (caractérisation des déchets, terme source) et spécifique (géologie, hydrogéologie du site).*

L'instruction de la faisabilité de 3 concepts différents de stockage, présentés à la Commission en novembre 2015, est en cours, et sera finalisée en 2017 :

1. La première piste envisagée est celle d'un stockage de surface sous couverture ouvragée. Sans doute la plus facile à mettre en œuvre puisqu'elle est la moins dépendante du milieu géologique sous-jacent, cette solution est très proche de celle adoptée par l'Andra au Cires. Il n'en demeure pas moins qu'une telle solution devra assurer un confinement des radionucléides et des autres produits toxiques sur le long terme, et doit donc être suffisamment robuste pour résister à l'érosion, et très peu perméable pour éviter toute dilution et diffusion de la radioactivité et des polluants chimiques vers les aquifères et la biosphère.

2. La seconde prévoit de stocker les déchets à faible profondeur sous couverture ouvragée dans l'ancienne mine de soufre adjacente au site de Malvési, bénéficiant ainsi d'une cavité déjà existante. Cette fosse de 40 m de profondeur, creusée dans les couches très faiblement perméables et réductrices de l'Oligocène inférieur gris, est actuellement noyée par des eaux sans doute issues du ruissellement de surface. Il faudra néanmoins s'assurer ici de la faible perméabilité du stockage futur, tant vis-à-vis de ces mêmes eaux de surface, que de celles susceptibles d'être échangées avec les aquifères adjacents intra-oligocènes, ou avec les aquifères karstiques des calcaires jurassiques sous-jacents, les failles normales oligocènes pouvant aussi bien servir de drain préférentiel pour les fluides.
3. La dernière, ciblant aussi un stockage à faible profondeur dans les séries faiblement perméables mais plutôt oxydantes de l'Oligocène supérieur rouge, sous couverture remaniée, nécessite par contre le creusement d'une nouvelle cavité. Les premières prospections géologiques (2 forages de reconnaissance) et géophysiques (3 profils de sismique réflexion) ont permis de contrôler les variations latérales d'épaisseur des couches oligocènes, comprises entre 100 et 300 m dans cette partie du bassin, et dont les faibles perméabilités mesurées devraient constituer une barrière naturelle pour les transferts chimiques. L'existence de plusieurs failles normales a manifestement contrôlé la géométrie du centre du bassin et la compartimentalisation des séries sédimentaires. Il conviendra donc de consolider le modèle géologique à l'échelle régionale, pour prendre en compte la géométrie profonde des fractures et les échanges possibles entre les séries salifères du Trias, les réservoirs karstiques des carbonates mésozoïques, les aquifères silico-clastiques des séries cénozoïques, et les zones de recharge hydraulique (montagne de La Clape et Corbières) ou de résurgence (Massif de Montlaurès).

*En complément des modélisations en cours portant sur le comportement des couvertures et des fluides au voisinage même du futur stockage, la Commission recommande d'entreprendre des modélisations d'écoulements à une échelle plus régionale, prenant en compte la compartimentalisation par les failles (drains ou conduits), les karsts mésozoïques et les aquifères cénozoïques.*

## 2.8 FAVL

Le rapport d'étape de l'Andra de juin 2015 couvrant la période 2012 à 2015 met à jour l'inventaire et les caractéristiques des déchets FAVL, sans apporter de modification majeure aux typologies et quantités rapportées dans les rapports n°8 et 9 de la Commission. Il donne aussi les premiers éléments de calculs simplifiés pour apprécier la sûreté d'un stockage FAVL sous couverture remaniée (SCR) dans les argiles tégulines du site géologique en cours d'investigation. Deux concepts de stockage sont envisagés, l'un en galerie, l'autre en terrassement depuis la surface.

L'inventaire radiologique des déchets FAVL (annexe VII) est consolidé au fur et à mesure que les producteurs de déchets poursuivent les mesures. Les difficultés pour l'établir viennent évidemment des faibles activités massiques des déchets FAVL ou des faibles énergies des rayonnements émis (20 Bq/g en  $^{238}\text{U}$  ou  $^{232}\text{Th}$ , 60 Bq/g en  $^{226}\text{Ra}$  en moyenne).

L'Andra aura des données consolidées en 2018 (graphite du CEA, chemises EDF). A cette date un nouvel inventaire plus précis des radionucléides devrait être établi.

La révision à la baisse des inventaires en radionucléides, conséquence de mesures précises et non de l'utilisation de valeurs enveloppes, est plutôt favorable pour envisager un stockage SCR, voire pour réorienter certains déchets vers d'autres filières. Outre la diminution de l'inventaire de radiotoxicité des déchets, les effets de la radiolyse sont réduits notamment pour les bitumes (pas

de production d'hydrogène) et seul leur gonflement sous eau à long terme peut rester une contrainte.

Pour autant la R&D sur le traitement des déchets et sur les caractéristiques doit se poursuivre en se focalisant sur la nature des espèces qu'ils pourraient relâcher à long terme en situation de stockage. En effet ce sont ces espèces porteuses de la radioactivité qu'il faut confiner dans des conditions de champ proche encore mal définies. Les interactions entre les sels des déchets (nitrates et sulfates des radifères et bitumes), le ciment et l'argile peuvent modifier la migration des espèces porteuses de la radioactivité (Annexe VII). Toutes ces études sont communes avec celles conduites par l'Andra, par exemple, sur l'influence de la libération des sels par les colis sur la migration des radionucléides dans l'argile, conduites pour Cigéo.

*La Commission considère que les inventaires des radionucléides présents dans les déchets FAVL doivent être consolidés et estimés plus précisément. Elle souhaite que lui soit présenté un tableau récapitulatif des activités massiques des radionucléides à vie longue et des activités totales en radionucléides des différents déchets.*

l'Andra a conduit des calculs préliminaires de débits molaires des radionucléides aux limites de la couche d'argiles tégulines du site géologique en cours d'investigation pour chaque type de déchets. Elle a considéré un stockage simplifié et pris des hypothèses conservatives : le carbone relâché aux taux de  $5 \cdot 10^{-6}$  à  $5 \cdot 10^{-3}$  par an, est à 30 % sous forme organique et tous les autres radionucléides sont labiles et relâchés instantanément des colis. Le terme source est soit constant sur une longue période (20 000 ans pour le  $^{14}\text{C}$ ) soit une fonction décroissante du temps dans les autres cas. Les colis sont à 20 m du toit de l'argile (stockage avec terrassement) ou 2 m (stockage en galeries) et la garde inférieure d'argile est de 25 ou 35 m pour une puissance de la couche de 55 m.

34

Les modes de transferts des espèces chimiques sont, la diffusion dans les alvéoles (colis de stockage, béton de remplissage, dalle de plateforme, voûtes des galeries) puis vers la surface et, la convection vers l'aquifère. Les conditions physico-chimiques en alvéoles et dans la couverture sont oxydantes et dans les alvéoles les matériaux cimentaires sont dégradés. Les argiles non remaniées restent réductrices. Les valeurs des paramètres, perméabilité de l'argile, coefficients de diffusion, gradient hydraulique sont mesurés ou estimés. L'érosion de la surface de l'argile, 10 m au maximum, est prise en compte jusqu'à 50 000 ans, temps compatible, selon l'Andra, avec le confinement nécessaire des radionucléides et la prévision du comportement géologique du site.

Les calculs donnent des ordres de grandeurs du relâchement des radionucléides du stockage ( $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{99}\text{Tc}$  et  $^{129}\text{I}$ ) toujours inférieur à  $10^{-3}$  M/an, au temps auquel ils arrivent au toit et en limite inférieure de l'argile (maxima vers 20 000 ans) et du temps après lequel ils sont tous dans l'environnement (50 000 ans). Ces calculs montrent que le choix du mode de stockage, tranchées ou galeries, n'est pas réellement discriminant. Ils permettent aussi de mettre en évidence la sensibilité de la migration aux paramètres introduits dans les calculs (perméabilité, coefficients de diffusion, ...) et aux dispositions de stockage (épaisseurs des gardes d'argile, regroupement des déchets sur les plateformes, rôle du béton, ...). Plus le stockage sera réducteur plus il sera confinant. Enfin ils montrent ce qui reste à préciser, sinon à étudier : le relâchement du chlore et du carbone du graphite (bloc ou poudre), la diffusion des gaz (radon, chlore,  $\text{CO}_2$ ) dans la couverture, la modification de l'argile par les sels, la maîtrise du potentiel redox dans les alvéoles, ...

A partir de ces résultats l'Andra a évalué les impacts radiologiques associés aux scénarios conventionnels des analyses de sûreté pour les stockages géologiques (voir Annexe VII).

*Les résultats acquis sur le comportement des radionucléides issus de ces déchets en situation de stockage en sub-surface dans l'argile tégulines sont encore insuffisants*



*pour soutenir les calculs d'impacts radiologiques d'une analyse de sûreté réaliste. Les conditions physico-chimiques qui contrôleront la migration des radionucléides doivent être précisées et les études de comportement doivent être conduites au plus près de ces conditions. La Commission recommande fortement que ces études soient rendues plus réalistes.*

Dans son avis 2016-AV-264 l'ASN rejoint les préoccupations que la Commission exprime depuis quelques années. Elle demande aux producteurs de déchets et à l'Andra de prendre des mesures de gestion et fixe des échéances. La situation devrait s'éclaircir en 2019.

*La Commission considère que la gestion des différents types de déchets FAVL est encore loin d'être claire. Les inventaires et caractéristiques sont à préciser et nécessitent un recensement complet des déchets existants et des déchets en prévision. L'évaluation des possibilités de traitements des divers FAVL doit être menée à son terme.*

*En l'état actuel, la Commission constate que la gestion des déchets FAVL devrait relever de plusieurs filières. La Commission recommande qu'elles soient précisées. En particulier, l'inventaire de réserve de Cigéo doit être défini pour la demande d'autorisation de création.*



## CHAPITRE 3 : SÉPARATION – TRANSMUTATION

Ce chapitre concerne le programme de gestion des matières et des déchets radioactifs tel qu'il est défini par la loi du 28 juin 2006. L'article 3, alinéa 1, définit les recherches sur "la séparation et la transmutation des éléments radioactifs à vie longue". Dans ce contexte, le CEA développe le projet Astrid, démonstrateur industriel de réacteur à neutrons rapides de génération IV. Il tire parti de l'expertise unique acquise grâce au retour d'expérience fourni par l'exploitation des réacteurs à neutrons rapides (RNR) Rapsodie, Phénix et Superphénix.

Par ailleurs, des organismes de recherche (CNRS, universités françaises, SCK-CEN en Belgique) explorent les possibilités que pourraient offrir une filière au thorium ou le couplage d'accélérateurs avec des réacteurs (ADS) pour produire de l'énergie et transmuter les éléments radioactifs à vie longue (Cf. Chapitre 4 : Recherche fondamentale).

### 3.1 ASTRID : RÉACTEUR ET ATELIER DE FABRICATION DU COMBUSTIBLE (AFC)

#### 3.1.1 Contexte du projet Astrid

Le projet Astrid vise à renforcer la stratégie d'indépendance nationale en ouvrant la perspective d'une production électrique assurée durablement grâce à un parc électronucléaire de RNR. En effet, le combustible nucléaire irradié contient des quantités notables d'uranium et de plutonium qui sont considérées comme des matières nucléaires et non comme des déchets. S'agissant de l'uranium, il convient d'ajouter à celui du combustible utilisé valorisable l'uranium appauvri résultant de l'opération d'enrichissement lors de la fabrication du combustible UOx. Quant au plutonium, de l'oxyde de plutonium est additionné à de l'oxyde d'uranium pour fabriquer le combustible MOx dont l'ASN a autorisé l'utilisation dans 22 réacteurs du parc. L'uranium appauvri et le plutonium seraient utilisés pour fabriquer le combustible des RNR. La France dispose des matières nécessaires pour alimenter durablement un parc de RNR. L'exploitation d'un tel parc ne dépendrait plus de l'importation d'uranium naturel ni de l'enrichissement en  $^{235}\text{U}$  pour fabriquer le combustible.

Le réacteur Astrid (Annexe X) doit répondre à un certain nombre d'objectifs pour permettre, le moment venu, l'éventuelle prise de décision d'une implantation de RNR refroidi au sodium (RNR-Na) dans le parc français. Ainsi :

1. Astrid doit atteindre un niveau de sûreté équivalent à celui de l'EPR et intégrer les éléments issus de l'analyse de l'accident de Fukushima.
2. Astrid doit pouvoir utiliser un combustible associant de l'uranium appauvri à du plutonium à forte teneur issu du traitement du combustible utilisé UOx et MOx. Il doit également démontrer sa capacité à fonctionner avec son propre plutonium multi-recyclé (cycle fermé).
3. Astrid doit permettre l'étude de la transmutation des actinides jusqu'à la validation éventuelle d'un procédé industriel.
4. Astrid doit démontrer sa capacité à fonctionner en mode sous-générateur, c'est-à-dire à consommer du plutonium pour permettre, le moment venu, de résorber le plutonium accumulé.

Le CEA, maître d'ouvrage, a organisé le projet avec la collaboration de quatorze partenaires industriels français et étrangers: EDF, Areva, Alstom, Rolls-Royce, Bouygues, SEIV, CNIM, Airbus, Comex, Jacobs, Technetics, Velan, Toshiba, groupe Mitsubishi.

Suite à la réduction des moyens de programmation, humains et financiers, alloués au CEA/DEN et en raison de la nécessité de développer des installations d'expérimentation, le CEA, en accord avec les tutelles, a modifié le calendrier du projet Astrid. C'est ainsi que le début de la construction du réacteur est maintenant prévu fin 2022 / début 2023. Ce nouveau délai permettra,

en particulier, le développement de la plateforme Cheops qui doit permettre la mise au point et la qualification du système de conversion d'énergie (SCE) à gaz.

Un nouveau calendrier s'est dessiné au cours de 2015. Il repose actuellement sur les étapes suivantes :

1. **Fin 2015** : dossier de synthèse (cahier des charges, estimation des coûts, déroulement du projet), envoi du DOS (avec SCE sodium-eau vapeur) à l'ASN, décision de passer en phase APD (2016 – 2019) qui devient phase de "Basic Design" du réacteur.
2. **De 2016 à 2017** : poursuite des études sur le SCE gaz pour les porter fin 2017 au même niveau que celles atteintes avec le système eau-vapeur.
3. **Fin 2019** : mise en place officielle d'un consortium de construction réunissant les partenaires du projet Astrid. La demande d'autorisation de création (DAC) serait déposée en 2020. C'est sur cette base que la décision de passer à la phase de "Detailed design" pourra être prise.
4. **Fin 2022** : après avis de l'ASN qui aura instruit le dossier de la DAC pendant deux à trois ans (2020 à fin 2022), décret d'autorisation de création et début de la construction d'Astrid qui devrait durer 7 ans.
5. **2029** : divergence d'Astrid.

Le report de la date prévisionnelle de la construction d'Astrid apparaît essentiellement lié à une situation conjoncturelle de précarité du financement du programme Astrid sur laquelle la Commission a déjà attiré l'attention. Ce calendrier pourrait subir d'autres modifications.

*La Commission rappelle qu'Astrid est une étape indispensable à l'introduction de RNR de quatrième génération en France. Elle souligne que pendant toute la première moitié du XXI<sup>ème</sup> siècle, aucun type de réacteur autre qu'un RNR-Na ne permettra d'évaluer la faisabilité industrielle de l'utilisation des matières nucléaires que représentent d'une part l'uranium appauvri et d'autre part le plutonium et l'uranium contenu dans le combustible usé.*

*La modification du calendrier ne remet pas fondamentalement en cause le projet Astrid mais constitue un nouveau glissement par rapport aux échéances de la loi de 2006. La Commission attire l'attention sur le fait que ce retard doit être maîtrisé et utilisé pour construire de l'expertise et de la compétence en poursuivant la R&D.*

*La Commission demande au CEA de lui présenter le nouveau calendrier consolidé et le plan de financement pluriannuel du programme Astrid.*

### 3.1.2 Caractéristiques techniques d'Astrid et options

Le dossier de synthèse établi fin 2015 par le CEA, correspondant à la fin de la période d'Avant-Projet Sommaire (APS), rassemble une description complète de la "centrale" Astrid avec un dossier de sûreté concernant la conversion d'énergie eau-vapeur. Il rassemble tous les aspects organisationnels, techniques et scientifiques du projet Astrid avant d'entamer la phase d'avant-projet détaillé (APD).

Des revues de choix d'option ainsi que des revues "risques et performances" ont soutenu l'élaboration de ce dossier qui a bénéficié de l'apport de trois groupes d'experts issus du CEA, d'Areva, d'EDF et d'Alstom. Les principaux choix concernant la chaudière nucléaire comportent

des aspects très innovants et le RNR Astrid tel qu'il est défini aujourd'hui n'a pas d'équivalent dans le monde.

En fin d'APS les grands domaines, qui seront affinés lors de l'APD, ont fait l'objet d'études approfondies ; il s'agit de :

- l'aménagement du site prévu à Marcoule et l'étude de sa constructibilité sur 17 ha ;
- la structure du bâtiment réacteur ;
- la structure des halls de manutention des assemblages ;
- les dispositifs pour éviter les réactions sodium-eau-air.

Un ensemble de R&D sera développé au cours de l'APD. Ainsi s'agissant du Système de Conversion d'Énergie à gaz (SCE gaz), le Conseil scientifique de la DEN a décidé, sur la base des résultats déjà obtenus, de poursuivre les études concernant le SCE gaz jusqu'à fin 2017.

### 3.1.3 SCE gaz

Ce système de conversion de l'énergie remplace l'échange de chaleur entre le sodium et l'eau par un échange de chaleur entre le sodium et un gaz, le gaz choisi pour Astrid étant l'azote. Ce système, s'il est possible de l'utiliser à l'échelle industrielle, éviterait le risque chimique de réaction sodium-eau. Astrid serait alors un RNR doublement innovant. Le principal verrou technologique qui doit être levé est la mise au point de l'échangeur de chaleur sodium-azote. La qualification des composants commencera pendant l'APD. La R&D actuelle conduite sur Diademo doit se poursuivre dans Cheops. Les autres modifications qu'entraîne l'introduction d'un SCE gaz sur la conception d'Astrid sont réalisables dans l'état actuel de la technologie.

### 3.1.4 Combustible

Il faut maîtriser, au niveau industriel, toutes les phases de préparation du combustible d'Astrid. Areva met en œuvre la fabrication de MOx depuis de nombreuses années et le CEA a étudié et réussi à mettre au point la fabrication de pastilles du combustible d'Astrid contenant 25 % de plutonium.

Aujourd'hui la R&D est liée aux installations du cycle du combustible et concerne en premier lieu la fabrication du premier cœur et de ses recharges pour les premières décennies de fonctionnement d'Astrid. L'atelier de fabrication du combustible (AFC) doit entrer en fonction suffisamment tôt pour produire le premier cœur d'Astrid en temps utile. Ce premier cœur sera fabriqué avec du plutonium issu du traitement du combustible usé UOx. Le combustible d'Astrid présente des caractéristiques spécifiques et un programme de R&D est en cours depuis plusieurs années pour optimiser la fabrication de la céramique à base d'oxydes d'uranium et de plutonium.

Le CEA et Areva se sont associés pour produire entre 2018 et 2019, 61 aiguilles expérimentales de MOx renfermant 4000 pastilles (20 kg d'oxyde dont 5 kg de Pu). En l'absence d'outils d'irradiation adéquats en France, un accord passé avec la Russie prévoit qu'un premier assemblage combustible devra être qualifié dans le réacteur BN 600. L'examen des aiguilles irradiées aura lieu à Cadarache en 2024. La faisabilité de fabrication des pastilles est acquise (300 pastilles réalisées à 25 % de Pu). Le cœur d'Astrid demandera 25 t d'U et 5 t de Pu.

Il semble aujourd'hui que les installations existantes pourraient être adaptées pour permettre la fabrication des combustibles et leur traitement lors des premières opérations des phases de démonstration industrielle d'Astrid. Cela implique la validation et la mise en œuvre d'un grand nombre de procédés.

Cette stratégie permet de maîtriser la fabrication des premiers cœurs d'Astrid. La mise en œuvre d'un cycle fermé comportant le traitement du combustible RNR usé et la fabrication d'un nouveau combustible exigera une R&D importante pour concevoir et mettre en œuvre les nouveaux procédés nécessaires (voir 3.2.1 et annexe X).

*La Commission recommande un soutien sans faille à toutes ces actions afin de garantir le déroulement simultané des nombreuses opérations telles qu'elles ont été prévues pour le "Basic Design". La R&D sur le système de conversion de l'énergie à gaz lui paraît prioritaire car il s'agit d'une innovation majeure.*

### 3.1.5 Matériaux et éléments de structure

La R&D porte sur les éléments de structure tels que les gaines et les tubes hexagonaux pour constituer les assemblages. C'est ainsi que l'étrépage des premières centaines de tubes de gaines, de géométrie Astrid en acier austénitique 15-15Ti, nuance AIM1, a été réalisé. De même la fabrication industrielle des tubes hexagonaux, éléments de structure particuliers à ce type de réacteur et aux dimensions inédites fait l'objet d'études non seulement pour qualifier la fabrication mais aussi pour, dès maintenant, identifier et motiver les sociétés industrielles capables de réaliser ces objets dans le futur.

Le CEA explore les potentialités de la fabrication additive (impression 3D) de composants métalliques dans le domaine nucléaire, ce qui demande de fortes compétences en modélisation/numérisation et en ingénierie. Les premières applications de cette technologie ont permis la fabrication de pièces à géométrie compliquée envisagées pour Astrid. Une plateforme pour développer la R&D dans ce domaine particulier a été mise en place.

*La Commission note que la fabrication des éléments nécessaires au montage des assemblages de combustible est maîtrisée et que la R&D pour qualifier les procédures de montage à l'échelle industrielle est en cours. Elle recommande la sécurisation des filières industrielles.*

## 3.2 RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT

### 3.2.1 Séparation

#### a) Optimisation et extension du cycle actuel

Le CEA a optimisé le Procédé Purex et a étudié un ensemble de molécules permettant la séparation de tous les actinides du combustible utilisé des réacteurs à neutrons thermiques. L'accent a été mis sur la séparation des actinides mineurs, après celles de U et Pu. Aujourd'hui des procédés hydro-métallurgiques permettent d'isoler chaque actinide pour sa mise en forme en vue de la fabrication de combustible pour les réacteurs ou pour une éventuelle transmutation.

