

# COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION

---

DES RECHERCHES ET ÉTUDES RELATIVES  
À LA GESTION DES MATIÈRES ET DES DÉCHETS RADIOACTIFS

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

RAPPORT D'ÉVALUATION N° 12

**JUIN 2018**



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° 12

JUIN 2018



## TABLE DES MATIERES

<b>AVANT-PROPOS : FIXER UN CAP .....</b>	<b>5</b>
<b>RESUME – CONCLUSION .....</b>	<b>7</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>11</b>
<b>CHAPITRE I : CIGEO .....</b>	<b>13</b>
1.1    LA PROCEDURE D’INSTRUCTION DE CIGEO.....	13
1.1.1 <i>Les spécificités de Cigéo.....</i>	13
1.1.2 <i>L’impact du DOS sur la préparation de la DAC .....</i>	14
1.2    ÉTAT ACTUEL DU PROJET .....	14
1.3    INVENTAIRE DES DECHETS CIGEO.....	15
1.4    LE SOCLE DE CONNAISSANCES.....	16
1.4.1 <i>Un socle de connaissances pour étayer le dimensionnement de Cigéo .....</i>	16
1.4.2 <i>Les axes de recherche prévus pour la DAC.....</i>	17
1.5    LES BITUMES.....	20
1.5.1 <i>Bref historique .....</i>	20
1.5.2 <i>Etudes et recherche en cours.....</i>	20
1.5.3 <i>Conclusions et recommandations.....</i>	21
1.6    SURETE A LONG TERME DE CIGEO.....	21
1.7    SURVEILLANCE DE CIGEO EN EXPLOITATION .....	22
1.8    LA MAQUETTE NUMERIQUE DE CIGEO .....	22
1.9    COUTS DE CIGEO ET INGENIERIE FINANCIERE.....	23
1.9.1 <i>Ingénierie contractuelle .....</i>	23
1.9.2 <i>Provisions des producteurs de déchets .....</i>	24
1.10    DE LA NECESSITE DE DECIDER.....	25
1.10.1 <i>Entreposage ou stockage ?.....</i>	25
1.10.2 <i>Le risque de différer la décision .....</i>	25
1.10.3 <i>Le cadre institutionnel de la prise de décision .....</i>	26
<b>CHAPITRE II : SEPARATION ET TRANSMUTATION .....</b>	<b>27</b>
2.1    GESTION DES MATIERES ET DES DECHETS .....	27
2.2    ASTRID .....	27
2.2.1 <i>Conception du réacteur .....</i>	28
2.2.2 <i>Les installations du cycle.....</i>	28
2.2.3 <i>Consommation accrue de plutonium.....</i>	28
2.2.4 <i>Séparation et Transmutation.....</i>	28
2.3    PROPOSITION D’EVOLUTION DU PROJET ASTRID .....	29
2.4    SCENARIOS ET VALORISATION DU PLUTONIUM.....	30
2.4.1 <i>Scénarios de déploiement d’un parc de RNR et conséquences .....</i>	30
2.4.2 <i>Multirecyclage du plutonium en REP.....</i>	30
<b>CHAPITRE III : GESTION DES DECHETS .....</b>	<b>31</b>
3.1    DECHETS DE TRES FAIBLE A TRES TRES FAIBLE ACTIVITE.....	31
3.2    DECHETS TENORM.....	32
3.3    DECHETS FAVL.....	32
3.4    GESTION DES DECHETS.....	33
3.4.1 <i>Entreposage.....</i>	33
3.4.2 <i>Assainissement &amp; démantèlement .....</i>	33
3.5    STRATEGIE DE DEMANTELEMENT.....	34
<b>CHAPITRE IV : PANORAMA INTERNATIONAL.....</b>	<b>35</b>
4.1    EXCLUSION, EXEMPTION, LIBERATION, NORM, TENORM – APPROCHE INTERNATIONALE.....	35
4.1.1 <i>Introduction .....</i>	35
4.1.2 <i>Quelques définitions internationalement acceptées .....</i>	35
4.1.3 <i>Approches internationales.....</i>	36