Le développement de ces procédés s'est appuyé sur une large collaboration internationale dans le cadre des divers programmes communs Euratom. Cette approche qui mobilise une communauté de chercheurs européens présente le double avantage de maintenir une expertise de haut niveau et de permettre la validation des acquis du CEA par cette même communauté.

Les projets actuels développés au CEA et dans le cadre d'Euratom (FP7 Sacsess) visent à identifier les divers paramètres de conduite des procédés ainsi que les processus chimiques tels que radiolyse, hydrolyse, formation de 3<sup>ème</sup> phase, susceptibles d'affecter la sûreté des installations. Les expériences en actif sont conduites dans Atalante à Marcoule ainsi qu'à l'Institut des Transuraniens à Karlsruhe.

## b) Conception du cycle du futur

Le cycle du combustible d'un parc comportant des RNR-Na imposera des ruptures scientifiques et technologiques concernant le traitement et le recyclage des matières U et Pu. En effet, les fortes teneurs en plutonium du combustible usé, accompagnées de platinoïdes et d'actinides mineurs, exigeront de faire appel à de nouveaux procédés pour assurer un rendement industriel de récupération du Pu élevé et la sûreté des installations de retraitement. De même la séparation et le recyclage de quantités importantes d'américium, indispensables pour assurer sa transmutation, exigeront la mise au point de procédés validés industriellement. Les adaptations pour développer les procédés du futur doivent viser à simplifier et à limiter le nombre d'opérations, à s'affranchir des réactions d'oxydo-réduction et à éradiquer les particules fines.

*La R&D doit conduire à un nouveau procédé de retraitement.*

*La Commission estime, compte tenu de l'ampleur des défis à relever tant au plan fondamental que technologique, qu'il est indispensable de lancer dès maintenant un programme de R&D à long terme pour assurer industriellement le traitement des assemblages de combustible RNR.*

### 3.2.2 Transmutation

Afin de préparer l'étude de la transmutation dans le réacteur Astrid un ensemble de projets qui concernent la préparation de combustible à haute teneur en américium sont mis en œuvre. Il est impératif que ces recherches soient menées dès maintenant car la réalisation d'une aiguille, son autorisation de transport, son irradiation (aujourd'hui dans le réacteur HFR à Petten – Pays Bas), puis l'examen post-irradiation exigent des temps considérables.

A partir de la maîtrise de la séparation de l'américium le CEA pilote un projet européen Pelgrim<sup>2</sup> dédié à la fabrication et à l'irradiation de combustibles de transmutation d'Am en RNR-Na. Deux types de combustibles d'oxydes d'actinides sont étudiés pour une irradiation en mode homogène ((U,Pu,Am)O<sub>2</sub>) et hétérogène sur support UO<sub>2</sub> ((U,Am)O<sub>2</sub>).

A côté de combustibles classiques sous forme de pastilles le projet concerne également l'étude de combustibles sous forme de microsphères. Celles-ci permettraient une simplification du procédé de fabrication par remplissage direct de l'aiguille par les microsphères et d'autre part une amélioration du comportement sous irradiation grâce à une meilleure accommodation du gonflement du combustible.

Des programmes spécifiques accompagnent Pelgrim.

- Marios pour étudier le relâchement gazeux et le gonflement d'un combustible U<sub>0.85</sub>Am<sub>0.15</sub>O<sub>2-x</sub> pour 2 températures d'irradiation (1000 et 1200°C) et 2 microstructures (poreuse et dense).
- Sphere pour la mise en œuvre de conditions d'irradiation d'un combustible U<sub>0.75</sub>Pu<sub>0.22</sub>Am<sub>0.03</sub>O<sub>2-x</sub> dans le réacteur HFR au plus près de celles envisagées en RNR-Na.
- Marine pour l'étude d'un combustible (U,Am)O<sub>2-x</sub> dans les mêmes conditions que celles du projet Sphere.

Les divers examens post-irradiation seront réalisés dans l'installation Leca/Star à Cadarache.

---

<sup>2</sup> Pelgrim est un projet européen de recherche sur les actinides mineurs dans le cadre des RNR de génération IV (<http://www.pelgrim.eu/>).

Le CEA développe également des collaborations bilatérales en séparation – transmutation :

- avec les Etats-Unis (DOE) pour la sélectivité d'extractants, la préparation et l'irradiation d'échantillons de combustibles pour la transmutation (expériences Futurix et CCAM dans ATR),
- avec le Japon (JAEA) pour la faisabilité de préparation et d'irradiation d'aiguilles, voire d'un assemblage, de combustible pour Astrid,
- avec le CCR-ITU pour la fabrication d'échantillons dédiés à la transmutation en mode homogène et hétérogène.

### 3.2.3 Conclusion – recommandation

La R&D pour la transmutation de l'américium se développe au CEA et également, depuis une dizaine d'années, dans des programmes Euratom, d'ailleurs majoritairement pilotés par le CEA, ou encore avec des partenariats nationaux/internationaux bilatéraux. Cette R&D accompagne celle sur le combustible des RNR. Elle est rythmée par la disponibilité des moyens d'irradiation et des installations pour l'examen des échantillons irradiés.

*La Commission encourage la R&D conduite par le CEA dans le domaine des combustibles pour la transmutation de l'américium en RNR.*

*Cette R&D impose une longue échelle de temps, ce qui peut masquer la logique de progression des acquis. La Commission demande au CEA de lui présenter annuellement un tableau de bord montrant les avancées des nombreuses expériences engagées et les programmes qui en découlent dans le domaine des combustibles RNR et des combustibles de transmutation.*



## CHAPITRE 4 : RECHERCHE FONDAMENTALE

La recherche amont correspondant aux orientations de la loi de 2006 sur "la gestion durable des matières et déchets radioactifs" est essentiellement développée par le CEA, le CNRS, les écoles et universités, l'Andra, EDF et Areva, avec ou sans collaborations. Les collaborations nationales sont bi ou multi-partites et ont lieu dans plusieurs cadres contractuels entre organismes. A celles-ci s'ajoutent des collaborations européennes ou internationales. Les deux grands acteurs de la recherche amont restent cependant le CNRS et le CEA, les autres organismes mentionnés viennent en soutien. Enfin d'autres organismes comme le BRGM et l'IRSN apportent leur soutien à ces recherches.

Au total une large communauté académique de chercheurs français (750 ETPT) travaille dans le domaine de l'énergie électronucléaire et plus particulièrement sur la séparation et la transmutation des éléments radioactifs à vie longue et sur le stockage des déchets de haute et moyenne activité à vie longue en couche géologique profonde.

### 4.1 LA RECHERCHE AMONT AU CNRS

Le défi NEEDS vise à améliorer la visibilité et la cohérence des diverses recherches entreprises au CNRS, y compris en sciences humaines et sociales. Son ambition est de contribuer à l'élaboration de programmes scientifiques concernant l'énergie nucléaire et les questions d'environnement et de société qui lui sont liées. Il est mené en collaboration avec le CEA, l'Andra, Areva, EDF, le BRGM et l'IRSN. Après son lancement, Needs a connu une phase de restructuration. Un Conseil de concertation arbitre le budget et le Conseil scientifique oriente et évalue la recherche. La visibilité de Needs s'est nettement affirmée dans chacun de ses 7 Projets Fédérateurs (voir rapport n°8, Annexe IX). Le CNRS est membre de l'Alliance Ancre, de la plateforme européenne SNE-TP et de l'I2EN qui regroupe les formations d'enseignement en soutien à l'industrie nucléaire.

Chaque année Needs met en place sur appel à proposition des projets libres ou structurants depuis 2015. Entre 2013 et 2015 le budget a baissé de 40 %. Le budget annuel par projet fédérateur se chiffre entre 100 et 500 k€, venant pour une moitié du CNRS et pour l'autre de ses partenaires. Il ne permet de lancer que des actions d'amorçage. C'est d'ailleurs la volonté du CNRS d'être très en amont de la R&D dans le nucléaire.

L'Annexe XI détaille les recherches de Needs conduites dans les Projets Fédérateurs et celles concernant deux systèmes nucléaires : les ADS et les RNR à sel fondus.

Needs est en place jusqu'à la fin 2017. Son avenir dépend essentiellement du support financier qu'il recevra. En nette diminution, il risque d'atteindre un plancher en dessous duquel il sera impossible de mobiliser les équipes.

Le CNRS conduit des recherches en bonne adéquation avec les grands projets nationaux liés à l'énergie nucléaire. Les laboratoires de recherche académique impliqués dans Needs constituent un important vivier de chercheurs et d'enseignants-chercheurs, indispensable à la formation des futurs techniciens, ingénieurs et chercheurs de l'industrie nucléaire. Needs est maintenant structuré pour amorcer et conduire des projets de recherche fondamentale en complément des actions des autres acteurs de la loi de 2006.

*La Commission encourage le développement des actions de Needs et recommande aux organismes de recherche nationaux et aux entreprises du secteur de les soutenir, faute de quoi la recherche fondamentale dans le nucléaire s'appauvrira à un moment où il faudrait au contraire la relancer pour relever les défis des prochaines décennies.*

## 4.2 LA RECHERCHE AMONT AU CEA

La recherche amont du CEA pour l'énergie nucléaire, au sens large, couvre une grande partie de la science en support au maintien du nucléaire français et à sa possible évolution vers une nouvelle génération de réacteurs et d'usines du cycle du combustible (voir Annexe XI). Elle couvre l'essentiel des domaines. Elle est conduite dans le cadre de nombreuses collaborations, entre les directions du CEA, avec les écoles, les universités, Areva et EDF ; certaines sont menées dans le cadre de Needs. Le CEA participe aux projets européens Euratom, dans lesquels il est souvent coordinateur. La ligne directrice et unificatrice des recherches appuyées sur plusieurs plateformes réunissant des moyens uniques, réside dans la complémentarité entre expérimentation et modélisation multi-échelles. Elle permet à la direction de l'énergie nucléaire (DEN) de développer une R&D très innovante pour Astrid et de futurs RNR GenIV ainsi que d'affirmer son expertise au bénéfice de ses multiples collaborations nationales et internationales.

Cependant, le CEA a dû faire des choix pour des raisons budgétaires. Ainsi, quelques domaines de recherche ont vu leurs moyens fortement diminuer (matériaux métalliques, chimie fondamentale des actinides, ...) alors que le CEA dispose en France de l'essentiel des installations appropriées pour travailler sur les matériaux nucléaires et les solutions hautement radioactives.

*Considérant les programmes ambitieux du nucléaire du futur inscrits dans la loi et confiés au CEA, la Commission recommande un soutien fort de la recherche amont indispensable à leur réalisation.*

## 4.3 LA RECHERCHE AMONT À L'ICSM

L'institut de chimie séparative de Marcoule (ICSM) est une unité mixte de recherche (UMR) quadripartites (Annexe XI) qui occupe un espace de recherche complémentaire de celui du CEA-DEN à Marcoule. Les recherches portent sur la dynamique des échanges aux interfaces solides/solutions et solutions/solutions immiscibles intéressant l'amont et l'aval du cycle électronucléaire. Elles sont au niveau des mécanismes moléculaires, bien en amont des procédés, et ouvrent la voie à de nouvelles pistes tant dans la dissolution des matériaux réfractaires que dans la séparation par extraction liquide-liquide largement utilisée dans l'aval du cycle. L'activité de l'ICSM est conforme à la mission qui lui a été confiée lors de sa création.

## CHAPITRE 5 : PANORAMA INTERNATIONAL

### 5.1 INTRODUCTION

Le présent chapitre décrit les développements récents intervenus depuis la rédaction des chapitres sur le panorama international des rapports précédents. A ce titre, nous rappelons que le rapport n°7 comportait un panorama international qui décrivait de façon détaillée la situation jusqu'en 2013. Le rapport n°8 s'intéressait plus particulièrement à l'organisation de la gestion, du financement et du coût prévu pour un stockage géologique ainsi qu'à l'approche internationale de la réversibilité/récupérabilité. Le rapport n°9 analysait plus en détail les approches concernant les coûts d'un stockage géologique et la problématique du déclassement ou de la libération de matériaux de démantèlement.

Par ailleurs, le paragraphe 5.4 est consacré aux conclusions du voyage d'étude de la Commission en Pologne, République Tchèque et Hongrie.

### 5.2 SITUATION INTERNATIONALE

#### 5.2.1 Cadre légal international

La gestion des déchets radioactifs, et par extension les E&R associées, se situent dans un cadre légal à la fois national et international. Ce cadre est constitué principalement :

- du Traité Euratom, Article 37 (1957) qui oblige chaque État membre de fournir à la Commission [européenne] les données générales de tout projet de rejet d'effluents radioactifs ;
- de la Convention d'Espoo (1991) sur l'évaluation de l'impact sur l'environnement (EIE) dans un contexte transfrontalier ;
- de la Convention internationale Ospam (1992) sur la prévention de la pollution marine ;
- de la Convention sur la sûreté nucléaire (1994), afin d'atteindre et de maintenir un haut niveau de sûreté nucléaire ;
- de la Directive CE/97/11 (1997) concernant l'évaluation des incidences de certains projets publics et privés sur l'environnement ;
- de la Convention commune sur la sûreté de la gestion du combustible usé et des déchets radioactifs (1997) ;
- de la Convention d'Åarhus (1998) qui règle la participation du public aux processus décisionnels et l'accès à la justice en matière d'environnement ;
- de la directive 2011/70/Euratom sur la gestion du combustible usé et des déchets radioactifs ;
- de la directive 2013/59/Euratom fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire contre les dangers résultant de l'exposition aux rayonnements ionisants.

#### 5.2.2 Laboratoires de recherche ou sites de stockage géologique

##### a) Allemagne

Le BfS (Bundesamt für Strahlenschutz) est responsable du stockage des déchets radioactifs allemands, mais *in fine*, la responsabilité incombe au Gouvernement Fédéral allemand. Tout progrès dans ce domaine est cependant fortement perturbé par l'opposition de gouvernements locaux des 'Länder' et par une partie importante de l'opinion publique. Une Commission pluridisciplinaire sur le stockage des matériaux hautement radioactifs, créée dans le cadre de la loi de 2013 qui régule la méthodologie pour le choix de site, a proposé de fusionner les parties concernées du BfS, de DBE (Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe) et de Asse-GmbH (qui gère la mine d'Asse) en une nouvelle société fédérale, BfKEG

(Bundes Gesellschaft für kerntechnische Entsorgung). BfkEG aura la responsabilité de gérer le stockage des déchets, de choisir le site jusqu'à l'exploitation incluse, et d'en assumer la responsabilité technique et financière.

A ce jour, le programme prévoit d'utiliser l'ancienne mine de fer de Konrad pour le stockage de déchets de faible et moyenne activité (déchets non thermiques) et un site non encore choisi pour le stockage des déchets de haute activité. Bien que le site en dôme de sel de Gorleben ne soit pas officiellement abandonné, il semble très improbable qu'il soit retenu à cause de la forte opposition locale et de l'accident qui a eu lieu dans la mine de Asse suite à des venues de saumure qui fragilisent le concept de stockage en dôme de sel. Une décision de principe prévoit la récupération des 120 000 futs stockés dans la mine de Asse. Cette récupération est contestée car souvent considérée comme non réaliste. Les analyses montrent que ce serait de toute façon impossible à faire avant 2033. En attendant un site de stockage opérationnel, les déchets HA de retraitement déjà en Allemagne sont entreposés principalement à Gorleben. Les colis qui doivent encore être rapatriés seront entreposés en différents endroits. Les assemblages de combustible usé (CU) seront entreposés sur site.

Le coût du démantèlement des réacteurs et du stockage des déchets et combustibles usés a été estimé à au moins 36 milliards d'euros.

#### **b) Belgique**

Il n'y a à ce jour pas encore de décision politique validée en matière de stockage géologique des déchets de haute ou moyenne activité de vie longue.

Afin d'étudier l'impact thermo-hydro-mécanique de déchets de haute activité sur les propriétés de l'argile, l'expérience Praclay a commencé dans une galerie dédiée à échelle 1 d'un alvéole de stockage, située dans le laboratoire souterrain Hades à Mol. L'argile à la paroi de la galerie expérimentale a atteint en 2015 une température de 80 °C. La température sera maintenue pendant une période de dix ans, au cours de laquelle les propriétés de l'argile seront mesurées *in situ*, avant le démantèlement et l'analyse en laboratoire.

#### **c) Canada**

La gestion à long terme du combustible usé relève de la Société de gestion des déchets nucléaires (SGDN-NWMO). Fin 2015, SGDN a choisi quatre collectivités dans le nord de l'état d'Ontario (la ville d'Elliot Lake, le village de Blind River et les cantons de Manitouwadge et de White River) où des investigations approfondies seront effectuées. SGDN estime que le choix du site pourrait intervenir au plus tôt en 2023 avec une mise en service à partir de 2035. Une demande d'autorisation de construction d'un stockage pour déchets FMA en formation géologique profonde à Kincardine a été introduite par Ontario Hydro et l'instruction par les autorités publiques est en cours. La Ministre de l'environnement vient récemment de demander des études supplémentaires.

#### **d) Chine**

L'implantation d'un laboratoire souterrain dans le granite est prévue à Beishan, désert de Gobi, vers 2020, qui sera exploité pendant 20 ans. Un autre site de recherche est prévu dans l'argile. Un site de stockage devrait voir le jour vers 2050.

#### **e) Etats-Unis**

En attendant le choix d'un ou de plusieurs sites de stockage définitif, le régulateur (NRC) a statué que l'entreposage à long terme et à sec du combustible usé constitue, pour une durée de quelques décennies, une solution fiable et sûre. C'est l'option d'attente qui sera mise en œuvre aux EU. Ainsi, Waste Control Specialists (WCS), firme texane de traitement, entreposage et stockage de déchets radioactifs ou dangereux, a signé un accord avec Areva pour la conception, la construction, l'exploitation et l'entretien d'une installation d'entreposage temporaire de combustibles usés (CISF) au Texas. Areva organiserait également le transport des combustibles vers l'installation. La capacité de CISF serait de 40 000 tonnes.

En 2015, le Président a autorisé le DOE à prévoir un site de stockage spécifique pour les déchets de haute activité d'origine militaire. L'approche du DOE sera basée sur un consensus sociétal, comme proposée par la "Blue Ribbon Commission".

Le DOE a également indiqué que le stockage de certains déchets spécifiques dans des forages profonds (5000 m) pourrait offrir une alternative à un stockage dans des galeries, même si cette approche n'est pas prévue pour la majorité des combustibles civils usés. La sélection d'un site (Rugby dans le Dakota du Nord) pour un forage expérimental est en cours.

Avant l'accident du Wipp en 2014, où un fût s'est ouvert suite à une réaction exothermique causée par une incompatibilité chimique entre matières radioactives et des absorbants organiques, le Wipp était destiné à fermer en 2030. Le nouveau plan est de rouvrir le Wipp fin 2016 moyennant un coût estimé à \$500 millions. La fermeture serait envisagée à l'horizon 2055.

#### **f) Finlande**

Pour mémoire, après une revue de la demande d'autorisation de création introduite par Posiva en 2012, l'autorité de sûreté Stuk a informé le gouvernement en 2015 que "l'usine d'encapsulation et l'installation de stockage pour les combustibles usés, telles que proposées par Posiva, peuvent être construites dans des conditions de sûreté assurée". La décision formelle du gouvernement finlandais d'accorder le permis de construire pour une capacité initiale de 6500 tonnes de combustibles usés (CU) est intervenue en novembre 2015. Le début de la construction, à partir de l'installation existante à Olkiluoto, est prévu en 2016. Le dépôt de la demande d'exploitation est attendu en 2020 afin de commencer l'exploitation pour une période d'environ cent ans. Le coût total est estimé à 3 milliards d'euros. Pour rappel, le concept pour le stockage des CU est le même en Finlande qu'en Suède. Un accord de coopération renforcé a été conclu début 2016 entre Posiva et SKB (Suède). L'accord prévoit la possibilité de développer, de construire et de livrer en commun des composants des conteneurs et de la bentonite.

#### **g) France**

Pour mémoire, les études et recherches continuent dans le laboratoire souterrain à Bure. Un accident mortel, suite à un éboulement d'une paroi de galerie en construction a endeuillé la communauté. Le dépôt de la DAC est prévu en 2018.

#### **h) Inde**

A ce jour, aucun site n'a été sélectionné. Le Bhabha Atomic Research Centre (BARC) continue des recherches.

#### **i) Japon**

Deux laboratoires sont actuellement en construction, un à Mizunami dans une roche cristalline et un à Horonobe dans une roche sédimentaire.

Au laboratoire de Mizunami, une profondeur de 500 m sur les 1 000 m prévus a été atteinte. Au laboratoire de Horonobe, une expérience pour étudier les propriétés THM à échelle 1/1 est prévue à - 350m.

Numo a en outre introduit le concept Care (Cavern Retrievable), comportant deux phases : l'entreposage, parfaitement récupérable en caverne ventilée de fûts HA, suivi par un scellement définitif après 300 ans. La première phase permet de réduire la charge thermique et d'augmenter ainsi significativement la densité de remplissage des déchets dans le stockage définitif.

Le Gouvernement a récemment décidé de présélectionner des régions potentiellement aptes au stockage, avant de commencer des discussions avec les communautés locales concernées.

## **j) Pays-Bas**

Le pays dispose de deux roches hôtes potentielles, le sel et l'argile. Le stockage est prévu après une période d'entreposage de 100 ans. Une décision de principe sur un choix de site est attendue prochainement.

## **k) Royaume-Uni**

Le programme du Royaume-Uni est basé sur le document du Gouvernement "Implementing Geological Disposal", daté de 2014. Il comporte trois actions, avant le processus de choix du site:

- un inventaire national de régions à géologie potentiellement adéquate ;
- la décision de donner le statut d'infrastructure d'importance nationale à l'installation de stockage géologique ;
- le développement du cadre permettant aux communautés d'être représentées et de participer au choix de site.

Le Radioactive Waste Management Directorate (RWMD), filiale de la Nuclear Decommissioning Authority (NDA) sera en charge du choix du site et des étapes ultérieures.

## **l) Russie**

NO RAO, Opérateur national pour la gestion des déchets radioactifs (Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами, НО РАО), gère les déchets et CU russes. Il projette de construire un laboratoire souterrain (- 500 m) à Yeniseysky, région de Krasnoyarsk, dans le massif granitique de Nizhnekansky. Une décision concernant la construction d'un dépôt est attendue vers 2025. En parallèle, la Russie prévoit toujours la possibilité d'injecter certaines solutions de déchets dans le sous-sol.

48

## **m) Suède**

Depuis 2011, le processus d'autorisation pour les installations de stockage à Forsmark est en cours. L'autorité de sûreté SSM vient de donner un premier avis favorable pour le choix du site à Forsmark ainsi que pour l'installation de mise en conteneur. SSM, ainsi que la Cour environnementale, transmettront leurs avis finaux au gouvernement en 2017. Les décisions finales des instances politiques - les municipalités concernées et le gouvernement- suivront. Début 2016 la cour environnementale a annoncé sa décision de considérer la demande de SKB pour 12 000 tonnes de combustibles usés comme recevable pour l'enquête publique qui est prévue début 2017.

## **n) Suisse**

Nagra poursuit les études dans deux régions : Jura-est et Zurich-nord-est. Ces deux sites semblent pouvoir accueillir aussi bien les installations de stockage pour FMA, HA et CU, ainsi que les installations de surface requises. Les sites vont être étudiés plus en détail et vers 2020, Nagra effectuera une sélection préliminaire d'un site d'implantation. Le dossier pour le choix définitif du site par le Conseil fédéral est attendu pour 2027. Il doit être approuvé par le Parlement et fera l'objet d'un référendum facultatif vers 2029. Le dépôt profond pour les déchets de faible et de moyenne activité entrera vraisemblablement en service vers 2050 et celui pour les déchets de haute activité vers 2060.

### **5.2.3 Sources d'irradiation à spectre rapide**

#### **a) Allemagne**

Le réacteur FRM II à Garching (2004 - ...), 20 MWth, permet d'irradier en spectre rapide.

#### **b) Belgique**

Le réacteur de recherche BR2 (1963-2036?), 120 MWth, permet d'irradier de petits (diamètre 1,5 à 3 cm x h=80 cm) comme de grands échantillons (diamètre de 8 à 22 cm x h=80 cm) en spectre de neutrons rapides, comme un sous-assemblage de combustible de réacteur RNR.

#### **c) Chine**

Le réacteur de recherche CEFR de 65 MWth (20MWe) refroidi au sodium a été mis en service en juillet 2010. Depuis il a été arrêté pendant de longues périodes. En décembre 2014, le CEFR a fonctionné pendant trois jours à plein régime.

#### **d) Etats-Unis**

Les Etats-Unis n'ont pas de sources à spectre rapide disponibles.

#### **e) France**

Depuis l'arrêt de Phénix, il n'y a plus de réacteur à spectre rapide en France. Le réacteur de recherche Jules Horowitz, en construction, permettra d'irradier un faible volume à haut flux en spectre rapide. Sa mise en service est prévue en 2019.

#### **f) Inde**

Depuis 1985, l'Inde dispose à Kalpakkam du FBTR, Fast Breeder Test Reactor, de 40 MWth. Le Prototype Fast Breeder Reactor (PFBR) de 500 MWe est dans la phase finale de construction. L'un des objectifs est d'étudier le cycle du thorium.

#### **g) Japon**

Le réacteur Jōyō semble définitivement arrêté et, suite à des incidents et aux conséquences de l'accident de Fukushima, le Gouvernement a décidé d'arrêter le projet Monju. Suite à l'échec de certains tests, le régulateur japonais, NRA, a demandé au Gouvernement de trouver un nouvel opérateur pour ce réacteur. Il est très peu probable que les deux réacteurs puissent redémarrer un jour.

#### **h) Pays-Bas**

Le HFR (1961-2024) à Petten permet des irradiations limitées en spectre rapide.

#### **i) Russie**

Le Bor-60 (1969-2020) de 60 MWth est un réacteur de recherche refroidi au sodium. Les caractéristiques du réacteur de puissance à spectre rapide BN-600 (600 MWe) conviendraient pour qualifier le combustible du réacteur Astrid.

### **5.2.4 Principales activités sur les ADS**

Les ADS (Accelerator Driven Systems - Systèmes pilotés par accélérateur) sont proposés comme alternatives aux réacteurs critiques rapides pour la transmutation des actinides présents dans les déchets issus du retraitement des combustibles usés.

Contrairement aux réacteurs à neutrons rapides électrogènes, le cœur d'un réacteur ADS est sous-critique. Afin d'entretenir la réaction en chaîne, un apport externe en neutrons est requis. A cette fin, le faisceau d'un accélérateur de protons de haute puissance est dirigé vers une "source de spallation" (une cible de métal liquide ou solide comme le plomb, le plomb-bismuth, le tantale ou le tungstène). L'interaction entre le faisceau de protons et les noyaux de la cible crée une source très intense de neutrons rapides, permettant d'entretenir et de piloter la réaction en chaîne dans le cœur.

#### **a) Allemagne**

L'Institut de Technologie de Karlsruhe (KIT), l'Institut de Physique Appliquée de l'université de Frankfurt (IAP-FU) et le Helmholtz Zentrum Dresden Rossendorf (HZDR) participent au projet belge Myrrha.

#### **b) Belarus**

Le Belarus a développé un programme ADS expérimental en construisant les assemblages sous-critiques Yalina (faible puissance et spectre thermique) et Yalina-Booster (puissance modérée avec une zone centrale à spectre rapide), utilisés depuis 2005 dans les programmes internationaux de validation de la physique du cœur des ADS.

#### **c) Belgique**

Depuis 1998, le Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire, SCK•CEN, développe le projet Myrrha (Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications). Myrrha sera une installation de recherche multifonctionnelle hybride basée sur un réacteur à neutrons rapides, sous-critique, refroidi avec du métal liquide (plomb-bismuth) et pilotée par un accélérateur de protons.

Le projet sera réalisé en trois phases :

- 1) un accélérateur linéaire de 100 MeV et 4 mA et des installations scientifiques associées pour 2024 ;
- 2) une augmentation de l'énergie des protons accélérés jusqu'à 600 MeV ;
- 3) la construction du réacteur, y compris de la source de spallation.

Le projet Guinevere d'un réacteur d'essai à très faible puissance, basé sur le réacteur Venus piloté par un accélérateur, a été conclu avec succès. L'accélérateur a été construit par le CNRS et le CEA a mis à disposition le combustible. Guinevere a fonctionné aussi bien en mode critique qu'en mode sous-critique avec des neutrons rapides.

#### **d) Chine**

L'Académie chinoise des sciences (CAS) a décidé de construire un ADS pour la recherche en transmutation. A cette fin, un accord de collaboration a été signé en 2016 par le CAS avec la China General Nuclear Power Corporation (CGN, anciennement China Guangdong Nuclear Power Holding Group), partenaire avec EDF des réacteurs EPR en construction à Taishan. La feuille de route prévoit une installation test, suivie d'un ADS de 80-100 MWth et d'une installation de démonstration de 1000 MWth. L'accélérateur de protons sera associé à un réacteur sous-critique à neutrons rapides refroidi avec des sels fondus.

#### **e) Corée du Sud**

L'Institut Nutreck (Nuclear Transmutation Energy Research Center of Korea) et l'Université nationale de Séoul (SNU) développent un programme axé sur la transmutation des actinides mineurs par ADS et le retraitement par pyrochimie.

#### **f) Etats-Unis**

Intérêt du Département de l'Énergie (DOE) et des laboratoires nationaux (Oak Ridge, LANL, ANL, Jefferson Lab, Fermi Lab ...) pour les ADS.

#### **g) France**

Pour mémoire : le CNRS et, en moindre mesure Areva et le CEA, collaborent au projet belge Myrrha.



## h) Inde

Le programme ADS, démarré en 2000, était destiné à accélérer la mise en place du cycle du thorium par la production d'uranium 233 fissile, à partir du thorium 232 non-fissile. Plus récemment, le Bhabha Atomic Research Centre (BARC) a mis l'accent sur le rôle potentiel des ADS pour brûler les actinides mineurs issus du retraitement car les réacteurs rapides sous-critiques seraient plus efficaces que les RNRs critiques.

## i) Italie

Plusieurs centres de recherche (ENEA, INFN, CRS4, ...), universités (Cirten) et industries (Ansaldo Nucleare) participent ou ont participé aux projets européens concernant les ADS. L'INFN de Legnaro propose de construire un ADS basé sur un cyclotron produisant un faisceau de protons de 70 MeV et 0,75 mA. La source de spallation serait une cible de béryllium, le tout refroidi à l'hélium. Le combustible du réacteur sous-critique de 150-200 kWth serait de l'UO<sub>2</sub> enrichi à 20 % dans une matrice de plomb.

## j) Japon

Le projet Omega, initié en 1988 concerne des E&R en séparation-transmutation des actinides mineurs afin de diminuer l'emprise d'un site de stockage. Il comporte la construction d'ADS. La feuille de route actuelle prévoit le TEF-P avec une cible de spallation à faible puissance et un cœur sous-critique brûlant du MOx ; le TEF-T avec une cible à haute puissance mais sans cœur sous-critique à base de MOx; un ADS expérimental d'une centaine de MWth (national ou en collaboration internationale) ; un ADS industriel de 800 MWth.

## 5.3 PROJETS EUROPÉENS DU 7<sup>ÈME</sup> PROGRAMME CADRE ET H2020

### 5.3.1 Stockage géologique

51

Un panorama de projets en cours en 2015 ou 2016 est présenté.

- Cebama<sup>3</sup> Le ciment étant employé pour immobiliser des déchets dans des fûts, comme conteneur, éléments de structure des galeries, bouchons et autres, les propriétés de transports dans le ciment et aux interfaces ciment - roche hôte ou bentonite doivent être étudiées et modélisées.
- Dopas<sup>4</sup> Le projet a pour but d'améliorer la faisabilité industrielle et la performance de bouchons et scellements à utiliser dans des installations de stockage situés dans les roches hôtes étudiés (argile, cristallin et sel). Cinq expériences sont installées : en France, Suède, Finlande, Allemagne et la République Tchèque. Elles servent comme démonstration et leurs caractéristiques sont étudiées.
- IGD-TP<sup>5</sup> La plate-forme technologique européenne IGD-TP sur le stockage géologique des déchets nucléaires est l'aboutissement de travaux commencés durant le 6<sup>ème</sup> Programme Cadre. Un document d'orientation décrit la mission, les objectifs, les prestations et l'organisation de la plate-forme. Il résume également les mesures techniques à mettre en œuvre au cours des 10-15 prochaines années pour appliquer le stockage géologique des déchets nucléaires par les États membres.

---

<sup>3</sup> Cement-based materials, properties, evolution, barrier functions, 2015-2019, Horizon 2020, 11 pays, 27 participants dont le BRGM, l'Association pour la recherche et le développement des méthodes et processus industriels, Université de Lille, Andra et IRSN.

<sup>4</sup> Full-scale Demonstration Of Plugs And Seals; 2012-2016, 8 pays, 14 partenaires dont l'Andra.

<sup>5</sup> Plate-forme technologique européenne IGD-TP sur le stockage géologique des déchets nucléaires, membres fondateurs : les organisations de gestion des déchets en Belgique (ONDRAF), Finlande (Posiva), France (Andra), Espagne (ENRESA), Suède (SKB), Suisse (Nagra), UK (CND) et le Ministère fédéral allemand de l'Economie et de la Technologie (BMW). IGD-TP compte actuellement 107 membres dans 24 pays.

- Joprad<sup>6</sup> Le but de Joprad est d'établir une programmation commune pour les recherches effectuées aux niveaux nationaux concernant le stockage des déchets radioactifs, là où des synergies sont identifiées.
- Mind<sup>7</sup> Le projet a pour objectif principal de quantifier l'impact des activités microbiennes sur la sûreté d'un stockage géologique.
- Modern 2020<sup>8</sup> Le projet vise à aider à concevoir et à mettre en œuvre un programme de surveillance dans les installations de stockage, basé sur les impératifs de sûreté. Le projet tiendra compte des spécificités nationales (inventaire, roche hôte, concepts, réglementations,...). Une attention particulière sera apportée à la compréhension et aux attentes des parties prenantes, en particulier de celles des populations locales.
- SIT EX-II<sup>9</sup> Le projet vise à développer un réseau durable européen pour améliorer la compréhension, l'harmonisation et la collaboration entre organismes de régulation, organisations techniques de sûreté et agences de gestion des déchets.

### 5.3.2 Nouvelles filières, séparation – transmutation

Les stratégies de transmutation reposent principalement sur les neutrons rapides, soit dans des systèmes critiques, soit dans des systèmes sous-critiques (ADS).

Un panorama de projets en cours en 2015 ou 2016 est présenté.

Pour mémoire :

- Alfred est un projet de prototype de réacteur rapide refroidi au plomb.
- Allegro est le projet de prototype de réacteur rapide à caloporteur gaz, décrit plus en détail dans le paragraphe qui y est dédié.
- Astrid est le projet de prototype de réacteur rapide à caloporteur sodium, d'une puissance de 600 MWe, piloté par le CEA.
- Esnii concerne les besoins de démonstration des technologies pour les réacteurs rapides définis dans Gen-IV. Esnii concerne également les infrastructures de recherche, la fabrication du combustible et toute recherche nécessaire à ce but.
- Esnii Plus<sup>10</sup> Le but du projet transversal est de développer une approche stratégique comme appui à l'initiative européenne industrielle durable (Esnii).
- GIF/GEN-IV<sup>11</sup> L'initiative du forum Génération-IV vise le développement de nouveaux types de réacteurs, parmi lesquels les réacteurs rapides produisant un minimum de déchets. Dans une perspective de développement durable, les nouvelles technologies doivent également contribuer à minimiser les risques de prolifération. L'Australie vient de rejoindre le forum.
- Marisa<sup>12</sup> Le projet vise à apporter au projet Myrrha le degré de maturité nécessaire pour commencer la construction. En particulier, le projet soutient l'ingénierie de Myrrha, la coordination du programme R&D, la réalisation du consortium international, la gestion opérationnelle et la préparation du processus d'autorisation de construction. Une feuille de route sera développée, identifiant la contribution de Myrrha comme installation européenne de recherche à neutrons rapides contribuant à la fermeture du cycle de combustible.

<sup>6</sup> Joint Programming on Radioactive Waste Disposal, 2014-2018, Horizon 2020, 5 pays + CE, 10 partenaires dont l'Andra (coordinateur), IRSN, CNRS et Mutadis.

<sup>7</sup> Development of the safety case knowledge base about the influence of microbial processes on geological disposal of radioactive wastes, 2015-2019, Horizon 2020, 9 pays, 15 partenaires.

<sup>8</sup> Monitoring Developments for safe Repository operation and staged closure, 2015-2019, Horizon 2020, 12 pays, 28 partenaires, dont l'Andra (coordinateur), IRSN, Areva, EDF-DTG et XLIM.

<sup>9</sup> Sustainable network of independent technical expertise for radioactive waste disposal, 2015-2017, Horizon 2020, 10 pays, 17 partenaires, dont l'IRSN (coordinateur), le European nuclear safety training and tutoring institute, Mutadis consultants, ASN et l'Institut Symlog.

<sup>10</sup> Preparing ESNII for HORIZON 2020, 2013-2017, 7<sup>ème</sup> PCRD, 14 pays, 36 partenaires dont le CEA (coordinateur), Areva, EDF, Lagrange et Nuvia Structure.

<sup>11</sup> Generation IV International Forum ; 2001- ?, Euratom + 12 pays dont la France.

<sup>12</sup> Myrrha Research Infrastructure Support Action, 2013-2016; 7<sup>ème</sup> PCRD, 9 pays et 15 partenaires dont le CEA, le CNRS, Areva et ACS.

- Matisse<sup>13</sup> Le projet rassemble plusieurs organisations de R&D ayant établi, dans le cadre de l'initiative "European Energy Research Alliance" (EERA), un programme appelé "Joint Programme on Nuclear Materials (JPNM)" pour une meilleure coordination des initiatives nationales, des programmes européens et d'éventuelles collaborations "privé-public" ou transnationales. Le programme de travail du projet inclut des actions, des activités de coordination ainsi que des activités de R&D prioritaires en support du JPNM.
- Maxsima<sup>14</sup> Suite aux recommandations du SRA de SNETP concernant le développement de l'ADS en Europe et plus particulièrement le projet Myrrha, le projet traite des études de sûreté en conditions normales et en conditions incidentelles et accidentelles utiles pour le licensing. Les analyses des accidents sévères pouvant mener à des ruptures de gaine de combustible seront effectuées. Les problèmes d'accident de rupture de tube d'échangeur de chaleur et de la propagation des conséquences d'un tel accident seront étudiés. Des expériences de transitoires de sûreté sur des segments de combustible MOx sont prévues en réacteur expérimental en Roumanie.
- Myrrha<sup>15</sup> Le projet vise la construction d'une installation de recherche multifonctionnelle hybride basée sur un réacteur rapide sous-critique piloté par un accélérateur de particules et refroidi avec du métal liquide (plomb-bismuth). Myrrha devra démontrer la faisabilité du couplage accélérateur - source de spallation - réacteur sous-critique dans une installation préindustrielle. L'outil d'irradiation flexible à spectre rapide offrira aux communautés des réacteurs rapides (SFR, LFR, GFR) une machine pour les tests de matériaux et combustibles.
- Myrte<sup>16</sup> Le projet concerne les recherches nécessaires au développement de Myrrha afin de démontrer la faisabilité industrielle de la transmutation des actinides mineurs dans des déchets HA.
- Pelgrimm<sup>17</sup> Afin de soutenir l'agenda stratégique de la SNE-TP, le projet concerne le développement de combustibles contenant des actinides mineurs pour les réacteurs rapides. Aussi bien le recyclage homogène dans le cœur même, que le recyclage hétérogène en couverture sont étudiés.
- Sacsess<sup>18</sup> Conforme à l'agenda stratégique SRA de SNE-TP, Sacsess procurera un cadre structuré afin d'optimiser le cycle du combustible associé à la S&T. Des études de sûreté doivent identifier les points actuellement faibles. Un volet d'enseignement et de formation est associé au projet.
- Samofar<sup>19</sup> Le but du projet est de démontrer les excellentes caractéristiques de sûreté des réacteurs à sels fondus et de faire en sorte qu'un consortium adéquat puisse le construire.
- Sesame<sup>20</sup> Le projet tend à améliorer la sûreté des réacteurs à caloporteur métal liquide (Astrid, Alfred, Myrrha, ...) en fournissant de nouvelles données expérimentales liées à la sûreté et en améliorant les approches numériques. Cela doit permettre le développement de systèmes qui répondent à des standards plus adéquats, tout en améliorant la culture de sûreté.

<sup>13</sup> Materials innovation for safe and sustainable nuclear energy, 2013-2017; 7<sup>ème</sup> PCRD, 13 pays et 28 partenaires dont le CEA, le CNRS, EDF et LGI Consulting.

<sup>14</sup> Methodology, Analysis and eXperiments for the "Safety In MYRRHA Assessment, 2012-2018, 7<sup>ème</sup> PCRD, 8 pays et 13 partenaires.

<sup>15</sup> Multipurpose Hybrid Research Reactor for High-tech Applications; 1998-2024, collaboration avec les partenaires d'Eurotrans dont le CNRS, le CEA, Areva, Advanced Accelerator Applications et ENEN.

<sup>16</sup> MYRRHA Research and Transmutation Endeavour, 2015-2019, Horizon 2020, 9 pays, 27 partenaires dont ACS, CNRS, Thales et le CEA.

<sup>17</sup> PELlets versus GRanulates: Irradiation, Manufacturing & Modelling, 2012-2015, 7<sup>ème</sup> PCRD, 9 pays, 10 partenaires, dont le CEA (coordinateur), EDF, Areva, Lagrange et le Réseau européen pour l'enseignement des sciences nucléaires.

<sup>18</sup> Safety of actinide separation processes, 2013-2016, 7<sup>ème</sup> PCRD, 13 pays, 26 partenaires, dont le CEA, l'IRSN, le CNRS, l'Université de Strasbourg et Lagrange SARL.

<sup>19</sup> A Paradigm Shift in Reactor Safety with the Molten Salt Fast Reactor, 2015-2019, Horizon 2020, 7 pays, 11 partenaires dont le CNRS, IRSN, Areva, CEA et EDF.

<sup>20</sup> thermal hydraulics Simulations and Experiments for the Safety Assessment of Metal cooled reactors, 2015-2019, Horizon 2020, 9 pays, 23 partenaires dont le CEA, LGI Consulting et IRSN.

- SNE-TP<sup>21</sup> La plateforme technologique européenne sur l'énergie nucléaire durable propose une vision du développement des technologies de l'énergie de fission nucléaire à court, moyen et long termes. Elle propose le développement et la mise en place de technologies nucléaires potentiellement durables, y compris la gestion de toutes les sortes de déchets. La plateforme propose aussi d'étendre l'utilisation de l'énergie nucléaire au-delà de la production d'électricité, notamment pour la production d'hydrogène, la génération de chaleur et la désalinisation de l'eau de mer. La plateforme a préparé l'initiative industrielle européenne, "European Sustainable Nuclear Industrial Initiative" (Esnii), comprenant les deux projets Astrid et Myrrha, ainsi que Alfred et Allegro.

### 5.3.3 Faibles doses, radioprotection

- Melodi<sup>22</sup> La plate-forme est dédiée à la recherche sur le risque des faibles doses. L'objet de Melodi est de proposer des priorités de recherche dans le cadre de Horizon 2020, d'informer les parties concernées sur les avancées des recherches et de disséminer les connaissances.
- Operra<sup>23</sup> Le projet vise à mettre en place une structure de coordination légale et logistique pour gérer les futurs appels à projets européens en radioprotection.