4.2	LE PROJET DE STOCKAGE EN SUEDE .....	37
4.2.1	<i>Introduction</i> .....	37
4.2.2	<i>Avis de l'Autorité de sûreté (SSM)</i> .....	37
4.2.3	<i>Avis de la Cour environnementale</i> .....	37
4.2.4	<i>Etape suivante</i> .....	38
4.3	MISSION D'ETUDE EN SUEDE ET EN FINLANDE.....	38
4.3.1	<i>Les systèmes énergétiques</i> .....	38
4.3.2	<i>Gestion des déchets</i> .....	39
4.3.3	<i>Le processus d'acceptation sociétale</i> .....	41
4.3.4	<i>Le recyclage de déchets métalliques</i> .....	43
	<b>ANNEXE I : ACTIVITE DE LA COMMISSION .....</b>	<b>47</b>
	<b>ANNEXE II : PRESENTATIONS ET VISITES DE LA COMMISSION .....</b>	<b>49</b>
	<b>ANNEXE III : AUDITIONS REALISEES PAR LA COMMISSION .....</b>	<b>51</b>
	<b>ANNEXE IV : LISTE DES PERSONNES AUDITIONNÉES PAR LA COMMISSION .....</b>	<b>53</b>
	<b>ANNEXE V : LISTE DES DOCUMENTS TRANSMIS A LA COMMISSION EN 2017-2018 .....</b>	<b>55</b>
	<b>ANNEXE VI : COMPOSITION DE LA COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION .....</b>	<b>57</b>
	<b>ANNEXE VII : L'ENVIRONNEMENT GEOLOGIQUE, HYDROGEOLOGIQUE ET HYDROGEOCHIMIQUE .....</b>	<b>59</b>
	<b>ANNEXE VIII : LA PROCEDURE D'INSTRUCTION DE CIGEO .....</b>	<b>63</b>
	<b>ANNEXE IX : EVOLUTION TECHNOLOGIQUE DE CONCEPTION DES ALVEOLES MAVL ET GALERIES .....</b>	<b>65</b>
	<b>ANNEXE X : HYPOTHESES INFLUENÇANT LE PLAN MASSE DE CIGEO.....</b>	<b>67</b>
	<b>ANNEXE XI : EXEMPLE DE DIMENSIONNEMENT D'OUVRAGES DE CIGEO .....</b>	<b>69</b>
	<b>ANNEXE XII : LES AXES DE R&amp;D POUR LA DAC .....</b>	<b>71</b>
	<b>ANNEXE XIII : BITUMES : ECHAUFFEMENT DES COLIS BITUMES – DONNEES ACTUELLES .....</b>	<b>77</b>
	<b>ANNEXE XIV : PROGRAMME ASTRID ET MULTIRECYCLAGE EN RNR .....</b>	<b>83</b>
	<b>ANNEXE XV : LE MULTIRECYCLAGE EN REP .....</b>	<b>87</b>
	<b>ANNEXE XVI : DECHETS DE FAIBLE ET TRES FAIBLE ACTIVITE (TFA, FAVL ET TENORM) .....</b>	<b>89</b>
	<b>ANNEXE XVII : ENTREPOSAGES ET DECHETS.....</b>	<b>93</b>
	<b>ANNEXE XVIII : PRECONISATIONS ET PRATIQUES SUR LA LIBERATION DES DECHETS .....</b>	<b>99</b>
	<b>ANNEXE XIX : AVIS DE L'AUTORITE DE SURETE SUEDOISE .....</b>	<b>105</b>
	<b>ANNEXE XX : AVIS DE LA COUR ENVIRONNEMENTALE .....</b>	<b>107</b>
	<b>ANNEXE XXI : MISSION D'ETUDE EN SUEDE ET EN FINLANDE.....</b>	<b>109</b>

## AVANT-PROPOS : FIXER UN CAP

Il n'y a pas de gestion cohérente des matières nucléaires et des déchets radioactifs sans une stratégie énergétique clairement affichée.