### 5.3.4 Enseignement, formation, gestion des connaissances et aspects sociétaux

- Alice<sup>24</sup> Le projet est une action coordonnée entre partenaires européens et chinois afin de développer l'accès transnational à de grandes infrastructures de recherche sur les matériaux, et en particulier aux installations d'irradiation.
- CINCH-II<sup>25</sup> Le projet est la suite du projet CINCH-I qui a finalisé une stratégie durable à long terme pour l'enseignement de la chimie pour le nucléaire, ainsi qu'une feuille de route pour sa mise en œuvre. CINCH-II vise entre autre le développement et l'implémentation d'un EuroMaster et d'un passeport européen de formation en chimie pour le nucléaire.
- Eagle<sup>26</sup> Le projet aidera à mieux définir et disséminer les bonnes pratiques en information et communication objectives concernant les risques des rayonnements ionisants.

## 5.4 VOYAGE D'ETUDE

La Commission a effectué un voyage d'études en Pologne, République Tchèque et Hongrie du 21 au 30 septembre 2015. Ce voyage avait pour buts :

- 1) de se rendre compte de l'état d'avancement du projet Allegro piloté par les pays du groupe de Višegrad (Pologne, Hongrie, République Tchèque, République Slovaque) ;
- 2) d'apprécier la dynamique des recherches menées par la Pologne, la République Tchèque et la Hongrie en vue du stockage de leurs déchets nucléaires.

<sup>21</sup> The European Technology Platform on Sustainable Nuclear Energy; 2007- ?, ≥19 pays, > 60 membres dont le CEA, l'IRSN, le CNRS, Areva, EDF Research and Transmutation Endeavour, 2015-2019, Horizon 2020, 9 pays, 27 partenaires dont ACS, CNRS, Thales et le CEA.

<sup>22</sup> Multidisciplinary European Low-Dose Initiative, 17 pays, 30 partenaires dont le CEA et IRSN.

<sup>23</sup> Open Project for European Radiation Research Area, 2013-2017, x pays, 66 partenaires dont l'IRSN (coordinateur), Melodi, CEA, Université Paris Descartes, Mutadis Consultants, CEPN, CIRC, InVS et NERIS.

<sup>24</sup> Access to Large Infrastructures in China and Europa , 2012-2016, 7<sup>ème</sup> PCRD, 5 pays, 5 partenaires, dont le CEA.

<sup>25</sup> Cooperation in education and training In Nuclear Chemistry; 2013-2016, 7<sup>ème</sup> PCRD, 7 pays, 11 partenaires dont le CEA

<sup>26</sup> Enhancing education, training and communication processes for informed behaviors and decision-making related to ionizing radiation risks, 2013-2016, 8 pays, 11 partenaires dont l'IRSN et Institut Symlog.

### 5.4.1 Allegro

#### a) Historique des RNR-G

Les réacteurs à neutrons rapides (RNR) avec caloporteur gaz (RNR-G) présentaient en 2002 selon le Generation IV International Forum (GIF) un potentiel prometteur pour atteindre les objectifs des RNR de Génération-IV. Le GIF pensait qu'un déploiement des RNR-G était envisageable à l'horizon 2020. Dans le *Vision Report* de 2009 de la SNE-TP (Sustainable Nuclear Energy Technical Platform), les RNR-G comme les RNR à caloporteur plomb-bismuth (RNR-Pb) étaient des alternatives aux RNR à caloporteur sodium (RNR-Na) qu'il convenait d'explorer. En 2010, l'initiative Esnii (European Sustainable Nuclear Industrial Initiative) de la SNE-TP rassemble les industriels et les organismes de recherche autour d'un plan d'action pour la construction de démonstrateurs technologiques : Astrid pour les RNR-Na, Allegro pour les RNR-G et Alfred, associé à Myrrha, pour les RNR-Pb. Toutefois dans son dernier agenda (Strategic Research and Innovation Agenda, Février 2013), la SNETP redéfinit les objectifs de l'Esnii qui doit se focaliser sur les études en lien avec les projets Astrid (RNR-Na) et Myrrha afin qu'ils puissent être opérationnels à l'horizon 2025. Dans ce dernier agenda stratégique, les RNR-Pb sont vus comme une alternative aux RNR-Na crédible à relativement court terme alors que les RNR-G ne sont envisageables qu'à long terme.

#### b) Objectifs des RNR-G

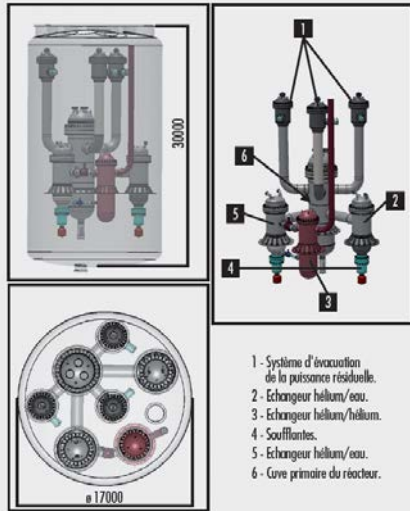
Les RNR-G ont pour objectif la production d'électricité et la fourniture de fluides à haute température, vers 850 °C. Le caloporteur gaz privilégié est l'hélium (He). L'hélium est chimiquement inerte, transparent à la lumière, quelles que soient la température et la pression. L'hélium n'est pas activable par les neutrons. Toutefois ce gaz est un caloporteur médiocre en raison de sa faible densité et de sa faible capacité calorifique. Pour assurer la sûreté d'un RNR-He en toutes circonstances, il faut trouver le meilleur compromis entre la densité de puissance du cœur (qui dépend du combustible), la pression de l'hélium du circuit primaire (plusieurs dizaines de bars) et les matériaux du cœur et de la structure. La capacité calorifique de l'hélium gazeux étant nettement inférieure à celle du sodium liquide, le combustible doit être le plus dense possible. C'est pourquoi on envisage, à terme, le carbure de U/Pu comme combustible. En effet, les mélanges d'oxydes d'uranium et de plutonium (MOx) ne permettraient de porter l'hélium qu'à une température maximale de 560 °C.

Par ailleurs, pour assurer la production de fluides à haute température (850 °C), les gaines de combustible doivent résister jusqu'à 1100 °C en régime normal et, en cas de perte du circuit primaire, pallier le manque d'inertie thermique du réacteur, ce qui peut porter leur température à 1600 °C. Les deux verrous majeurs à lever sont donc la démonstration de sûreté en fonction de la puissance et la conception des éléments de combustible et des assemblages.

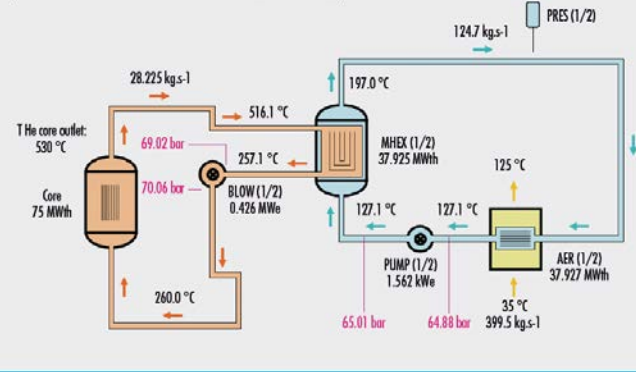
#### c) Le design CEA d'Allegro

En France le Comité à l'énergie atomique a recommandé en 2005 que la priorité de la R&D soit donnée aux RNR-Na et aux RNR-G. Le CEA avait déjà conduit des études sur les RNR-G dans le cadre du GIF, études qu'il a poursuivies en partie dans le cadre de programmes européens (5<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> PCRD, programme GoFastR, ...). Il y a consacré jusqu'à 2008/2009 des moyens importants qui lui ont permis de définir les premières caractéristiques du réacteur expérimental Allegro. Les principaux résultats du CEA sont rassemblés dans son rapport 2012 remis au Gouvernement dans le cadre de la loi de 2006. Les figures présentées ci-après sont issues de ce rapport.

**FIGURE 7 : VUES DU CIRCUIT PRIMAIRE ET DE SON INTÉGRATION DANS L'ENCEINTE RAPPROCHÉE**



**FIGURE 9 : PRINCIPAUX PARAMÈTRES DES CIRCUITS PRINCIPAUX DE REFROIDISSEMENT DU CŒUR ALLEGRO (UNE SEULE BOUCLE REPRÉSENTÉE)**



Comme dans le réacteur envisagé pour la filière industrielle (2 400 MWth), l'ensemble du circuit primaire est inclus dans une enceinte rapprochée métallique étanche. Sa fonction est d'assurer une pression de repli en cas de fuite du circuit primaire, qui peut être combinée à une injection d'azote.

Le cœur de démarrage MOx aurait une teneur de 30 % en plutonium. A terme, il était envisagé de mettre en place un cœur carbure UPuC avec une teneur de 30 % en plutonium. Le rapport CEA 2012 présente les avancées en matière d'assemblage de combustible pour assurer la sûreté d'un RNR-G ainsi que la conception d'Allegro, qui en serait le démonstrateur. Si un cœur MOx (UPuO<sub>2</sub>/aiguilles gainées inox Ti 15-15) est facilement envisageable à mettre en œuvre, il en va tout autrement d'un cœur UPuC avec des aiguilles gainées SiC/SiC pourtant indispensable pour porter l'hélium à 850 °C.

#### d) Le projet V4G4

En 2010, sur la proposition du CEA, trois instituts d'Europe centrale ont signé un MoU (Memorandum of Understanding) pour étudier ensemble le développement et les conditions d'accueil d'Allegro : MTA-EK pour la Hongrie (combustible), VUJE pour la Slovaquie (conception et sûreté) et UJV pour la République tchèque (physique du réacteur, technologie He). L'institut Polonais NCBJ a rejoint ce consortium en 2012 (applications industrielles de la chaleur nucléaire à haute température). Un comité de pilotage du projet Allegro (Steering Committee -ST) a alors été formé de représentants des organismes. Le CEA en a fait partie en tant que porteur du concept de RNR-G dans le GIF et du concept Allegro et a assuré le support technique du projet en transférant sa connaissance au consortium. Ce montage permettait aux membres du consortium de bénéficier de financement par les fonds de cohésion européens. Le programme européen Alliance (Preparation of Allegro - Implementing advanced nuclear fuel cycle in central Europe – FP7 Euratom -2012-2015) a démarré à cette date avec l'ambition de poursuivre le travail du CEA jusqu'à réunir les conditions techniques et administratives pour lancer Allegro. Six institutions des 4 pays d'Europe centrale y ont participé plus le CEA et l'IRSN pour la France et l'INBK pour l'Allemagne.

En 2013 le CEA a donné la priorité de la R&D sur les RNR à Astrid. Le Comité de Pilotage d'Allegro a créé un centre d'excellence pour la recherche sur Allegro, dit V4G4 (4 Višegrad countries) et le partage de la R&D a été précisé. Ainsi MTA-EK en Hongrie a en charge la R&D sur le combustible et sa qualification, VUJE en Slovaquie la R&D sur le concept et la sûreté, UJV en Tchéquie la R&D sur la technologie He et NCBJ en Pologne la R&D sur les matériaux. L'objectif de V4G4 (2014-2020) est, outre de faire avancer la R&D sur les points durs des RNR-G et sur Allegro, d'établir les dossiers pour obtenir les financements européens mais surtout pour

augmenter les financements nationaux, et désigner le pays qui accueillera le prototype de réacteur. Dans cette perspective V4G4 travaille dans le cadre du projet régional Vinco (Višegrad Initiative for Nuclear Cooperation, 2015-2018) qui a succédé à Alliance. Pour ce qui concerne le financement, Allegro n'est éligible aux fonds européens que si Allegro est inscrit dans la Road Map de l'ESFRI (European Strategy Forum on Research Infrastructure).

#### e) Perspectives

Plusieurs groupes de travail ont été mis en place pour traiter des différents thèmes de R&D, dont un est en charge de préparer une nouvelle Road Map. En 2015 V4G4 a défini de façon très détaillée des phases de progression pour le projet Allegro et les actions à conduire par chaque partenaire selon ses compétences et a donné une nouvelle orientation pour le premier cœur : cœur de faible puissance à uranium fortement enrichi. Les années 2015/2016 correspondent à une phase préliminaire de spécifications techniques et d'objectifs de sûreté. Le calendrier des tâches identifiées va jusqu'en 2025, date à laquelle on en serait au choix des principales options et d'une analyse sommaire de sûreté. Le projet ne serait en phase d'avant-projet sommaire qu'à l'horizon 2025.

*La Commission comprend que le projet Allegro est encore dans une phase conceptuelle ; les questions de sûreté et les verrous technologiques ont été identifiés. La Commission est sensible à l'immense effort de R&D maintenant nécessaire pour atteindre les objectifs ambitieux d'Allegro qui lui ont été assignés par V4G4.*

Ces réacteurs, avaient pour objectif de déboucher dans un futur lointain sur un marché ouvert à l'énergie électrique et thermique haute température.

*Le réacteur Allegro ne sera que la première étape vers les RNR-G. Ce n'est pas avant longtemps que les RNR-G seront disponibles pour un usage industriel.*

### 5.4.2 Entreposage et stockage des déchets en milieu géologique

#### a) Pologne

Suite à un accord entre Russes et Américains pour lutter contre la prolifération nucléaire, les combustibles usés du réacteur de recherche Maria sont envoyés en Russie.

##### ◆ Entreposage & stockage des déchets FAVL

Les déchets FAVL sont actuellement stockés à Rozan, sur 3 ha, dans un ancien fort, enfermés dans des containers disposés dans des galeries fermées. Les déchets à vie courte sont enfouis dans des tranchées bétonnées à la base et sur les côtés, avec du ciment et de la bentonite entre les fûts, et du ciment et du bitume au sommet.

Le site de Rozan est en activité depuis 1961, mais devrait fermer entre 2024 et 2029, sa surveillance étant prévue ensuite sur une période de 300 ans. La capacité du site de Rozan étant presque saturée, un nouveau site est à l'étude.

##### ◆ Recherche de sites pour les déchets à vie longue

Les travaux de prospection pour un site de stockage géologique profond ne semblent pas vraiment avoir commencé, la création d'un laboratoire souterrain étant prévue pour 2035, avec mise en opération du site proprement dit à partir de 2070.

Plusieurs types d'environnement géologique semblent être à l'étude, sans priorité évidente à ce stade entre les couches ou dômes de sel du Permien (3 sites potentiels identifiés), les granites du NE du pays comme en Finlande ou en Suède, ou des argiles (couches de 300 m d'épaisseur déjà identifiées).

## **b) République tchèque**

### **◆ Entreposage des déchets FAVL**

Les déchets FAVL sont actuellement stockés à Litoměřice, à flanc de colline dans des galeries souterraines creusées dans une couche de calcaire de 4 à 5 m d'épaisseur comprise entre des niveaux argileux imperméables, dans un bassin sédimentaire situé au nord de Prague. La carrière Richard, qui abrite donc ce stockage déjà en cours, a été exploitée dès 1864, puis utilisée à partir de 1937 et aussi pendant l'occupation allemande comme une usine de construction de matériel de guerre, avant d'être à nouveau exploitée par les ciments Lafarge jusqu'en 1957.

La conversion des galeries en site de stockage s'est effectuée entre 1962 et 1964, le stockage des déchets FAVL étant opérationnel depuis 1965. La température moyenne y est de 10 °C, avec une hygrométrie de 75 à 95 %. Les trois quarts du volume disponible pour le stockage sont déjà occupés.

### **◆ Recherche de sites pour les HAVL**

Les combustibles usés sont actuellement entreposés à sec à proximité des centrales.

Les Tchèques s'orientent vers la recherche d'un site de stockage profond (environ 500 m sous la surface) dans des granites. Après contact avec les collectivités territoriales concernées, 5 sites ont déjà été pré-sélectionnés sur les 7 initialement proposés. L'objectif des travaux de reconnaissance en cours est de n'en garder plus que 2 en 2020, et d'être en mesure de choisir le site final dès 2025.

Avant de démarrer les travaux de creusement du site proprement dit, il est prévu d'y construire d'abord un laboratoire souterrain en 2030. La construction du stockage devrait démarrer en 2050.

## **c) Hongrie**

### **◆ Stockage des déchets FAVL et intermédiaires**

Le site de Bábaapáti, situé dans le sud du pays, à 190 km de Budapest, est déjà opérationnel.

Creusé dans le granite, il comporte 2 tunnels d'accès à des galeries et chambres de stockage de grand diamètre creusées à 200-250 m sous la surface du sol. Les plans initiaux prévoyaient 17 galeries, mais les études hydrologiques menées en cours d'avancement (en particulier grâce à 4 puits horizontaux de reconnaissance), ont conduit à abandonner certains secteurs du massif granitique présentant une trop grande perméabilité de fracture.

Les 6 chambres actuellement disponibles ou en cours de finalisation ont une centaine de mètres de longueur, et semblent suffire à abriter tous les déchets FAVL. Le site possède encore des zones d'extension possible.

Les installations de surface se trouvent dans un vallon boisé et sont très discrètes, l'ensemble du site étant remarquablement intégré au paysage.

### **◆ Recherche de sites pour les HAVL**

Les combustibles usés sont actuellement entreposés à sec dans 5 modules situés sur le site de la centrale de Paks. Quatre autres modules sont en cours de construction. Cette période d'entreposage devrait se poursuivre sur une cinquantaine d'années, et être suivie d'un stockage



dans un site géologique profond dont la construction devrait débuter en 2055 pour une mise en service en 2064.

Les recherches et la caractérisation d'un site dédié ont débuté, et se poursuivront jusqu'en 2030. Elles concernent la formation argileuse de Boda, qui affleure près de cette localité et a déjà été traversée par des forages miniers à 1 km de profondeur dans le sud-ouest du pays. Cette formation a déjà une radioactivité naturelle importante, et présente des épaisseurs comprises entre 300 et 1000 m. Quelques profils sismiques sont déjà disponibles, et d'autres seront tirés pour délimiter la zone d'intérêt principal (secteur où ces argiles sont situées à des profondeurs comprises entre 500 et 900 m).

Des études régionales devront aussi être menées pour étudier la variabilité verticale et latérale de cette formation, la distribution des failles actives (études de néotectonique), et la thermicité (fort gradient géothermique attendu sur l'ensemble de la zone, avec des températures de 50 °C à 1 km de profondeur).

#### **d) Point de vue de la Commission**

*La Commission a pris connaissance avec intérêt des réalisations de la Pologne, de la République tchèque et de la Hongrie en matière de gestion des déchets nucléaires et de stockage géologique.*

#### **5.4.3 Conclusion**

*Ces trois pays ont de solides acquis dans le domaine des sciences nucléaires. Qui plus est, ils ont construit une expérience dans le domaine de la production d'énergie nucléaire et de radio-isotopes pour la médecine. L'intensification des collaborations européennes de ces pays dans le domaine de la Génération IV et du stockage géologique est souhaitable car elle permettrait de renforcer la communauté des sciences nucléaires en favorisant les échanges et les participations croisées dans les grands projets de réacteurs (Astrid, Myrrha, Allegro, ...) et de stockage géologique profond (France, Finlande, Suède, ...).*







**ANNEXE I :**  
**COMPOSITION DE LA COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION**  
**MAI 2016**

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

**Pierre BEREST** – Expert invité de la Commission nationale d'évaluation – Directeur de recherche à l'Ecole Polytechnique.

**Adolf BIRKHOFFER** – Expert invité de la Commission nationale d'évaluation – Professeur émérite à la Technical University de Munich.

**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 l'Université de Paris-Sorbonne (Paris IV).

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

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

**Emmanuel LEDOUX** – Vice-président de la Commission nationale d'évaluation – Directeur de recherche honoraire à l'Ecole des mines de Paris.

**Maurice LEROY** – Vice-président de la Commission nationale d'évaluation – Membre associé de l'Académie nationale de Pharmacie – Professeur émérite – IPHC – Université de Strasbourg.

**Jacques PERCEBOIS** – Professeur émérite de l'Université Montpellier, Directeur du CREDEN (Centre de recherche en économie et droit de l'énergie).

**Gilles PIJAUDIER-CABOT** – Professeur de Génie Civil – Directeur de l'ISA-BTP – Membre sénior à l'Institut Universitaire de France.

**François ROURE** – Professeur et expert scientifique à l'IFP-Energie Nouvelles – Professeur extraordinaire de l'université d'Utrecht.

**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 :

### ORGANISMES AUDITIONNÉS PAR LA COMMISSION

- 25 novembre 2015 : Andra – Avancement de la sélection d'un site pour les déchets FAVL – Option pour l'extension des capacités pour les déchets TFA – Quelles filières pour les déchets à radioactivité naturelle renforcée ?
- 26 novembre 2015 : CEA – Panorama international
- 09 décembre 2015 : Andra – Démantèlement – traitement des déchets – Quelles options, quelles filières ?
- 10 décembre 2015 : CEA – l'état d'avancement des reprises des déchets et projets de recherche sur la stabilité chimique des déchets
- 20 janvier 2016 : Andra (matin) – Cigéo : schéma directeur, étapes-clé de l'avant-projet détaillé, mesures d'accompagnement du projet, projets connexes, labellisation grands projets
- 21 janvier 2016 : CEA – Le programme ASTRID
- 17 février 2016 : Andra – Cigéo : structure des alvéoles et des galeries techniques, process industriels de mise en place des déchets dans les alvéoles – acceptabilité des colis
- 18 février 2016 : CNRS/CEA – Recherche fondamentale et recherche amont dans le cadre de la loi 2006 – Projets relatifs aux ADS au cycle du thorium à ALLEGRO – Avancement des projets de la mission de l'interdisciplinarité du CNRS
- 30 mars 2016 : Andra – Les comportements THM et hydraulique-gaz de Cigéo et du milieu géologique environnant
- 31 mars 2016 : CEA – ASTRID – SCE gaz

#### AUDITIONS RESTREINTES

- 03 juin 2015 : CEA – Astrid et le rapport 2015 du CEA
- 07 octobre 2015 : Andra – matin – Projet Cigéo
- 07 octobre 2015 : EDF – après-midi – Retour sur le rapport n°9
- 08 octobre 2015 : CEA – matin – Panorama des recherches menées au CEA/DEN pour une gestion durable des matières et déchets (loi 2006)
- 08 octobre 2015 : Areva – après-midi - Perspective 2015-2016 – Retour sur le rapport n°9
- 26 octobre 2015 : Rencontre CNE/IRSN
- 20 janvier 2016 : Andra – Insertion territoriale de Cigéo
- 14 avril 2016 : Andra – Livrables projet Cigéo 2015

## **AUDITIONS DE LA COMMISSION**

29 octobre 2015 :      Audition de la Commission par le CLIS

## **VISITES DE LA CNE2**

04 juin 2015 :        Visite de la Centrale de Chooz d'EDF

07 avril 2016 :      Visite du site d'Iter et du Centre CEA de Cadarache



**ANNEXE III :**  
**Liste des personnes auditionnées par la Commission**

**ANDRA**

ABADIE Pierre-Marie  
ALAVOINE Olivier  
ARMAND Gilles  
BONNEVILLE Alain  
BOSGIRAUD Jean-Michel  
CALSYN Laurent  
DUTZER Michel  
FARIN Sébastien  
GERARD Fanny  
GIFFAUT Eric  
HOORELBEKE Jean-Michel  
HURET Emilia  
KRIEQUER Jean-Marie  
LABALETTE Thibaud  
LAUNEAU Frédéric  
LAVILLE Arnaud  
LEVERD Pascal  
L'HONNEUR Frédéric  
MENANTEAU Jean-Michel  
MICHEL-DIT-LABOELLE Nicolas  
OZANAM Odile  
PEPIN Guillaume  
PETIT Laurence  
PLAS Frédéric  
ROUX-NEDELEC Pascale  
SEYEDI Darius  
SCHUMACHER Stephan  
TALANDIER Jean  
TALLEC Michèle  
TEXTIER-MANDOKI Nathalie  
THABET Soraya  
TORRES Patrice  
VOINIS Sylvie  
WENDLING Jacques  
YVEN Béatrice

**AREVA**

DREVON Caroline  
FORBES Pierre-Lionel  
GAGNER Laurent  
LAMOUREUX Christine  
LEBAILLIF Daniel  
LEBRUN Marc  
ROMARY Jean-Michel  
VIDEAU Gérard

**CEA**

ADVOCAT Thierry  
BEHAR Christophe  
BERTRAND Frédéric  
BOURG Stéphane  
BOULLIS Bernard

CACHON Lionel  
CHAIX Pascal  
DELAGE Fabienne  
DEVICTOR Nicolas  
GAUCHE François  
GAILLARD-GROLEAS Geneviève  
GARNIER Jean-Claude  
GEORGES Christine  
IRACANE Daniel  
LADIRAT Christian  
LAMOTTE Hervé  
MARTIN Philippe  
MAUGER Gédéon  
MUNIER Isabelle  
NICOLAS Laetitia  
PARET Laurent  
PIVET Sylvestre  
PLANCQ David  
PRENE Philippe  
ROUAULT Jacques  
TOURON Emmanuel  
VALOT Carole  
VARAINE Frédéric  
WAHIDE Carole

**CNRS - IN2P3**

BARTHE Marie-France  
BIARROTTE Jean-Luc  
DAVID Sylvain  
FUCHS Alain

**CONSEILLERS NUCLEAIRES PRES LES  
AMBASSADES DE FRANCE**

GORBATCHEV Alexandre (MOSCOU)  
PINEL Cyril (LONDRES)

**ECOLE DES MINES DE NANTES**

BRETESCHE Sophie

**DGEC**

GARD Louis-Marie

**EDF**

BENOIT Géraldine  
DUMORTIER François  
ISNARD Luc  
LAUGIER Frédéric

**ESK**

SAAS Arsène

**ICSM**

MEYER Daniel

**LPSC GRENOBLE**

RUBIOLLO Pablo

**ONDRAD**

BRAECKEVELDT Marnix

## ANNEXE IV :

### LISTE DES DOCUMENTS TRANSMIS À LA COMMISSION EN 2015-2016

#### ANDRA

- Mémo de présentation des colis de déchets vitrifiés HA portés à l'inventaire de Cigéo – 30 juin 2015.
- Le journal de l'Andra – n°20 – printemps 2015 – Edition Meuse/Haute Marne.
- Le journal de l'Andra – n°20 – printemps 2015 – Edition Nationale.
- Rapport de la revue de projet Cigéo réalisée du 23 mars au 25 juin 2015 - 13 juillet 2015.
- Document technique – Projet FAVL – Evaluation géologique des sites accueillant des installations nucléaires de base – juillet 2015.
- Document technique – PNGMDR 2013-2015 – Projet de stockage de déchets radioactifs de faible activité massique à vie longue (FAVL) – Rapport d'étape 2015 – juillet 2015.
- Inventaire nationale 2015 – juillet 2015.
- Note de positionnement sur la réversibilité – Cigéo – 5 octobre 2015.
- Mémo sur les valeurs des paramètres retenues à ce jour pour les évaluations de la réponse THM de la couche du Callovo-Oxfordien à la charge thermique des quartiers HA – novembre 2015.
- Document technique – Règles de co-stockage des familles de colis MA-VL sur la base de catégories physico-chimiques – données d'entrées pour l'APD – Septembre 2015.
- Règles de co-stockage des familles de colis MAVL sur la base de catégories physico-chimiques, données d'entrées pour l'APD – Septembre 2015.
- Note de positionnement sur la réversibilité – janvier 2016.
- Présentation du modèle de comportement mécanique des argilites du Callovo-Oxfordien dit INERIS/ANDRA.
- Note sur le dimensionnement thermique des quartiers HA – 8 avril 2016.
- Dossier d'options de sûreté – Partie après fermeture (DOS-AF) – 8 avril 2016.
- Dossier d'options de sûreté – Partie exploitation (DOS-Expl) – 8 avril 2016.
- Dossier d'options techniques de récupérabilité (DORec) – 8 avril 2016.
- Cigéo – Proposition de plan directeur pour l'exploitation (PDE) – 8 avril 2016.
- Glossaire des livrables CIGÉO 2015 – 8 avril 2016.
- Projet Cigéo : Evaluation du transitoire hydraulique-gaz en post-fermeture – 30 mars 2016.

#### CEA

- Rapport d'activité technico-économie au CEA – Année 2014.
- Rapport PNGMDR – CEA – Avancées des recherches sur la séparation-transmutation et le multi-recyclage du plutonium



## ANNEXE V : OPÉRATIONS DE REPRISE-CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS ET R&D ASSOCIEE

### *Cadarache-CEA.*

Tous les déchets technologiques contaminés alpha du CEA, plus ou moins irradiants, sont traités à Cadarache par compactage et cimentation. Les poubelles de 50 L ou les fûts de 100 L des producteurs sont compactés et mis en conteneurs de 500 ou 870 L dans lesquels le ciment est injecté. La chaîne de conditionnement permet l'archivage des données radiologiques. Les colis sont ensuite transportés vers le Cedra, les colis de 500 L irradiants sont entreposés en puits (25 colis/an) et les autres (150 colis/an) en surface.

La RCD des déchets alpha entreposés à Pegase-Cascad est achevée. Entre 2006 et 2013, 2700 fûts de 100 L ont ainsi été reconditionnés en 619 conteneurs de 870 L et entreposés au Cedra. Avant de réaliser cette opération, le CEA et Areva ont utilisé l'entrepôt de Pegase pour valider le code de production d'hydrogène par radiolyse alpha dans les déchets technologiques (voir ci-dessous).

### *Marcoule-CEA*

Une unité de conditionnement de cimentation a été mise en place à Marcoule en 2012 (sur le modèle de celle de Cadarache) pour conditionner les déchets technologiques historiques contaminés alpha en attente de traitement sur ce site. Les conteneurs de 870 L sont transportés vers le Cedra. L'opération de reprise devrait se terminer vers 2017.

La RCD des fûts de bitumes de Marcoule a commencé en 2000 par la reprise des fûts classés FAVL. Le reconditionnement permet l'archivage des caractéristiques radiologiques des nouveaux colis qui sont entreposés dans l'entreposage EPI. Des analyses destructives sur 5 % des colis repris, permettant la caractérisation chimique et radiochimique des enrobés bitumineux, n'ont pas détecté de colis hors normes par rapport à ce qui est attendu d'après le procédé d'enrobage. A propos de ces enrobés, le CEA a poursuivi l'examen des données calorimétriques obtenues l'an dernier (voir rapport n°9) pour déceler le rôle éventuel de constituants mineurs sur leur stabilité en fonction de la température. Ces résultats complémentaires ne remettent pas en cause ceux déjà acquis. Tout échauffement local dû aux réactions exothermiques entre les nitrates et d'autres sels reste très faible et ne s'amorce qu'au-delà de 100 °C. Il ne peut pas y avoir d'auto emballement. Il reste à démontrer la stabilité des bitumes eu égard à de lentes modifications de nature chimique ou physique sur une centaine d'années en entreposage dans les alvéoles MAVL, et donc que les colis primaires conservent bien les caractéristiques qu'ils avaient lors de leur mise en colis de stockage.

Il existe à Marcoule, en entreposage, des déchets métalliques de structure de combustible UNGG : gaines en magnésium, aluminium ou inox et des déchets de procédés pulvérulents : boues, poudre de graphite, fines, résines. Ils sont analogues à ceux entreposés à la Hague (voir ci-dessous). Avant de les reprendre le CEA étudie des conditionnements. Cette R&D est très en amont des opérations de reprise.

Le conditionnement des déchets magnésiens est défini (voir rapport n°9). Les essais de compactage de gaines inactives sont en cours pour obtenir le maximum de densité. De même, la radiolyse gamma du géopolymère (une zéolithe de silico- aluminate de sodium hydratée dopée au fluor) retenu comme matrice d'enrobage est étudiée. La production d'hydrogène est comparable à celle de la radiolyse des ciments. Le CEA envisage la caractérisation complète du colis primaire vers la fin de 2020.

Les déchets pulvérulents seront conditionnés par cimentation homogène dans des conteneurs inox de 380 L. Des essais de faisabilité en inactif à échelle 1 ont été réalisés avec un taux d'incorporation de 10 % en masse. Aucun calendrier n'est affiché par le CEA pour ce colis.

Les études préalables à la RCD d'autres déchets de Marcoule se poursuivent. La Commission n'a pas eu d'information cette année.

### *La Hague-Areva*

La RCD de l'usine UP2 400 (opération dite RCD) dont les 6 INB sont réparties sur le site de la Hague est en cours depuis 2014. Elle nécessite d'importants travaux de construction de génie civil et d'aménagements pour avoir accès aux déchets et pour les récupérer, ainsi que l'installation d'équipements spéciaux pour les trier puis les conditionner. Les divers déchets technologiques (non contaminés alpha) sont en cours de cimentation selon les spécifications des colis C2 et C'2, les PF dits UMo sont en cours de vitrification à haute température (100 colis CSD-U déjà réalisés, statut HA0), les boues de la STE2 seront mises en colis C5 (en cours d'autorisation, voir rapport n°9, annexe IX), les coques et embouts et les fines de cisailage seront compactés et mis en colis dits CSD-C HA0 (1500 colis prévus) et les fines de dissolution et résines seront cimentées en colis CFR-HA0 (120 colis prévus). Les colis CSD-C HA0 et CFR-HA0 sont en cours de développement. Les déchets de structure UNGG (SOD) et les déchets graphite-magnésien sont voués à une cimentation. Enfin les déchets technologiques dits alpha seront traités, comme d'autres déchets de même nature, par le procédé PIVIC (incinération, fusion, vitrification dans le conteneur de déchets) en développement. Le colis PIVIC devrait être au point dans une dizaine d'années (2025).

La R&D sur le colis C5 a franchi toutes les étapes nécessaires pour estimer et optimiser les 6 paramètres de la cartographie Areva.

70

La typologie des déchets des silos HA0 et SOC conduit Areva à compacter ensemble les gros déchets (coques, embouts, déchets technologiques métalliques, organiques et oxyde) selon la technologie déjà utilisée pour réaliser les colis CSD-C et à noyer dans du ciment les déchets de faible granulométrie (fines de cisailage et de dissolution, et résines) selon la technologie classique de cimentation homogène pour le colis CFR-HA0. Il convient évidemment de séparer ces deux typologies de déchets lors de la reprise des déchets des silos. En raison de la forte radioactivité alpha (TBq/t) et bêta (dizaine à centaine de TBq/t) des déchets, le phénomène redouté pour les colis est une production importante d'hydrogène, essentiellement par radiolyse de l'eau contenue dans les colis. Pour le CSD-C HA0 il y a peu d'eau résiduelle dans les déchets et la production est faible (0,2 L/an). Pour le colis CFR-HA0 Areva a développé une formulation du ciment compatible avec la nature des fines métalliques et des résines organiques (rapport 30/70) et assurant une répartition homogène jusqu'à 11 % de déchet. Mais dans ces conditions, la production moyenne d'hydrogène à partir de l'eau de pore du ciment et des résines est évaluée à 120 L/an/colis, valeur très au dessus de la valeur maximale admissible pour Cigéo (40 L/an). C'est le rapport des fines de dissolution (de très fine granulométrie et riches en émetteurs alpha) sur les fines de cisailage qui règle, en fait, la production d'hydrogène. Pour certains colis ce rapport sera élevé et faible pour d'autres. Areva et Andra examinent si les quantités d'hydrogène libérées par les colis CFR-HA0 seront gérables en exploitation et après fermeture de Cigéo.

Les déchets technologiques alpha (bâtiment 119) sont de même nature que d'autres déchets alpha (usine ATPu et Melox, usines de retraitement de la Hague) : mélanges hétéroclites de matières organiques diverses et de métaux. Pour les conditionner le CEA développe avec l'Andra et Areva (contrat PIA) le procédé PIVIC. Il consistera à incinérer dans un four à plasma la matière organique des déchets puis à fondre ensemble par induction dans un creuset les cendres d'incinération, de la fritte de verre et les métaux non incinérés. Le creuset cylindrique (dit CAN, 110 kg) composé de deux enveloppes, l'une en inox, l'autre en céramique, contiendra *in fine* une partie vitrifiée incorporant les cendres et renfermant l'essentiel de la radioactivité alpha et une partie métallique. Un creuset pourrait correspondre au traitement de 10 fûts de 120 L de déchets. L'enceinte d'incinération et le creuset sont couplés. Les gaz de combustion sont traités. Le colis primaire PIVIC sera constitué de deux creusets mis en conteneur métallique. Des essais de fusion métal/fritte inactifs ont été réalisés avec succès.

Les 1100 tonnes de déchets mixtes de chemise graphite (90 %) et de gaines en magnésium (10 %), avec des traces d'uranium, et en aluminium entreposés dans les silos 115 et 130 ont des activités massiques en  $^{14}\text{C}$  et  $^{36}\text{Cl}$ , respectivement de l'ordre de 12 000 et 250 Bq/g. Ces activités sont de l'ordre de grandeur des activités de certains déchets graphites FAVL d'EDF et les rendraient éligibles au stockage FAVL mais leur activité alpha en Pu et Am est élevée (36 TBq) ; elle doit être prise en compte. Par ailleurs leur conditionnement par cimentation est compliqué car il doit empêcher le contact carbone magnésium pour éviter la formation de méthane radioactif et réduire au minimum la formation d'hydrogène par réaction entre Mg, U et Al avec l'eau. La R&D est en cours. Il existe aussi 50 t (600 TBq alpha) de graphite en poudre et de divers matériaux minéraux et organiques dans les décanteurs de l'atelier de dégainage de UP2 400. Ce déchet est à rapprocher de celui de Marcoule pour lequel le CEA étudie la cimentation.

Il y a d'autres déchets à reprendre et à conditionner sur le site de la Hague, mais les tonnages sont plus faibles que ceux pour lesquels Areva développe actuellement un conditionnement. A la limite ils seront mis en entreposage jusqu'à ce que la R&D aboutisse à un conditionnement définitif.

Les opérations de RCD du CEA et la Hague sont programmées selon un calendrier compatible avec les chroniques du PIGD de Cigéo et de l'ouverture d'un stockage FAVL. Areva prévoit les dossiers de spécifications des colis CSD-C HA0 et CFR-HA0 pour 2016. Pour les autres la R&D doit avancer avant d'aboutir à cette étape.

Les opérations de RCD ont permis aux producteurs de déchets de mesurer dans des conditions réelles la production d'hydrogène de radiolyse dans des colis de déchets MAVL riches en matière organique. La radiolyse dans ces colis est inévitable. Il est donc important, en général, de pouvoir estimer la production d'hydrogène, à défaut de la mesurer. Selon la nature du colis primaire plusieurs codes sont utilisés par Areva et le CEA et toute donnée permettant de valider les codes est importante.

L'expérience a été conduite sur l'entreposage des déchets technologiques alpha dans Pegase, avant que les fûts les contenant soient reconditionnés. Le local d'entreposage ventilé se prêtait bien à la mesure du flux d'hydrogène émis par les 2714 fûts dans lesquels les oxydes  $\text{PuO}_2$  (UNGG) et  $\text{PuUO}_2$  (REP) irradièrent la matière organique (coton, latex, PVC, cellulose, ...) où ils étaient déposés sous forme d'agrégats de grains micrométriques. Plusieurs bilans en hydrogène ont été faits. Ils ont montré que la production d'hydrogène moyenne, ramenée aux 619 colis de 870 L après reconditionnement des fûts, était de 8,6 L  $\text{H}_2$ /colis/an. Cette valeur a été confrontée à celle obtenue par mesures directes sur 29 colis de 870 L représentatifs de fûts plus ou moins riches en émetteurs alpha. Elle a conduit à la valeur de 8,1 L/colis/an). L'analyse statistique du nombre de colis en fonction du débit montre que 90 % des colis émettent moins de 22  $\text{LH}_2$ /colis/an. Le MOP utilisé dans les calculs de débits par radiolyse alpha appliqué à la situation étudiée donne une moyenne de 33  $\text{LH}_2$ /colis/an. Il est très majorant.

La radiolyse produit de l'hydrogène et dégrade la matière organique. Cette dégradation conduit à la production d'espèces chimiques (produits de dégradation hydrosolubles, PDH) pouvant modifier à long terme, lors de la ruine des colis, le confinement des radionucléides. La Commission a donné dans le rapport n°9 quelques indications sur la R&D qui est conduite par l'Andra pour tenir compte de ces phénomènes dans la migration des radionucléides. Les PDH sont des acides organiques ou des molécules portant cette fonction chimique. Ils diffusent dans l'argile et les matériaux cimentaires mais ils y sont aussi en partie retenus. Ils sont plus ou moins complexants vis à vis des actinides, entre autres, ce qui modifie la solubilité, la sorption et la diffusion des éléments. En raison de ces multiples interactions il est très difficile de prévoir au total les effets sur le confinement des radionucléides. C'est pourquoi l'Andra conduit un important programme de R&D sur ce sujet, qui devrait être achevé en 2018, pour corriger les valeurs des paramètres géochimiques associés qui contrôlent la migration des radionucléides.





## ANNEXE VI : DÉMANTÈLEMENT ET R&D ASSOCIEE

L'assainissement/démantèlement (A&D) des installations nucléaires (réacteurs, usines du cycle du combustible, recherche), généralement des INB, conduit à des opérations complexes de caractérisation radiologique des bâtiments, installations et équipements et d'opérations relevant de l'ingénierie nucléaire pour leur démolition. Il pose souvent aux producteurs, comme lors des opérations de RCD, le problème du conditionnement de nouveaux déchets radioactifs, ce qui nécessite au préalable leur caractérisation. Au delà des opérations de chantiers à la charge des producteurs, l'Andra doit gérer les déchets qui ne peuvent pas et ne pourront pas être recyclés. Les enjeux de l'A&D sont ainsi partagés par l'Andra et les producteurs : inventaires des déchets au plus près, spécifications des colis pour prise en charge en stockage, réduction des volumes à stocker au vu des capacités limitées de stockage des déchets TFA, recyclage des TFA et optimisation économique.

Les déchets des démantèlements en cours venant de EDF sont connus, sans pour autant que leur gestion soit vraiment fixée. Les empilements graphite iraient en stockage SCR directement ou bien après un traitement de décontamination (l'incinération étant exclue). En effet l'inventaire en <sup>36</sup>Cl représente 75 % de la capacité radiologique du CSA. La déconstruction des réacteurs entraînera des déchets secondaires.

Le démantèlement sous eau des empilements UNGG de Chinon conduira à des résines échangeuses d'ions chargées en <sup>36</sup>Cl et quelques milliers de tonnes de gravats (bétons contaminés) et à des boues (enlèvement de 10 cm de béton des parois des caissons). Les chemises graphites de SLA1 et A2 (2000 t) iront à Cigéo. La reprise des opérations de démantèlement par EDF est liée à la mise en service d'Iceda pour entreposer les premiers déchets des UNGG et des autres réacteurs.

L'A&D du réacteur REP de Chooz (350 MWe) est, pour EDF, la première expérience de démantèlement de tels réacteurs. L'évacuation des gros composants (pressuriseur, échangeurs) a nécessité d'importants chantiers de préparation, de constructions annexes, de qualification des outils et de traitement des déchets. La déconstruction de la cuve est en préparation. Les 4 échangeurs ont été stockés au Cires. Le bilan des déchets attendus est de 20 t (0,1 %) de FAVL, 2300 t (6,4 %) de FMA-VC, de 7900 t (21,3 %) de TFA et de 26 530 t (72,2 %) de déchets conventionnels.

Pour les autres REP les échéances d'A&D sont lointaines bien qu'EDF confirme que sa stratégie en la matière est le démantèlement dans un délai aussi court que possible selon les possibilités d'entreposage et les filières de déchets. Cette position est conforme à la stratégie nationale. Selon une estimation raisonnable fondée sur l'effet de série les quantités et le devenir de déchets du parc REP EDF seraient les suivants:

- déchets conventionnels, 880 000 t avec 90 % de recyclage et 10 % en ISD,
- MAVL, 300 t avec entreposage dans Iceda puis stockage dans Cigéo,
- MAVC, 53 000 t avec 98 % dans le CSA et 2 % à Socodei/Centraco pour incinération puis stockage au CSA et pour fusion puis recyclage en conteneurs pour le CSA ou le Cires,
- TFA, 11 5000 t, au Cires (ou recyclage, stockage sur site, ou stockage dédié).