A l'heure où la Commission écrit son rapport, la Commission nationale du débat public organise un débat sur la Programmation pluriannuelle de l'énergie conformément à la loi du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte. Dans le cadre du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR), plusieurs scénarios ont été envisagés pour le futur de la filière nucléaire. L'Andra, dans le cadre de l'inventaire national des matières et déchets radioactifs (INMDR), évalue les quantités de déchets que ces scénarios pourraient produire. Comme l'a rappelé la Commission lors de son audition par l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques le 23 novembre 2017, les choix stratégiques dans le domaine de l'énergie ont un impact direct sur la conception du stockage des déchets radioactifs. En effet, ces choix sont susceptibles de transformer en déchets des quantités importantes de matières nucléaires considérées aujourd'hui comme valorisables.

La France doit faire le choix entre trois options stratégiques quant à sa filière électronucléaire.

- Option 1 : poursuite de la filière avec la perspective, à moyen-long terme, de la mise en place d'un parc de réacteurs à neutrons rapides (RNR).
- Option 2 : poursuite de la filière sans perspective de mise en place d'un parc de réacteurs à neutrons rapides.
- Option 3 : abandon de la filière électronucléaire par non-renouvellement en fin de vie des réacteurs actuels.

Chacune de ces trois options a des conséquences très différentes sur la définition des matières nucléaires ainsi que sur le volume et la nature des déchets à stocker dans Cigéo.

5

L'option 1, répondant aux dispositions de la loi de 2006, a pour objectif de réutiliser les matières fissiles (uranium et plutonium) du parc actuel pour produire de l'énergie dans un futur parc comprenant des RNR. Elle stabilisera le stock de plutonium et pourrait permettre la transmutation des actinides mineurs des parcs électronucléaires du futur.

Les options 2 et 3 impliquent le stockage direct de combustibles usés. L'absence de RNR ne permettra ni la réduction du stock de plutonium ni la transmutation des actinides mineurs. En outre, avant le démantèlement des installations de retraitement qui n'auraient plus de raison d'être, l'option 3 nécessite le traitement des matières devenues sans usages et sans filières dédiées. Ces options entraîneraient une modification conséquente du cahier des charges du projet Cigéo afin de prendre en charge de nouveaux types de déchets.

Les incertitudes actuelles sur la stratégie mettent en péril la capacité de la France à étudier et à préparer l'utilisation des matières nucléaires pour le futur. Ces incertitudes introduisent une instabilité du cahier des charges de Cigéo.

*La Commission recommande qu'après le débat public sur la programmation pluriannuelle de l'énergie, la France définisse une stratégie électronucléaire de moyen-long terme, claire et lisible par tous.*

*Compte tenu du volume de déchets déjà produits (48 000 m<sup>3</sup>) et de la solidité des connaissances scientifiques et techniques déjà acquises, la Commission recommande également que le processus de dépôt de la DAC dans le cadre législatif actuel ne soit surtout pas ralenti.*







## RÉSUMÉ – CONCLUSION

L'industrie nucléaire génère des déchets radioactifs. Certains sont particulièrement dangereux pour le public en raison de leurs fortes activités et de leurs vies longues. Selon les dispositions de la loi de 2006, la gestion à long terme de ces déchets comporte trois volets : leur entreposage industriel, leur stockage géologique et la séparation–transmutation des éléments radioactifs à vie longue. Par ailleurs, l'industrie nucléaire et le démantèlement des installations déclassées produisent aussi des déchets de plus faible activité qui nécessitent des gestions spécifiques, notamment, en raison des grandes quantités produites. Ce rapport évalue l'état d'avancement des études et recherches sur ces thèmes et fait le point sur l'approche de ces questions dans les différents pays possédant une industrie nucléaire.

### STOCKAGE GÉOLOGIQUE CIGÉO

Le projet Cigéo a pour finalité la conception, la construction et l'exploitation d'un stockage géologique réversible des déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue (HAVL et MAVL). Ce stockage doit être réalisé à 500 m de profondeur dans la couche d'argilite du Callovo-oxfordien (Cox), épaisse d'environ 130 m, en Meuse-Haute Marne. Il a bénéficié de plus de vingt ans d'études et de recherches menées par l'Andra et par la communauté scientifique, notamment dans le laboratoire souterrain de Bure. Par opposition à un entreposage, intrinsèquement provisoire, un stockage réalisé sur des bases scientifiques et techniques solides représente une solution pérenne, parce qu'il s'appuie sur des propriétés stables de la nature.

La Demande d'autorisation de création (DAC) du stockage Cigéo devrait être déposée courant 2019, puis instruite sous l'égide de l'ASN. Par ailleurs, la loi de 2006 stipule que la DAC donne également lieu à un rapport de la Commission. L'Andra prépare actuellement la DAC. La Commission demande que l'évaluation de la sûreté de Cigéo se fasse sur l'ensemble de l'inventaire identifié pour la DAC. La Commission constate qu'à l'occasion de l'avant-projet détaillé, les évolutions de conception de Cigéo vont dans le sens d'une simplification de l'architecture, d'une augmentation de l'utilisation de moyens de creusement mécaniques plus sécurisés et corrélativement d'une diminution des coûts.

L'Andra met à jour l'évaluation financière de l'ensemble du projet Cigéo. La Commission demande qu'elle explicite l'impact des incertitudes et des aléas de réalisation sur le coût global du projet.

La Commission apprécie favorablement le vaste programme engagé par l'Andra pour la consolidation et la structuration de ses acquis. Cet effort fournit un socle de connaissances robuste en soutien aux calculs de dimensionnement de Cigéo par l'Andra. Ce socle est évalué et utilisé par les autorités en charge de la vérification. L'Andra a mis en place un programme de recherche complémentaire visant à mieux évaluer la performance des scellements de Cigéo et à mieux décrire le comportement transitoire du stockage après fermeture. La Commission recommande que l'estimation de l'impact de la variabilité spatiale et de l'évolution au cours de la vie du stockage des paramètres clés des simulations soit ainsi affinée. La Commission considère que le socle de connaissances sur la migration des radionucléides est suffisant pour estimer leur transfert à très long terme aux limites du Cox.

Il est apparu récemment que l'acceptabilité des colis bitume MAVL dans Cigéo a été contestée. La question débattue par les différents acteurs est, *in fine*, de savoir s'il peut y avoir (1) une auto-inflammation d'un colis bitume au sein d'un alvéole MAVL et (2) une propagation à l'ensemble de l'alvéole si cela devait se produire. Le corpus de connaissances fait l'objet d'interprétations divergentes. Des études complémentaires sont en cours. La Commission a demandé lors de son audition devant l'OPECST que soit conduite une expertise scientifique internationale dont la création a été annoncée par le Comité de Haut Niveau du projet Cigéo. La Commission suivra avec intérêt le déroulement de cette expertise internationale et analysera avec la plus grande attention le corpus de documents remis à cette commission.

Les études de l'Andra permettent de garantir la faisabilité de Cigéo. La Commission attire l'attention des pouvoirs publics sur les risques de différer indéfiniment la décision de création en préférant des solutions de court terme à la solution de long terme. La Commission recommande instamment que les pouvoirs publics mobilisent l'ensemble des parties prenantes pour que la DAC soit déposée dans les temps. Elle considère que le socle de connaissances acquis par l'Andra est suffisant pour cela. Le processus décisionnel ne doit pas être ralenti, de sorte que ce soit bien notre génération qui assume la responsabilité des déchets qu'elle a produits.

## SEPARATION ET TRANSMUTATION

La loi de 2006 dispose que les recherches sur la transmutation doivent être menées dans le cadre de celles sur les réacteurs de Génération IV. C'est pourquoi le CEA, associé aux industriels, avait lancé le programme Astrid visant à concevoir et réaliser un démonstrateur industriel de réacteur à neutrons rapides (RNR) de 600 MWe se démarquant des projets antérieurs par un niveau de sûreté accru. La Commission a suivi le développement de ce projet conforme au sens de la loi et considère que le concept du réacteur Astrid représente un progrès très significatif au regard des autres RNR existants ou en projet dans le monde.