Areva et le CEA ont déjà conduit des opérations importantes d'A&D et ont plusieurs chantiers en cours. La diversité des installations, uniques en leur genre, ne permet pas d'établir systématiquement les proportions de catégories de déchets de démantèlement. Néanmoins dans tous les cas se sont les déchets TFA qui dominent.

D'une façon générale c'est le CEA qui assure, pour les producteurs la R&D qui sous-tend l'A&D : caractérisation des installations et des déchets, traitement des effluents et des solides et

conditionnement des déchets, outils d'intervention et de gestion. Il travaille avec de nombreux industriels. Le marché international du démantèlement est déjà conséquent et devrait croître.

Les opérations de A&D sont suivies par l'ASN qui attend plusieurs dossiers d'Areva sur la gestion des déchets et le démantèlement (point décennal attendu pour juin 2016) ainsi que du CEA.

La projection de l'Andra pour les déchets à fin 2030 montre que 500 000 m<sup>3</sup> de TFA et 100 000 m<sup>3</sup> de FMA-VC sont attendus du démantèlement et beaucoup moins de MAVL et FAVL. A terme, vers 2080, le démantèlement devrait produire au moins 65 000 m<sup>3</sup> de MAVL, 180 000 m<sup>3</sup> de FAVL, 1,8 millions de m<sup>3</sup> de FMA-VC et 2,1 millions de m<sup>3</sup> de TFA. Si le CSA peut accueillir les déchets FMA-VC de démantèlement, ce ne sera pas le cas du Cires pour les TFA (voir ci-dessous). L'Andra souligne toutefois que le CSA a été construit pour les déchets FMA-VC d'exploitation et non de démantèlement, c'est pourquoi elle établit avec les producteurs de nouvelles spécifications pour l'acceptation de ces déchets au CSA.

L'Andra et l'ANR ont lancé fin 2014 un appel à projets innovants pour le soutien au démantèlement, financés sur le PIA à hauteur de 45 M€. Il visait tous les acteurs de la R&D du monde académique et industriel. Sept projets ont été sélectionnés pour la caractérisation des installations à démanteler ou des déchets de démantèlement et 5 pour le tri et traitement des déchets. Le projet "Profusion" pour l'étude de la fusion/décontamination des métaux d'Eurodif concerne directement le recyclage des TFA (voir ci-dessous). Les autres projets concernent tous les déchets. Areva et le CEA participent à la plupart des 12 projets. Le projet Dem & Melt vise le développement du projet PIVIC d'incinération, fusion et vitrification directement en conteneur de déchets MAVL issus de la préparation du MOX (organiques et métalliques) mais aussi de déchets technologiques contenant de la matière organique incinérable.

Le deuxième appel d'offres vient d'être lancé (décembre 2015 – mars 2016).

L'A&D repose, tout au long de la chaîne des opérations allant de la caractérisation radiologique initiale des installations jusqu'à la caractérisation finale des lieux qui les abritaient (et de l'environnement), sur des techniques et des procédés éprouvés adaptés aux milieux radioactifs. Les radionucléides à prendre en compte, notamment ceux à vie longue, sont connus. Les déchets issus des différentes opérations sont identifiés. Pour la plupart ils peuvent rejoindre les filières de gestion industrielle opérationnelle. Les études portent sur l'optimisation économique en jouant sur le recyclage des matériaux les moins radioactifs (TFA) et la meilleure utilisation des capacités de stockage. La R&D associée concerne essentiellement la réduction des incertitudes sur l'inventaire radiologique des déchets, les possibilités de décontamination de certains déchets et leur conditionnement. Au-delà la R&D rejoint celle du comportement des colis de déchets en stockage.

## ANNEXE VII : DECHETS FAVL ET R&D ASSOCIEE

L'inventaire actuel des déchets FAVL est donné dans le rapport d'étape de l'Andra de Juin 2015. Il n'y a pas de modifications majeures des typologies et quantités rapportées dans les rapports n°8 et 9 de la Commission.

Le stockage devrait accueillir des déchets radifères (45 000 m<sup>3</sup>) et Tenorm (38 000 m<sup>3</sup>), des déchets technologiques de la Hague ne pouvant aller au CSA (16 000 m<sup>3</sup>), des sources scellées (2000 m<sup>3</sup>), des déchets graphite (23 000 tonnes environ 90 000 m<sup>3</sup> avec les résines) et 32 000 fûts bitume (42 000 m<sup>3</sup>). Ces volumes sont ceux des déchets conditionnés selon les hypothèses actuelles et mis en colis de stockage, si nécessaire. Les colis primaires et de stockage seront en béton, sauf pour les déchets radifères. Ceux-ci iront au stockage en fûts ou conteneurs métalliques. Les déchets FAVL représentent donc à ce jour environ 230 000 m<sup>3</sup>. Il faudra peut être y ajouter 86 000 m<sup>3</sup> de déchets de Malvesi (gypses et boues déshydratées) s'il n'était pas possible de les stocker sur le site de Malvési. Ce point est en discussion entre l'Andra et Areva.

Les radionucléides de longue période à prendre en compte dans la gestion des déchets FAVL sont essentiellement : <sup>36</sup>Cl (3 10<sup>5</sup> a) et <sup>14</sup>C (5,7 10<sup>3</sup> a) pour les empilements graphite, <sup>226</sup>Ra (1,6 10<sup>3</sup> a) et <sup>230</sup>Th (7,5 10<sup>4</sup> a) et leurs descendants pour les radifères, <sup>63</sup>Ni (100 a), <sup>241</sup>Am (430 a), <sup>240</sup>Pu (6,5 10<sup>3</sup> a), <sup>79</sup>Se (7 10<sup>4</sup> a), <sup>99</sup>Tc (2 10<sup>5</sup> a), <sup>129</sup>I (1,6 10<sup>7</sup> a) pour les chemises graphites, les bitumes et des déchets technologiques de la Hague (CBF C'2) auxquels il faut ajouter pour ces 3 catégories de déchets la possibilité de présence de <sup>41</sup>Ca (1,010<sup>5</sup> a), <sup>93</sup>Mo (3,5 10<sup>3</sup> a), <sup>238</sup>Pu (88 a) et de radionucléides à vie courte, <sup>137</sup>Cs (30 a), <sup>90</sup>Sr (28 a) et <sup>241</sup>Pu (14 a). Tous les radionucléides artificiels sont des produits d'activation ou des produits de fission. Les FAVL contiennent aussi des toxiques chimiques, le principal étant l'uranium, dans les déchets radifères (dizaines de tonnes).

75

L'activité massique des divers radionucléides, est, par exemple, environ le dixième de celle des déchets MAVL mis en colis CSD-C (sauf pour l'iode), mais les quantités de déchets en jeu conduisent à des activités totales bien supérieures à celles pouvant être admises au CSA. La capacité d'accueil du CSA en <sup>36</sup>Cl est à 90 % de la possibilité de stockage, qui sera, pour l'essentiel consommée par les chemises graphite UNGG du Bugey (non contaminées en produits de fission et actinides). Bien que leur activité apparaisse aujourd'hui surestimée, le CSA ne semble plus en mesure de recevoir légalement d'autres déchets graphite FAVL.

Les déchets radifères de Solvay sont entreposés à Cadarache (fûts) et à la Rochelle (en vrac), ceux d'Areva à Jarré (fûts) et ceux du CEA à Itteville (déposante). Des déchets FAVL non nucléaires, ne renfermant que des radionucléides naturels sont dans un bâtiment dédié sur le Cires.

Pour l'instant aucun déchet graphite n'est conditionné. Environ 80 % des déchets graphite (empilements) sont encore en place dans les réacteurs UNGG, 6 de EDF (Chinon A1, 2 et 3, Bugey 1, Saint Laurent A1 et 2) et 6 du CEA (G 1,2 et 3 à Marcoule, EL 1 et 2 à Saclay, Rapsodie à Cadarache) et 20 % (chemises et divers) sont en entreposage à La Hague, Saint Laurent et Marcoule. Au total Il y a 23 000 tonnes. L'inventaire total en <sup>36</sup>Cl est estimé à 2 TBq.

Les derniers résultats de caractérisation des déchets graphite d'EDF permettent de fixer à 0,9 TBq leur activité en <sup>36</sup>Cl (0,3 pour les empilements et 0,6 pour les chemises). Les 15 000 tonnes d'empilement renferment 30 kg de chlore et 250 g de <sup>36</sup>Cl. L'activité en <sup>36</sup>Cl pourrait être réduite par traitement thermique. EDF optimise (via des études avec le CEA) le traitement thermique du graphite pour le décontaminer en <sup>14</sup>C, sa destruction par gazéification étant exclue à l'heure actuelle. L'activité en <sup>36</sup>Cl des déchets graphites FAVL du CEA et d'Areva est donc estimée par différence à 1,1 TBq.

Les colis bitumes du CEA sont à Marcoule : une partie dans des casemates de la STEL (fûts) et une partie dans l'EIP (fûts après reconditionnement). L'activité des fûts de bitumes FAVL de

Marcoule en  $^{36}\text{Cl}$  et  $^{129}\text{I}$ , à la limite de détection, est estimée à 0,06 TBq. Celle de  $^{99}\text{Tc}$  doit être mieux évaluée. Le CEA considère qu'un éventuel traitement des bitumes par incinération/vitrification n'est pas viable économiquement. Mais cette question n'est pas définitivement tranchée.

Les colis béton-fibre de déchets technologiques CBF-C'2 entreposés à la Hague classés FAVL ont un inventaire radiologique à la limite haute de la classification TFA et beaucoup sont irradiants.

Le comportement physico-chimique de la plupart des espèces que peuvent former, *a priori*, les radionucléides présents dans les déchets FAVL, en milieu argileux et cimentaire, est plus ou moins prévisible d'après les bases de données incluant les études conduites sur les déchets MAVL de même nature chimique. Mais, même dans les cas les plus favorables, il faut confirmer ce comportement notamment pour les radionucléides dont l'activité totale est élevée ( $^{14}\text{C}$ , 1000 TBq), qui sont réputés mobiles dans l'environnement ( $^{14}\text{C}$  sous forme organique,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{129}\text{I}$ ) ou dont l'impact radiologique est important ( $^{129}\text{I}$ , DPUI ingestion  $1,1 \cdot 10^{-7}$  Sv/Bq soit 100 fois plus que  $^{36}\text{Cl}$  et 1000 fois plus que  $^{14}\text{C}$  et  $^{99}\text{Tc}$ ).

Les derniers résultats (Andra, CEA, EDF) montrent que la lixiviation par l'eau du  $^{36}\text{Cl}$  des empilements graphite EDF peut aller jusqu'à 60 % selon leur origine (avec deux cinétiques, une rapide – fraction labile - l'autre lente), que la rétention du  $^{36}\text{Cl}$  par les matériaux cimentaires diminue avec la salinité du milieu en équilibre ( $K_d$  de 1 à 50) et qu'il migre sensiblement comme l'eau dans les argiles téglines ( $5 \cdot 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s). La fraction labile 10 à 90 % est libérée en quelques jours, l'autre est libérée au taux de 5 à 20 %/an. La variabilité dépend des échantillons. Le comportement chimique du chlore est raisonnablement connu dans l'environnement du graphite en condition de stockage.

La lixiviation de  $^{14}\text{C}$  du graphite reste faible (moins de 1 % avec des taux de relâchement de  $5 \cdot 10^{-6}$  à  $5 \cdot 10^{-3}$ /an). Elle est très sensible aux conditions expérimentales, pH des solutions aqueuses, état du graphite plus ou moins divisé et origine des échantillons. Environ 30 % du  $^{14}\text{C}$  est sous une forme organique non identifiée peu réactive avec les matériaux cimentaires et l'argile tégluline (faible rétention). Seul le comportement de  $^{14}\text{C}$  relâché sous forme d'ions carbonates (70 %) est bien connu, il est rapidement incorporé dans les environnements carbonatés (ciments et roches argileuses) par échange isotopique. EDF étudie l'influence des traitements thermiques sur la lixiviation de  $^{14}\text{C}$  (quantités et espèces relâchées dont les espèces organiques). Le  $^{14}\text{C}$  peut aussi être engagé dans des espèces gazeuses ( $\text{CO}_2$ ) mais qui seraient piégées par les matériaux cimentaires. Le comportement du  $^{14}\text{C}$  en situation de stockage FAVL est loin d'être cerné. De nombreuses études sur ce sujet sont en cours chez les producteurs de déchets et dans des programmes européens. Il en est de même pour les comportements de  $^{41}\text{Ca}$  (en principe échangeable avec le calcium des minéraux de la géosphère) ou du tritium (marquage de l'environnement).

Dans les déchets radifères  $^{226}\text{Ra}$  est inclus dans le sulfate de baryum insoluble (teneur atomique de  $10^{-7}$ ). Mais en présence d'eau le radium se partage entre solide et solution selon le pH. On peut retrouver 2 % du Ra en solution vers pH 12-13 (eau cimentaire). Dans cette zone de pH le Ra est fortement sorbé sur les matériaux cimentaires ( $K_d$  de 100 à 700). L'uranium y est présent sous forme d'hydroxydes mal identifiés et peu solubles dont la lixiviation par l'eau relâche des formes hydrolysées retenues dans les matériaux cimentaires. Le Ra est également fortement sorbé sur les argiles téglines quelles que soient les conditions. C'est aussi le cas de  $^{230}\text{Th}$  mais ce n'est pas celui de l'uranium dont la sorption est sensible aux conditions physico-chimiques locales.

Les mécanismes de la libération des radionucléides à partir des sels enrobés dans le bitume sont connus. Les radionucléides sont surtout relâchés en même temps que le nitrate de sodium très soluble. Toutes les espèces cationiques seront retenues sur les matériaux de dégradation du ciment et par les argiles. Le devenir des espèces anioniques, par exemple de technétium ( $\text{TcO}_4^-$ ) et d'iode ( $\text{I}^-$ ), réputées mobiles dans l'environnement, est plus difficile à prévoir, d'autant que la libération de nitrates et de sulfates peut modifier considérablement les conditions physico-chimiques locales.

La première conséquence est d'augmenter la force ionique des solutions aqueuses. La teneur en anions sulfates, et dans une moindre mesure en nitrates, joue sur la dégradation du ciment en modifiant la nature et la répartition des phases minérales du matériau de dégradation (passage de phases silicate à des phases sulfate). Par ailleurs des phases secondaires mixtes à base de sulfates et de nitrates peuvent précipiter. Les anions nitrates en présence d'acier ou de bactéries peuvent être réduits, ce qui modifie les conditions redox. Or, force ionique, phases en présence et pouvoir oxydant ou réducteur du milieu jouent sur la rétention des espèces. C'est le cas pour Ra et U(VI) dont la sorption diminue avec l'augmentation de la force ionique, et pour Tc et U qui sont très peu mobiles lorsqu'ils sont sous la forme Tc(IV) et U(IV). Seuls les actinides que l'on peut trouver dans les FAVL sont bien retenus dans l'argile en milieu réducteur.

La prévision du comportement de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{99}\text{Tc}$  et U en situation de stockage FAVL renvoie pour partie à l'étude de l'évolution/stabilisation du potentiel redox au sein des alvéoles.

A partir des calculs de migration des radionucléides dans les conditions exposées dans le corps de ce rapport l'Andra a évalué les impacts radiologiques associés aux scénarios conventionnels des analyses de sûreté pour les stockages géologiques. Aucune dose engagée associée aux divers retours des radionucléides à la biosphère n'est réellement réhibitoire (doses  $\ll 1$  mSv/an). En revanche les calcul d'exposition, d'inhalation et d'ingestion pour les scénarios d'intrusion humaine involontaire, qui ne font appel qu'aux radionucléides en place dans le stockage, montrent que les déchets bitumes et les déchets renfermant des émetteurs alpha (graphite des silos et colis technologiques de la Hague avec  $^{239}\text{Pu}$  et  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ), peuvent conduire à des situations posant problème au regard de la radioprotection (dose  $\gg 1$  mSv/an).

La Commission souhaite que les calculs de migration soient poursuivis par l'Andra et ajustés au fur et à mesure que les valeurs des paramètres de diffusion et de rétention des radionucléides et les paramètres caractérisant le site dans son ensemble, l'argile téguline intacte et remaniée, et les alvéoles, seront affinés. L'analyse de sûreté n'en sera que plus réaliste.



## ANNEXE VIII : TECHNICO-ÉCONOMIE DES TFA ET R&D ASSOCIEE

Les quantités de déchets TFA à stocker sont estimées par l'Andra. Elles dépendent encore de beaucoup d'hypothèses sur ce que pourraient être les déchets TFA ultimes résultant de leur tri selon le zonage des INB, de leur traitement, visant à réduire les volumes (densification, incinération, fusion), de leur utilisation dans le domaine nucléaire ou de leur valorisation strictement encadrée dans le domaine public.

Dans ce cadre beaucoup de discussions technico-économiques ont lieu au niveau du GT du PNGMDR sur les possibilités de valorisation des métaux et autres matériaux très peu radioactifs ou bien non radioactifs mais issus des zones non conventionnelles des INB. Il s'agit en effet pour les métaux d'un gisement considérable, 900 000 tonnes à terminaison du démantèlement (150 000 t de diffuseurs de GB 1, 100 000 GV, autres déchets comme des emballages de transports). Le parc actuel comprend 198 GV, 182 ont été remplacés ou vont l'être, au total il y en aura 370. Ils ne peuvent pas être stockés au Cires. Le GT valorisation a fait des recommandations notamment pour les grands lots homogènes (GB et GV) et les gravats de béton. Les producteurs de déchets examinent des projets concrets de fusion de grande ampleur (milliers de tonnes/an) sur la base du Rex des modestes installations de fusion déjà en service pour des matériaux métalliques radioactifs (Centraco en France, Studsvik à l'étranger,...).

Ainsi Areva et le CEA sont engagés avec Eurodif et Studsvik dans le projet "Profusion" (4 ans) qui vise à qualifier un procédé de fusion/décontamination pour les aciers (essais sur 150 t de métaux de GB1), afin de pouvoir recycler les aciers traités dans les filières conventionnelles "acier". Il y a beaucoup de contraintes. La qualification qui est recherchée est le niveau 8 de l'échelle TRL Une installation industrielle pourrait alors être implantée à Pierrelatte pour les aciers de GB1. Le projet est accompagné d'études économiques au regard du marché de l'acier.

Des essais ont déjà été réalisés à Studsvik sur ces aciers, seulement contaminés en surface par  $UO_2F_2$ . Ils montrent une décontamination en uranium de 99 %. Pour autant de nombreux paramètres sont à explorer : composition optimale du laitier pour décontamination, caractérisation des gaz, contrôle des conditions redox (pour éviter la réduction des oxydes d'uranium), gestion des déchets secondaires, ... . Le cas des aciers activés est plus compliqué car c'est le comportement de plusieurs éléments qui devra être étudié dans les processus de partage entre laitier, acier et gaz.

Les discussions autour de la libération des déchets de très faible activité sont closes pour l'instant et cela renvoie, d'une certaine façon, à la limitation de la production de ces déchets ou toute opération pour en réduire le volume afin de faciliter leur gestion.

La Commission a souligné dans son rapport n°9 qu'une libération de matériaux radioactifs ne pouvait aller sans des mesures de radioactivités très sensibles pour assurer un impact radiologique négligeable dans tous les cas d'utilisation. L'Allemagne pratique la libération de déchets, sans restriction, ou avec restriction, pour les déchets qui doivent subir un traitement avant de conduire à des matériaux d'usage courant (acier provenant du démantèlement de centrales nucléaires). Les seuils de radioactivité de libération pour assurer une dose de 10  $\mu$ S/an pour la population sont extrêmement contraignants : inférieurs au Bq/g pour libération sans restriction et inférieur ou égal à 10 Bq/g pour libération avec restriction. Ils sont doublés de limites sur la contamination surfacique et accompagnés de restrictions sur les quantités libérables par an (inférieures à 1000 tonnes). Au total les quantités libérées sont très faibles. Beaucoup de déchets libérés avec restriction le sont pour aller dans les décharges conventionnelles ou à l'incinération ce qui ne va pas sans problème d'acceptation. La libération en Allemagne n'est pas un franc succès bien que le prix de la libération soit compétitif avec celui du stockage.





## ANNEXE IX : RECOMMANDATIONS DU GT DU PNGMDR

R1-Le groupe de travail recommande que l'étude de filières de valorisation soit, en priorité, menée sur de grands lots homogènes dont les caractéristiques sont connues et vérifiables ce qui permet d'envisager le développement d'un procédé à un niveau industriel, de fiabiliser les contrôles aux différentes étapes du procédé et d'apporter des garanties sur la qualité des produits finis.

R2-Le groupe de travail recommande que la performance des procédés de traitement soit justifiée sur la base de plusieurs lignes de défense indépendantes et successives, incluant notamment la connaissance des matériaux et des procédés de traitement, ainsi que la définition d'un programme de contrôles et de mesures.

R3-Le groupe de travail considère à ce stade que la fusion constitue une étape incontournable en vue de la valorisation des matériaux métalliques car elle permet d'en fiabiliser la caractérisation et d'obtenir des lots homogènes. Par ailleurs, elle permet, dans certains cas et par décontamination, l'obtention de caractéristiques favorables à la valorisation de matériaux métalliques.

R4-Le groupe de travail rappelle que les caractéristiques radiologiques favorables ne doivent pas être obtenues par dilution.

R5-Le groupe de travail recommande que les filières de traitement soient, autant que possible, constituées par des installations ne traitant que des flux provenant d'installations nucléaires. Dans le cas où une étape de traitement doit être réalisée dans une installation traitant également des flux de matières conventionnelles, le groupe de travail recommande que :

- des dispositions spécifiques soient définies concernant notamment la traçabilité des matériaux, les déchets induits, les rebuts, les rejets, etc.,
- des critères radiologiques soient définis et contrôlés afin de limiter les contraintes associées à la gestion de matériaux provenant d'installations nucléaires,
- l'impact potentiel du traitement de matériaux provenant d'installations nucléaires sur l'activité du partenaire industriel soit évalué et contrôlé,
- les salariés disposent d'une culture suffisante en matière de santé et de sécurité au travail.