La Commission souligne l'importance stratégique des études et recherches sur la séparation et la transmutation. Celles-ci sont indispensables pour une gestion maîtrisée des matières et des déchets du cycle électronucléaire ; la transmutation permettrait notamment de minimiser les quantités d'actinides à stocker. Dans ce sens, la Commission souhaite que le CEA maintienne et développe une expertise et une compétence en physique et chimie des actinides.

Tenant compte du faible coût de l'uranium, du déploiement, envisagé par EdF, d'une flotte d'EPR dont la durée de vie programmée est de 60 ans et devant la remise en cause par ses tutelles du niveau de puissance du RNR Astrid, le CEA envisage maintenant un programme de recherche fondé sur la mise en œuvre d'un RNR de faible puissance. Ce programme bénéficierait de tous les acquis actuels du programme Astrid et ferait largement appel à la simulation. La Commission attend une présentation de ce programme.

La Commission déplore qu'une stratégie globale et cohérente à moyen-long terme pour la filière électronucléaire ne soit toujours pas clairement définie pour les RNR. Les incertitudes qui en résultent ont aussi des conséquences graves sur la programmation nécessairement pluriannuelle des recherches à mener pour donner à la France les moyens de ses ambitions. Ceux-ci doivent être mobilisés dès à présent pour éviter de mettre en péril un savoir-faire reconnu internationalement.

A la demande du PNGMDR, les industriels ont repris les études du multi-recyclage de l'uranium et du plutonium en REP. La Commission note que ce multi-recyclage ne permet qu'une diminution limitée de consommation d'uranium naturel au prix d'un accroissement notable de la production d'actinides mineurs. Par ailleurs comparée à celle d'une filière RNR, cette gestion des matières n'intègre pas les objectifs de la loi de 2006.

## DEMANTELEMENT ET GESTION DES DECHETS

Toutes les installations nucléaires de base doivent être assainies et démantelées après leur mise à l'arrêt. Des quantités considérables de déchets de très faible activité (TFA) vont être produites. Certains de ces déchets pourraient être recyclés comme c'est le cas dans d'autres pays européens. Toutefois, le recyclage des TFA nécessite que la législation française évolue sur la reconnaissance d'un seuil de libération. La Commission constate qu'au stade des études en cours, aucune conclusion franche n'est apparue.

La Commission s'interroge également sur la disponibilité des outils et des protocoles d'analyse fiables permettant la mesure de la radioactivité à des niveaux voisins du Bq/g, pour de très grands volumes de déchets. Elle demande que lui soit présenté l'état de l'art sur cette question. La Commission rappelle que la politique de gestion des TFA doit reposer sur des études caractérisant leur nocivité et répondre ainsi aux attentes sociétales.

La Commission rappelle que le démantèlement produira des quantités significatives de FAVL qui s'ajouteront à ceux issus des procédés mis en œuvre dans le cycle du combustible. À ce jour, il n'existe toujours pas d'exutoire pour ces déchets. La Commission recommande que les producteurs et l'Andra se concertent de façon approfondie pour proposer à l'ASN des stratégies de gestion des FAVL prenant en compte les spécificités des déchets.

Au moment où le démantèlement des installations nucléaires concerne plusieurs pays, la Commission encourage la mise en place d'une stratégie industrielle et d'une école du démantèlement afin de mieux valoriser ce savoir-faire.

## PANORAMA INTERNATIONAL

Tous les pays utilisant l'énergie nucléaire considèrent que le stockage géologique des déchets HAVL-MAVL est la solution de référence. C'est en Finlande et en Suède que la mise en œuvre d'un tel stockage est la plus avancée. Elle a fait l'objet d'un processus de concertation démocratique qui a conduit à une large acceptation dans les communes concernées.