R6-Le groupe de travail recommande que les modalités de traçabilité des matériaux, déchets, rebuts, chutes, sous-produits... soient déterminées pour chaque étape de la filière de valorisation. Les conditions permettant de dispenser les substances de traçabilité devront, le cas échéant, être précisées.

R7-Le groupe de travail considère que la réutilisation en dehors de zones où les déchets produits sont susceptibles d'être contaminés ou activés ne devrait être envisagée que pour des matériaux pour lesquels l'usage ne serait pas susceptible de porter atteinte à la santé et à la protection de l'environnement en tenant compte des scénarios les plus contraignants, même en cas de perte de traçabilité.

R8-Le groupe de travail recommande que pour chacun des débouchés qui seraient identifiés, les quantités des substances susceptibles d'être valorisées ainsi que le modèle économique soient évalués afin de vérifier la pertinence de la filière projetée.

R9-Le groupe de travail recommande que les critères préférentiels de choix des débouchés incluent la garantie de traçabilité des produits sur le long terme.

R10-Le groupe de travail recommande que l'opportunité de la mise en place d'une filière de recyclage soit éclairée par une analyse du cycle de vie contribuant à dresser un bilan comparatif technique, économique, financier, sociétal, sanitaire, environnemental et énergétique des

différentes solutions envisageables. Le groupe de travail considère que la valorisation de matériaux TFA ne peut être envisagée que si cette analyse est favorable et en démontre l'avantage global.

R11-Le groupe de travail recommande la plus grande transparence dans le cadre de l'étude puis de la mise en œuvre de filières de traitement et de valorisation :

- au sein des entreprises (y compris sous-traitantes) : information et participation des salariés, des instances représentatives du personnel, des syndicats, de la médecine du travail, ...,
- sur le plan local, notamment sur le lieu de traitement, de transformation (et celui de réutilisation si possible) et le cas échéant, celui de provenance des matériaux : informations au sein d'instances telles que les commissions locales d'information, commissions d'information, commissions de suivi de site, ...
- au niveau national (groupe de travail du PNGMDR, ANCCLI, HCTISN).

R12-Dans le cas de débouchés en dehors de l'industrie nucléaire, le groupe de travail recommande que des modalités d'information adaptées soient mises en place.

R13-Le groupe de travail considère que les dispositions fixées à l'article R.1333-4 du code de la santé publique pourraient être mises en œuvre pour permettre l'utilisation de matériaux susceptibles d'être contaminés par des substances radioactives dans des biens de construction et de consommation mais que la procédure devrait être adaptée.

R14-Le groupe de travail considère que le dossier remis en application de l'arrêté du 5 mai 2009 devrait s'appuyer sur les éléments suivants :

- présenter une étude d'impact sanitaire et environnementale ;
- présenter les quantités de matériaux concernées ;
- être fondé sur un bilan global incluant une analyse de cycle de vie ;
- spécifier les conditions de traçabilité et de radioprotection et, le cas échéant, le moment où celles-ci ne sont plus indispensables ;
- faire l'objet d'une information et d'une participation du public.

## ANNEXE X :

### AVANCÉES DU PROGRAMME ASTRID

Le programme de R&D du projet Astrid comporte plusieurs volets s'étalant dans le temps : conception du réacteur comme démonstrateur d'un RNR-Na industriel et de la transmutation de Am, mise en place de l'atelier de fabrication du combustible d'Astrid, mise en place des ateliers de traitement des combustibles déchargés du réacteur. Ces derniers seront nécessaires pour la démonstration industrielle du multirecyclage du plutonium et de la transmutation des actinides mineurs.

Seul l'atelier de fabrication du combustible est nécessaire au démarrage d'Astrid, les autres doivent être mis en service au fur et à mesure des besoins pendant les décennies suivant le démarrage d'Astrid.

La conception d'Astrid doit tenir compte des impératifs de sûreté. Un guide majeur est le Rex de la construction, de l'exploitation et de la déconstruction des RNR-Na. Elle porte donc sur des dispositions innovantes d'une part pour maîtriser la réactivité neutronique, le refroidissement en toutes circonstances et permettre l'inspection/réparation en service.

La conception des installations du cycle du combustible d'Astrid s'appuie :

- pour l'atelier de fabrication des assemblages de combustible MOx RNR neufs, sur le Rex de la fabrication des assemblages de combustible MOx neufs dans l'ATPu (pour RNR) et Melox (pour REP)
- pour l'atelier de traitement du combustible utilisé MOx RNR, sur le Rex du retraitement des assemblages de combustible utilisé UOx et MOx à la Hague. Elle bénéficiera des améliorations en cours (TCP-La Hague, extension Melox). Elle porte sur des dispositions nécessaires pour tenir compte des isotopies du Pu et de la proportion élevée du Pu dans le MOx RNR irradié.

83

La conception des installations pour la démonstration de la transmutation d'Am, est vue comme des extensions de l'atelier de fabrication du combustible et de l'atelier de traitement du combustible. L'installation Atalante est suffisante pour les premiers essais à l'échelle de l'aiguille.

#### *Planning et gouvernance*

Le programme Astrid se poursuit mais les échéances du planning et la gouvernance ont évolué au cours de l'année 2015.

Dans le rapport de juin 2015 (remis aux Autorités au titre de la demande du décret PNGMDR du 27 décembre 2013) le CEA envisageait qu'au terme de l'APD (Avant Projet Détaillé), qui devait durer du début de 2016 à la fin 2019, une décision de construire le réacteur serait prise et que sa construction pourrait commencer fin 2020/début 2021. Pour des raisons de moyens de programmation incertains et de développement des installations d'expérimentation nécessaires pour qualifier certains composants du réacteur, la date de construction d'Astrid a été décalée de 2 ans. Cette décision a été prise par les tutelles du CEA.

Ainsi en octobre 2015 les échéances du planning prévisionnel étaient :

- Fin 2015 : dossier de synthèse de l'APS (Avant Projet sommaire découpé en 2 phases, AVP1 et AVP2) donnant le cahier des charges, une estimation des coûts et le déroulement du projet, envoi du DOS à l'ASN, décision des tutelles pour passer en phase APD du réacteur de 2016 à 2019 (qui est aussi nommée phase de "Basic Design").
- Fin 2019 : mise en place officielle d'un Consortium réunissant les partenaires du projet Astrid (CEA, EDF, Areva, autres partenaires industriels français et étrangers, ...). Le

- Consortium devait porter le projet et déposer la DAC en 2020 comprenant le Rapport Préliminaire de Sûreté (RPS), décision pour passer à la phase de "Detailed Design".
- Fin 2022 : autorisation de construire donnée par l'ASN, laquelle aura instruit le dossier de la DAC pendant deux à trois ans (2020 à fin 2022).

La construction d'Astrid devrait durer 7 ans et sa divergence avoir lieu en 2029.

Ce planning était ponctué de revues avec les tutelles, fin 2017, fin 2019, fin 2022 rendez-vous essentiels pour franchir les étapes du projet. Les tutelles devaient contrôler et assurer le déroulement du projet, notamment fin 2019 pour passer en phase "Detailed Design".

Le calendrier de réalisation de l'atelier de fabrication du combustible, qui doit être prêt à fonctionner trois ans avant la divergence d'Astrid (2029), c'est-à-dire en 2026 dans ce calendrier, était calé sur celui du réacteur. L'atelier de fabrication du combustible était constitué d'une extension de Melox.

Les objectifs d'Astrid (démonstrateur de RNR-Na au plan de la sûreté et de l'exploitation, démonstrateur du multirecyclage du Pu, démonstrateur de la transmutation de Am et de la consommation accrue de Pu, référence pour l'évaluation des coûts d'investissement, ...) et les options technologiques innovantes du réacteur n'étaient pas modifiées. En particulier le choix d'un SCE à gaz était confirmé par le CEA et la R&D sur ce sujet devenait prioritaire pour les années à venir.

A la fin 2015 le CEA a finalisé le dossier d'APS dans la version d'un SCE vapeur d'eau (voir ci-dessous) et la décision de passer en APD a été prise par les tutelles. Le CEA a décidé de porter, pour fin 2017, la connaissance sur le SCE à gaz au même niveau que celle du SCE à vapeur d'eau en fin d'APS. Cette importante décision résulte d'une revue de projet de la DEN sur le SCE gaz à laquelle ont participé EDF, Areva, Alstom et d'autres industriels. C'est donc une décision commune des acteurs du nucléaire.

84

Le planning et la gouvernance du projet ont aussi été sensiblement modifiés fin 2015 comme la remise du DOS à l'ASN au printemps 2016. Le programme Astrid a été détendu par rapport au programme volontariste d'octobre 2015 en le focalisant nettement sur les aspects techniques à développer pendant l'APD. Un rendez vous avec les tutelles fin 2017, particulièrement important, doit préparer les étapes post 2019. Pour autant la phase de "Detailed Design" (2020 – 2022) et le franchissement des étapes réglementaires visant la construction du réacteur et de l'atelier de fabrication du combustible sont incontournables. Les autres dispositions du calendrier précédent restaient à confirmer fin 2015.

L'organisation générale du projet reste en place : pilotage stratégique par le CEA à travers la Maîtrise d'ouvrage et la Cellule Projet Astrid (CPA) qui fonctionne depuis 2010, R&D assurée par le CEA en collaborations et partenariats, assistance et conception assurée par le CEA et 14 industriels (à ce jour). La CPA est renforcée. La période de R&D est allongée de deux ans ce qui permettra d'étayer les choix définitifs pour Astrid sur des bases techniques renforcées.

Le projet Astrid reçoit certes le support d'Areva et d'EDF, mais l'adhésion n'est pas unanime sur la vitesse de sa mise en œuvre. Ainsi EDF pense qu'Astrid et son cycle doivent s'inscrire dans la perspective incertaine du déploiement progressif des RNR-Na en France. L'objectif à atteindre pour la transition vers le palier B est certes la démonstration de la sûreté des RNR-Na dans tout leur spectre de fonctionnement mais il faudra que les performances des RNR et du cycle associé soient cohérentes avec les besoins du renouvellement du parc, et des usines du cycle, et avec les conditions économiques du marché.

### *Bilan de la R&D conduite durant l'APS*

La R&D sur le réacteur conduite par la CPA lors de l'APS a été constamment orientée par des revues de choix d'option. Elles ont eu à traiter de la conception et qualification des composants, des conditions de fonctionnement du réacteur, des matériaux, des outils de calcul scientifique (OCS) et des risques/performances. Le dossier de synthèse de fin d'APS donne une description

complète d'une version préliminaire du réacteur avec l'option classique SCE vapeur d'eau. Le dossier APS regroupe tous les documents édités pendant la période d'APS (environ 2300). Le dossier de synthèse de fin d'APS aborde l'organisation du projet Astrid et l'estimation des coûts, la description des composants, l'architecture industrielle, la sûreté et ses aspects réglementaires, les justifications des options et l'état de la R&D sur le SCE gaz (voir ci-dessous).

La Commission a évalué dans ses rapports précédents quelques uns de ces éléments (matériaux, composants, ...). Le dossier APS détaille la structure et la fonction de tous les composants et les replace de façon cohérente dans une vue d'ensemble de ce que sera Astrid. La chaîne de manutention des assemblages est particulièrement délicate et son design est encore en cours alors que pour les autres composants les designs sont arrêtés. Ce dossier de fin d'APS est le support pour aller plus loin dans la conception du réacteur lors de l'APD.

La sûreté passive d'Astrid à la conception est un point central, elle passe d'abord par la prévention des accidents graves (fusion du cœur) puis par la gestion du corium si un accident majeur se produisait. Outre le fait que le cœur est intrinsèquement sûr (coefficient de vidange proche de zéro) l'objectif de non fusion du cœur est *in fine* assuré par deux systèmes d'arrêt du réacteur à déclenchement passif, soit en cas de perte de débit de sodium, soit en cas d'élévation de température du sodium au-delà de 600 °C (le sodium boue à 900 °C). Il s'agit dans chaque cas de 3 dispositifs pour arrêter net la puissance du réacteur : barres d'arrêt à sustentation hydraulique et barres d'arrêt à sustentation électromagnétique par point de Curie. La mitigation d'une éventuelle fusion est assurée par un écoulement guidé du corium et sa récupération puis son refroidissement. Elle vient en ultime complément de toutes les dispositions de sûreté, actives et passives. Les deux systèmes de prévention et de mitigation font l'objet d'importants programmes de simulations/expérimentations conduits par le CEA et le Japon dans le cadre des accords CEA-Japon.

La R&D de l'APS qui a conduit à la définition d'Astrid s'appuie sur le Rex des réalisations passées, de nouveaux développements technologiques et expérimentations mais surtout sur de nouveaux OCS en support aux simulations. Par exemple la neutronique et le comportement des éléments du cœur hétérogène d'Astrid ne pouvaient pas être couverts par les codes en vigueur ayant fait leur preuve sur les précédents RNR-Na. Par ailleurs les OCS sont indispensables pour simuler le comportement du réacteur en situations incidentelles ou accidentelles sur lesquelles s'appuie la démonstration de sûreté, objet du RPS (fin 2019). Le CEA (et ses partenaires notamment le Japon) a amélioré et développé plus d'une dizaine de codes pour simuler les performances du cœur d'Astrid. Les OCS doivent être vérifiés, validés pour simuler le comportement de composants et *in fine* qualifiés au sens réglementaire du terme pour la démonstration de sûreté. La validation/qualification repose sur des confrontations à des situations connues et documentées ou aux résultats de nouvelles expériences, dont certaines ne sont possibles, aujourd'hui, qu'à l'étranger (Japon, Russie, Kazakhstan). Les OCS sont opérationnels pour consolider la conception d'Astrid durant l'APD ou le seront en temps utile pour préparer le RPS.

La R&D sur les installations pour le cycle du combustible d'Astrid a surtout concerné la fabrication du premier cœur et ses recharges pour les premières dizaines d'années de fonctionnement du réacteur. Le cœur hétérogène CFV 4 est constitué d'aiguilles remplies de pastilles de  $\text{UPuO}_2$  et de  $\text{UO}_2$  mais différemment selon leur place dans le cœur interne ou externe (uniquement constitué de pastilles de  $\text{UPuO}_2$ ). En régime de croisière Astrid consommera 5 t d' $\text{UPuO}_2$ /an et 3 t d' $\text{UO}_2$ /an (Uapp). Environ 8 t de combustible usé (MOx RNR) à un taux de combustion moyen de 90 GWj/t seront mises en réserve chaque année. Mais avant d'arriver à cet équilibre il faudra 15-20 ans de fonctionnement avec un cœur de démarrage et des recharges.

Le Pu du combustible neuf du premier cœur, environ 5 t (pour 25 t de MOx  $\text{UPuO}_2$ ) proviendra du combustible usé UOx en réserve à la Hague. Il sera progressivement changé par quart avec des recharges appelant environ 1 à 1,6 t de Pu/an de UOx puis 1 t Pu/an de MOx REP également en réserve à la Hague, le pourcentage de Pu dans le combustible MOx neuf du réacteur étant ajusté selon son isotopie. Il faudra 22 recharges sur 20 ans. L'uranium appauvri 15 t  $\text{UO}_2$  pour le cœur puis quelques tonnes par an pour les recharges (5 à 3 t  $\text{UO}_2$ /an) est aussi en réserve. La montée progressive en puissance du cœur fait que le taux de combustion du combustible usé MOx RNR

retiré du premier cœur sera autour de 45 GWj/t. Le MOx RNR irradié, quelque soit son taux de combustion, sera mis en réserve pour être recyclé plus tard dans Astrid.

L'atelier de fabrication du combustible doit assurer ces productions de combustible (premier cœur prêt en 2026) en tenant compte de l'isotopie du Pu ( $^{238}\text{Pu}$ , émissions de neutrons) et l'usine de la Hague doit assurer le retraitement du combustible usé UOx REP et MOx REP nécessaire pour fournir le Pu, ce qui ne pose pas de problème. Ce n'est que pour plus tard, quand Astrid recyclera son propre Pu que l'aménagement de la Hague se posera pour traiter les MOx RNR. Le CEA et Areva examinent l'implantation de l'atelier de fabrication du combustible à Marcoule.

Le procédé de fabrication de pastilles denses de  $\text{UPuO}_2$  (25 % de Pu, 0,97 % de la densité théorique, oxyde mixte quasi stœchiométrique) est au point. Plus de 300 pastilles ont été réalisées à Melox, l'objectif étant d'en faire des milliers entre octobre 2018 et août 2019 avec un procédé fabrication/contrôle optimisé (20 kg d'oxyde, 5 kg de Pu). En effet 61 aiguilles expérimentales de MOx renfermant 4000 pastilles sont nécessaires pour qualifier le combustible d'Astrid par irradiation dans BN 600 en Russie. L'examen des aiguilles irradiées doit avoir lieu à Cadarache.

Des avancées significatives ont eu lieu dans la fabrication des aiguilles de combustible (acier inox AM11, 2,2 m), des assemblages hexagonaux (acier EM10, 4, 5m) et du carbure de bore ( $\text{B}_4\text{C}$ ) pour les nombreuses protections neutroniques, qui en nécessitent plus de 50 tonnes. Les assemblages d'Astrid sont des objets compliqués renfermant, outre le faisceau d'aiguilles, un faisceau amovible d'aiguilles remplie de pastille de  $\text{B}_4\text{C}$  (B naturel et enrichi en  $^{10}\text{B}$ , 0,94 m), un pied (0,75 m) et une partie vide (0,4 m) remplie de sodium (formation du plenum Na).

### *R&D à conduire durant l'APD (Basic Design) et au-delà*

Les deux prochaines années seront consacrées à l'étude approfondie du SCE gaz, à la consolidation des choix de l'APS et à l'optimisation d'ensemble. Pour le SCE gaz il s'agit de porter le dossier au même niveau de connaissance que celui du SCE vapeur d'eau dans le design actuel. C'est un objectif ambitieux. Certains choix de l'APS méritent d'être réexaminés, notamment dans les deux options de conversion de l'énergie. Les hypothèses sur les aspects amont et aval du cycle du combustible seront également consolidées. Fin 2017 le CEA annonce pouvoir disposer de plusieurs dossiers importants : conception revisitée, coût, opérabilité, planning. Fin 2019 le dossier APD devrait permettre de statuer sur la poursuite du projet Astrid.

La R&D à conduire sur le SCE gaz sera importante lors de l'APD. Elle nécessite d'abord de concevoir et qualifier un échangeur Na- $\text{N}_2$  de puissance (190 MWth), élément clé pour passer du circuit secondaire Na-Na du réacteur au circuit tertiaire Na- $\text{N}_2$  fonctionnant sur un cycle thermodynamique de Brayton. L'autre composant majeur du circuit tertiaire est la turbomachine. Il s'agit d'adapter un modèle aux exigences d'Astrid ( $\text{N}_2$ , puissance thermique). Astrid serait équipé de 4 échangeurs (2 par boucles secondaires) et de 2 turbomachines. Enfin la R&D doit mettre au point d'autres composants mineurs mais néanmoins essentiels du SCE gaz (joints étanches, réchauffeurs, refroidisseurs, compresseurs, pièges froids pour purifier  $\text{N}_2$  ...) et étudier l'implantation de tous les composants dans le génie civil. En parallèle la démonstration de la sûreté d'Astrid couplé au SCE gaz doit être démontrée, ce qui implique d'utiliser de nouveaux codes. Il n'y a pas de Rex sur le couplage d'un RNR avec un SCE gaz. La R&D sera coordonnée par le CEA et conduite par le CEA, Areva et Alstom (et leurs partenaires).

Au cours de l'APS les caractéristiques du cycle de Brayton ont été définies ( $\text{N}_2$  à 180 bars, rendement théorique 37/38 %, plages de températures de Na -345/530 °C- et de  $\text{N}_2$  -310/515 °C, débits des fluides) ainsi que le design général du SCE gaz, après une optimisation multicritères du système tenant compte des matériels industriels du marché. Le choix des matériaux métalliques a aussi été arrêté. Une première analyse de sûreté a été faite.

La R&D sous responsabilité du CEA concerne l'échangeur. L'échange de chaleur est assuré au niveau élémentaire par un contacteur à plaque d'épaisseur 1 mm (acier 316L(N) utilisé pour Astrid) qui met en contact thermique le circuit Na (6 bars) et le circuit  $\text{N}_2$  (180 bars) chacun étant constitué de tubes de sections carrées appropriées. Les plaques sont soudées entre elles sous pression à 1000 °C pour former un module d'échange (23 MWth) qui apparaît comme un bloc

d'acier percé de tubes. Le procédé de soudage diffusion sous pression a été développé par le CEA. Les modules (8 au total couplés par paire) sont montés en parallèle dans une enceinte (10,5 m, diamètre autour de 5 m) sous pression pour constituer l'échangeur. La distribution des fluides circulant à contre sens (9000 tubes pour Na et 18 000 pour N<sub>2</sub>) est à bifurcations successives pour alimenter chaque tube. La technologie de soudage a été mise au point par le CEA. Elle influe sur la qualité de l'acier laquelle joue sur les échanges de chaleur. Il faut éviter la formation de gros grains. La microstructure de l'acier est caractérisée par métallographie. L'injection et la récupération des fluides sont assurées par des distributeurs spécifiques. Les échangeurs sont d'une rare complexité et le premier défi est de construire et de qualifier une paire de modules.

Le CEA a construit plusieurs modules expérimentaux (en acier DB-316 proche de l'acier 316L(N)) en faisant varier les conditions d'assemblages des plaques. Actuellement le CEA teste leur comportement dans Diademo au niveau de 40 KWth avec une pression de N<sub>2</sub> de 80 bars (thermo-hydraulique, fatigue, corrosion, ...).

Le CEA a établi un planning de qualification progressive des matériaux et des éléments de l'échangeur (plaques, module, maquette, ...) dans Diademo jusqu'à fin 2019. La qualification de l'échangeur échelle 1/20 ne pourra se faire que lorsque Cheops sera opérationnel.

La qualification de la turbomachine sera faite par Alstom.

Les études de sûreté nécessitent de modéliser l'influence de tout événement sur le contrôle de la réactivité, le refroidissement du combustible et le confinement. Pour cela le CEA doit développer le code de calcul Cathare2.

Le SCE gaz est une innovation majeure. La R&D qui reste à conduire est considérable. Si Astrid en est équipé (et au-delà les RNR-Na GenIV) ce sera un réacteur doublement innovant.

## *Collaborations*

87

Le CEA poursuit et intensifie au-delà d'une R&D amont ses collaborations industrielles nationales et internationales. Ces collaborations sont indispensables pour la validation et la qualification des composants innovants du réacteur, les procédés liés au cycle du combustible du réacteur et les aspects de sûreté. Le développement des composants demande en particulier des moyens expérimentaux lourds et de nouveaux OCS et la mise au point du combustible MOx demande des RNR pour les irradiations, dont la France ne dispose pas.

Au plan international le projet de réacteur Astrid et les développements qu'il suscite, comme le SCE à gaz ou la consommation accrue de Pu, intéressent plusieurs pays (USA, Russie, Japon, Inde, Royaume-Uni, Chine) et le Forum génération IV. C'est avec le Japon et la Russie puis avec l'Inde qu'il existe des projets concrets (composants du réacteur et codes avec le Japon, irradiation avec la Russie, sûreté avec l'Inde). Pour l'instant seul le Japon pourrait s'investir dans le Design du réacteur et dans sa construction.

L'Europe contribue indirectement au réacteur Astrid par ses programmes Euratom en soutien aux RNR et plusieurs pays : Suisse, Italie, Allemagne et Suède sont dans le réseau d'organismes ARDECO mis en place pour conduire une R&D spécifique dans le cadre d'accords bilatéraux sous protection de propriété intellectuelle.

## *Séparation et Transmutation*

Les études technico-économiques des scénarios confirment que l'introduction d'un parc de RNR-Na réduirait progressivement la production des déchets HA (verres nucléaires) et des assemblages de CU en entreposage, ceux-ci disparaissant avec un parc RNR 100 % Moxé. Pour autant l'emprise du stockage des verres entre le palier A et les paliers B et D serait sensiblement la même puisque la quantité de PF et AM ne dépend en gros que de la puissance du parc. Seule la transmutation des AM ferait chuter l'emprise de 150/170 à 20 m<sup>2</sup>/TWhe.

Quel que soit l'intérêt de la ST dans la stratégie de gestion des AM et la difficulté prévisible de sa mise en œuvre dans un parc RNR-Na il convient de poursuivre les expériences de séparation et d'irradiation. L'expérience intégrale EXAm conduite à Marcoule (voir rapport n°9) se poursuit. Les 30 L de raffinat de Coex ont été décontaminés en U et Fe et concentrés à 5 L pour satisfaire aux conditions requises par le procédé EXAm.

Le stade auquel est arrivée la R&D dans la séparation des actinides mineurs (à la suite de celles de Pu et U des solutions de dissolution du combustible usé) par hydrométallurgie résulte d'études qui ont commencé il y a plus de 20 ans. Elles ont été conduites par le CEA seul ou en collaboration dans 7 programmes successifs Euratom de 1994 à 2015. Le dernier en date est Sacsses (7ème PCRD) qui réunit 26 partenaires et qui a pour objectif une optimisation de Sanex, Ganex et EXAm. Pour autant la R&D dans ce domaine est au stade de la démonstration expérimentale des procédés (échelle TRL 5 - 6). Pour aller vers une industrialisation potentielle il faut atteindre le niveau TRL 8 - 9 qui implique que la sûreté des procédés ait été analysée. Sacsses y est en grande partie dévolu. Un essai EXAm sur un raffinat Purex doit être fait à l'ITU en 2016 pour tester l'efficacité d'un nouveau complexant permettant de mieux séparer Am de Cm et des lanthanides (procédé dit Euro-EXAm). Dans cet essai ce sont surtout le Royaume-Uni (NNL), la France (CEA) et l'Allemagne (KIT, Juelich, ITU) qui sont impliqués.

La séparation U, Pu et des actinides mineurs par des procédés pyrochimiques est beaucoup moins avancée. Trois des 7 programmes Euratom y ont été consacrés. Dans Sacsses la collaboration en pyrochimie a été étendue aux USA et à la Russie. Les deux axes de traitement du combustible usé, électro-raffinage sur aluminium en milieux chlorures fondus pour les combustibles métalliques et extraction liquide-liquide par un métal liquide réducteur à partir de milieux fluorures fondus pour le combustible oxyde sont étudiés. L'objectif est l'optimisation des procédés mais surtout un maintien des compétences en pyrochimie en Europe.

En parallèle à la R&D conduite dans Sacsses, le CEA a des collaboration directe en ST avec les USA, (DOE) : sélectivité d'extractants, préparation et irradiation d'échantillons de combustibles pour la transmutation (expériences Futurix et CCAm dans ATR), le Japon (JAEA) : faisabilité de préparation et d'irradiation d'aiguilles, voire d'un assemblage, de combustible pour Astrid, le JCR-ITU : fabrication d'échantillons pour transmutation en mode homogène et hétérogène et examens post-irradiation et quelques autres pays (Pologne, Royaume-Uni, Israël) : essentiellement des études fondamentales sur la complexation de l'Am.

Pour ce qui concerne les préparations/irradiations d'échantillons d'oxydes (U,Pu,Am)O<sub>2</sub> (mode homogène, teneur en Am < 3 %) ou (U,Am)O<sub>2</sub> (mode hétérogène, teneur en Am 15 à 20 %) le CEA a activement collaboré avec les 9 autres organismes et les 2 industriels (EDF et Areva) du programme Euratom Pelgrimm (2012-2017). Pelgrimm a pour but de comparer les performances sous flux de neutrons de pastilles et de microsphères d'oxydes (combustible spherepac) dans diverses conditions de température, de densité et de taux de fission (tenue mécanique, production d'hélium, interaction avec la gaine, ...). Un combustible spherepac aurait des avantages. Pelgrimm fait suite à 3 autres programmes sur ces oxydes mixtes (F-Bridge, CS-ESFR et Fairfuels). La Commission a donné un état de la R&D et des résultats obtenus dans ces programmes (voir rapports n°8 et 9). Plusieurs méthodes de préparation et de caractérisation (stœchiométries) des oxydes sous forme de pastilles ou de microsphères ont été mises au point dans Pelgrimm intégrant toute la R&D précédente. Il s'agit de méthodes sol-gel-métallurgie des poudres ou d'imprégnation-calcination de résines échangeuses d'ions (procédé WAR). U<sub>0,87</sub>Am<sub>0,13</sub>O<sub>2-x</sub> a été synthétisé à ITU (sol-gel, pastilles et microsphères de 60 et 80 microns) et U<sub>0,9</sub>Am<sub>0,1</sub>O<sub>2±x</sub> au CEA (procédé WAR, microsphères de 300 microns) pour les irradiations à venir des expériences semi-intégrales Marine 1 et 2 et celle de Sphère, dans le HFR. Sphère utilise aussi des oxydes U<sub>0,75</sub>Pu<sub>0,22</sub> Am<sub>0,03</sub>O<sub>2-x</sub> préparés dans le programme Fairfuels, de même que l'expérience Marios (U<sub>0,85</sub>Am<sub>0,15</sub>O<sub>2-x</sub>). Quelques examens post-irradiation non destructifs (spectrométrie gamma, aspect visuel) ont été effectués in situ : disques de Marios, mini aiguilles de pastilles et microsphères. Ils doivent se poursuivre et être complétés par des mesures des gaz produits dans les échantillons irradiés (examens destructifs) dans les installations du CEA. Les résultats obtenus jusqu'à maintenant sont préliminaires.



## Conclusion

Dans la R&D en cours et à venir liée au programme Astrid il faut distinguer :

- la R&D qui doit encore être conduite d'ici fin 2019 (APD ou Basic Design) afin que les résultats obtenus à cette date (présentés dans le RPrS) permettent d'appuyer la décision de passer en phase de Detailed design (2020 -2022) puis de lancer la construction d'Astrid (en 2022) selon le Design permettant de tenir compte des expériences que le réacteur devra permettre tout au long de sa vie ;
- la R&D qui doit être poursuivie en vue de tester dans Astrid (après 2029), les innovations visant à équiper les futurs RNR-Na pour augmenter la sûreté et faciliter leur exploitation. Il s'agit par exemple de nouveaux aciers pour les gaines (acier ODS pour atteindre 150 dpa), de dispositifs complémentaires de prévention des accidents graves (à étudier et à qualifier dans Cheops après 2019), de systèmes complémentaires d'évacuation de puissance résiduelle (échangeur de chaleur à huile au plus près de la cuve de sécurité en plus des EPuR), dispositifs de mitigation des accidents graves (limiter les conséquences d'une fusion de cœur) ;
- la R&D qui doit être poursuivie en vue de tester, y compris dans Astrid (après 2029), les innovations technologiques et de procédés visant à équiper les ateliers/usines pour le multi-recyclage de U et Pu et la transmutation de Am. En effet il est prévisible dès maintenant que le retraitement du combustible usé des RNR posera de sérieux problèmes dus essentiellement à l'augmentation de la teneur en Pu (de 1 à 20 %) et en  $^{238}\text{Pu}$  et  $^{241}\text{Am}$ , en produits de fission et à sa radioactivité élevée. S'il faut remplacer le procédé Purex les défis sont considérables.

D'une façon générale la R&D nécessite :

- d'augmenter les capacités des outils de calcul scientifique et de développer les codes de modélisation à toute échelle ;
- de développer des plateformes d'essais pour validation et qualification de composants.

Une évaluation préliminaire des coûts se fait en parallèle de l'avancement du projet.



## ANNEXE XI : RECHERCHE FONDAMENTALE

La recherche fondamentale en rapport avec la loi de 2006 est multidisciplinaire et multipartite. D'une façon générale elle est en appui de la R&D des programmes Astrid ou Cigéo ou est prospective vers de nouveaux concepts et/ou procédés pour ces programmes. Elle concerne également deux systèmes nucléaires : les ADS et les RNR à sel fondu. La production scientifique dans la littérature ouverte est importante. Le croisement des collaborations ne permet souvent d'identifier que l'organisme qui coordonne les recherches, que l'on retient dans ce qui suit comme étant le CNRS ou le CEA.

### *Recherche pilotée par le CNRS*

La Commission a été informée dans le détail de recherches conduites dans deux Programmes Fédérateurs : Needs-Matériaux et Needs-Déchets.

Les projets de Needs-Matériaux concernent le développement et la caractérisation de matériaux pour les RNR GenIV et les ADS (oxydes et céramiques pour les cœurs, carbure de bore B<sub>4</sub>C, gaines métalliques). Il s'agit par exemple d'études méthodologiques de la morphologie des oxydes obtenus par frittage vers 1100 °C en fonction de celles des précurseurs ou des dommages dus à l'irradiation d'alliage Fe-Cr (de 10 à 15 %) par des ions, des électrons et des neutrons ou de leur fragilisation par le sodium. Le projet sur B<sub>4</sub>C mobilise des chercheurs de 12 partenaires dont le CEA. Astrid et les RNR-Na à cœur hétérogène utilisent 10 fois plus de carbure de bore que Super-Phénix. L'absorption des neutrons par le bore produit du lithium (10 % et plus) et des défauts. Le programme comprend la caractérisation complète du carbure (frittage, structure par RX, RMN et modélisation avant et après irradiations, propriétés thermo-mécaniques, interaction B<sub>4</sub>C-gaine, B<sub>4</sub>C-Na et diagramme de phase B/C/Fe/Ni/Cr), caractérisation qui n'avait été que partielle jusqu'à aujourd'hui. Le programme du projet vise à comprendre pourquoi B<sub>4</sub>C a une très bonne stabilité structurale en RNR.

91

Le projet Noumeha de Needs-Déchets (6 partenaires réunissant tous les acteurs du nucléaire et l'IRSN, consortium de 9 laboratoires et 3 PME) vise à identifier et utiliser des matériaux non ferreux pour les colis de stockage des colis CSD-V et le chemisage des alvéoles HA. Cela limiterait notablement la production d'hydrogène dans le stockage. Un prototype de colis en céramique échelle ½ existe (silicate d'alumine de 4 cm d'épaisseur). Depuis 2014 Needs finance dans ce programme le projet Scellmo pour valider un procédé de scellement des deux parties du colis de stockage avec du verre chauffé par micro-ondes. Une composition de verre a été élaborée, le scellement de pièces céramique vers 700 °C réalisé et il faut maintenant changer l'échelle du procédé. Le tube de chemisage à l'étude est un composite en fibre de verre-céramique qui pourrait être mis en forme par fabrication additive. Il est clair qu'il s'agit ici d'une recherche amont prospective originale en rupture avec la solution de référence de stockage des colis CSD-V. L'organigramme de Noumeha comporte 5 WP pour couvrir toutes les études du scellement (température, fréquence micro-onde, caractérisation de la soudure, propriétés mécaniques, chemisage).

Les 4 projets SHS de Needs sont regroupés dans le programme fédérateur "Risques et sociétés" et portés par une vingtaine de chercheurs. Ils visent à la compréhension sociale du fait nucléaire dans sa diversité en se fondant sur des enquêtes sur le terrain (situations post-Fukushima) ou des archives sur le nucléaire des années 1970 à 2010. Le programme fédérateur conduit à des séminaires réunissant acteurs du nucléaire et chercheurs en sciences sociales.

La présence française au projet européen Myrrha est surtout portée par le CNRS/Needs depuis 2005 (rapport n°9, Appendice X). Myrrha est fortement soutenu par la Belgique. L'apport du CNRS a été décisif dans les données nucléaires de base, le développement des composants de l'accélérateur, la construction et les mesures de sous-criticité du système Guinevere. Il est actuellement le leader du WP du projet H2020 Myrte (2015-19) pour le design et la construction du premier étage de l'accélérateur définitif de Myrrha (Linac ADS de 100 MeV) et des cavités

accélératrices supra-conductrices. La décision de construire cette première partie de Myrrha pourrait être prise fin 2017.

Le CNRS développe quasiment seul depuis 20 ans un concept de réacteur à combustible-caloporteur liquide constitué de sels de thorium fondus. Le concept du MSFR (Molten Salt Fast Reactor) qui est un RNR de GenIV innovant est au stade de l'analyse de sa sûreté. Cette analyse est très différente de celle des autres RNR en raison des particularités du MSFR : sels de fluorures, contrôle de la réactivité sans barres pour réguler le flux de neutrons, retraitement partiel et continu du sel-combustible, arrêt d'urgence par vidange du cœur. C'est l'objectif du programme H2020 Samofar (2015-19, 11 partenaires européens dont IRSN, EDF, Areva, CEA et 3 non européens : Chine, Russie, Etats-Unis). Dans ce vaste programme le CNRS assure une responsabilité dans le management et est leader de 3 WP concernant la thermo-hydraulique et la neutronique, la vidange du sel et l'installation de traitement du sel. Une boucle d'essai de vidange de sels fondus va être construite pour compléter celle de thermo-hydraulique (installation Swath à Grenoble, France)

### *Recherche pilotée par le CEA*

La recherche amont du CEA-DEN est pluridisciplinaire. Elle est organisée pour éclairer et soutenir la R&D que la DEN développe sur les réacteurs (Gen II, III et IV, RJH, ...) et les cycles du combustible. Il n'y a pas d'ailleurs de séparation nette entre les activités de recherche fondamentale et la R&D. Les évaluations annuelles de la Commission portant sur les activités du CEA-DEN les englobent souvent. Toutefois on peut dire que la ligne directrice et unificatrice qui caractérise la recherche amont de la DEN est la modélisation multi-échelles et multi-temporelle. Dans ce cadre doublement multidimensionnel le CEA aborde les propriétés des matériaux, l'énergétique et la neutronique des réacteurs, l'état du combustible, l'irradiation des composants, c'est-à-dire d'une façon générale la simulation des réacteurs. Il développe/utilise les outils théoriques de modélisation (méthode de Monte Carlo avec des milliards de tirages), utilise les calculateurs les plus puissants et les plateformes expérimentales nécessaires pour valider les codes. Evidemment la DEN collabore avec les autres directions du CEA, Needs, EDF et Areva et participe aux programmes européens, comme indiqué ci-dessus.

92

Le CEA a présenté à la Commission à titre d'illustration les derniers développements sur la simulation/validation du comportement des pastilles et du crayon combustible UOx ou MOx, couvrant les aspects mécanique, thermique et physico-chimique. Le CEA peut prédire la diffusion des éléments O, U, Pu et des produits de fission, la croissance des bulles de gaz de fission, la réorganisation chimique des oxydes dans les grains d'oxyde et aux joints de grains et les interactions oxyde-gaine. Tous les codes sont réunis dans la plateforme Pléiades (CEA, EDF Areva) qui constitue un formidable outil, d'ailleurs utilisé pour Astrid. Pléiades capitalise également des données expérimentales pour valider les codes.

Un domaine où la recherche amont est très importante est celui de mise au point du combustible CCAM, oxyde mixte d'uranium et d'américium (voir rapports n°8 Annexe VIII et n°9 Annexe XII). A cet égard la Commission a noté les difficultés d'identification des phases du système U/Am/O et de leurs domaines de stabilité, notamment en situation de transmutation d'Am. Actuellement le CEA maîtrise la fabrication des oxydes  $U_{1-x}Am_xO_{2+\delta}$  avec  $0,75 < x < 0,5$  et de pastilles avec les densités élevées recherchées (> 95 % de la densité théorique). La tenue à la situation en réacteurs est en cours (expériences préliminaires Marios, Diamino et AmBB-1). Il reste à montrer que ces oxydes une fois préparés sont stables avant d'être mis en réacteur.

L'auto-irradiation alpha des oxydes préparés avec  $^{241}Am$  conduit d'abord à une oxydation (prouvée par DRX, O/U+Am augmente, paramètre de maille diminue) suivie d'un gonflement (inférieur à 1 %) dû à l'accumulation d'hélium et de défauts locaux autour de Am (prouvé par SAX) mais sans amorphisation globale de la structure (prouvé par DRX). Les dernières expériences de XANES montrent que  $Am^{3+}$  existe quelque soit x et que si  $0,75 < x < 0,3$ ,  $\delta=0$  et qu'il y a autant de  $U^{5+}$  que de  $Am^{3+}$  ( $U_{(1-2x)}^{5+}U_x^{3+}Am_xO_2$ ). Dans les autres cas U peut être au degré d'oxydation 5 et 6 et les oxydes sont sous stœchiométriques en oxygène ( $\delta = 0,03$ ). Ces données ont permis d'établir par modélisation le domaine d'existence des composés  $U_{1-x}Am_xO_{2+\delta}$  dans le

ternaire U/Am/O. Pour autant les études sur l'oxyde du combustible CCAM ne sont pas terminées.

Si la France décide d'introduire des réacteurs RNR GenIV une recherche amont forte sera nécessaire : recyclage du MOx-REP (présence de  $^{241}\text{Am}$  en quantité importante), recyclage rapide du MOx RNR (présence de  $^{238}\text{Pu}$ , nouveau spectre de PF), recyclage éventuel du CCAM. Il faudra probablement changer et simplifier tous les procédés. Les défis sont immenses mais à la portée des équipes françaises pour peu qu'on leur en donne les moyens.

### *L'Institut de Chimie Séparative de Marcoule (CEA – CNRS – Université de Montpellier – ENSCM)*

L'ICSM (UMR 5257) occupe un espace de recherche partagé entre CNRS (11 personnes), CEA (22 personnes) et UM/ENSCM (11 personnes) consacré pour 75 % au nucléaire en amont des activités de la DEN. Les recherches concernent les domaines des matériaux/nanomatériaux (dissolution et fabrication des combustibles, matrice de confinement) et de la séparation (amont et aval du cycle). Les avancées fondamentales sont au niveau de la dynamique des mécanismes moléculaires à l'interface solide-liquide et/ou supramoléculaires à l'interface liquide-liquide, respectivement étudiés par microscopie haute résolution et réflectivité des rayons X et des neutrons. L'ICSM étudie la dissolution classique des constituants du combustible usé contenant du Pu (suivi *in operando*) ou la dissolution assistée par sonochimie. Les phénomènes redox ont une grande importance. Les propriétés des oxydes d'actinides dépendent de la morphologie des précurseurs, elle-même dépendante du composé de départ (inorganique ou organique). Les relations ont été clairement démontrées. L'ICSM a radicalement changé le regard que l'on portait sur la séparation liquide-liquide des éléments métalliques en disséquant les effets de complexation, d'auto-organisation et de dispersion en phase organique. Cela offre des combinaisons supplémentaires de molécules et diluants pour faire varier la sélectivité des extractions. Tout est modélisé du microscopique au mésoscopique. Enfin plusieurs voies prospectives sont ouvertes en séparation en utilisant des phases inusuelles : liquides ioniques, mousses, en plus des phases traditionnelles et en récupérant directement les métaux extraits de la phase organique. L'ICSM ouvre des choix conformément à sa mission.

# COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION

---

Membres de la Commission Nationale d'Évaluation :

**Jean-Claude DUPLESSY**  
**Pierre BEREST\***  
**Adolf BIRKHOFFER\***  
**Frank DECONINCK**  
**Pierre DEMEULENAERE**  
**Robert GUILLAUMONT**  
**Maurice LAURENT**  
**Emmanuel LEDOUX**  
**Maurice LEROY**  
**Jacques PERCEBOIS**  
**Gilles PIJAUDIER-CABOT**  
**François ROURE**  
**Claes THEGERSTRÖM**

Secrétaire général & Conseiller scientifique :

**Stanislas POMMERET**

Président honoraire :

**Bernard TISSOT**

Secrétariat administratif :

**Véronique ADA-FAUCHEUX**  
**Florence LEDOUX**

# COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION

---

Président : **Jean-Claude DUPLESSY**

Vice-Présidents : **Emmanuel LEDOUX et Maurice LEROY**

Secrétaire général & Conseiller scientifique : **Stanislas POMMERET**

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

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

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

ISSN : 2257-5758