En Finlande, où 4 sites ont été examinés, au regard des critères géologiques, le choix final s'est porté sur la commune d'Eurajoki (Presqu'île d'Olkiluoto), qui s'est prononcée en faveur du stockage. La construction du stockage a commencé en 2017.

En Suède, la procédure pour la demande d'autorisation d'un stockage géologique profond pour les combustibles usés a commencé en mars 2011. Pendant la période 2011-2017, un processus formel d'analyse s'est déroulé avec des expertises indépendantes. L'autorité de sûreté (SSM) a donné un avis favorable en janvier 2018. La Cour environnementale a approuvé le site de Forsmark, la roche hôte (granite), les barrières ouvragées et les études d'impact environnemental. Elle a également donné un avis favorable sur l'usine d'encapsulation et sur le site d'entreposage des combustibles usés (Clab). Toutefois, elle a souhaité que SKB, responsable du projet, complète son dossier sur le conteneur et que le gouvernement clarifie les responsabilités après fermeture du stockage, rejoignant ainsi la demande de la commune.

Les communes abritant des sites nucléaires ont écrit au Gouvernement et au Parlement pour attirer leur attention sur la nécessité de mettre en œuvre un stockage géologique. Elles ont demandé au Gouvernement de veiller à ce que le processus d'autorisation ne soit pas inutilement rallongé.







## INTRODUCTION

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

En juin 2006, une seconde loi sur la gestion des matières et déchets radioactifs a confirmé l'existence et le rôle de la Commission qui est donc devenue l'actuelle CNE 2, dont le présent document constitue le 12<sup>ème</sup> rapport transmis au Parlement.

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

\*\*\*\*\*

Cette année, la Commission a conduit 9 auditions d'une journée, rassemblant, en général, une soixantaine de personnes représentant l'ensemble des acteurs de la filière. Elle a aussi procédé à 5 auditions restreintes et à plusieurs déplacements (Cf. Annexes I à VI). Pour ce 12<sup>ème</sup> rapport, elle a tenu compte des documents qui lui ont été transmis jusqu'à la date du 1<sup>er</sup> mai 2018.

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

Les lois de 1991 et de 2006 ont également préconisé que des recherches soient conduites sur la séparation puis la transmutation des éléments radioactifs à vie longue présents dans les déchets, afin d'en réduire la radiotoxicité à long terme. Le présent rapport fait le point sur les résultats très innovants acquis dans le cadre du projet de réacteur à neutrons rapides (RNR) Astrid dont le CEA a été maître d'ouvrage. La Commission a pris note que le CEA ne peut poursuivre ce projet et envisage pour l'avenir un projet de RNR adapté à la recherche et couplé à un ambitieux programme de simulation. La Commission rappelle l'importance des recherches sur la transmutation et souhaite qu'une analyse détaillée de ce projet lui soit présentée.

La Commission évalue également les problématiques liées à la gestion des déchets nucléaires, quelle que soit leur activité. Elle souligne que le démantèlement de nombreuses installations nucléaires produira en France de très grandes quantités de déchets de faible et très faible radioactivité et que leur gestion doit être prévue sur le long terme. A cette fin, elle analyse quelle stratégie est suivie dans plusieurs pays pour les gérer de manière optimale.

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



## CHAPITRE I : CIGÉO

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

Assistée de son maître d'œuvre système, le groupement Gaiya (Technip-Ingérop), l'Andra, agissant comme maître d'ouvrage, a mené l'avant-projet sommaire (APS) de Cigéo jusqu'en juin 2015. Après une revue de projet commanditée par la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC), le projet est entré dans la phase d'avant-projet détaillé (APD) qui devrait se clôturer par le dépôt de la demande d'autorisation de création (DAC) prévue en 2019. Pour préparer le dépôt de la DAC, l'Andra a élaboré un dossier d'options de sûreté (DOS) qui a été instruit par l'ASN/IRSN jusqu'en octobre 2017.

Ce chapitre présente les réflexions de la Commission sur les avancées du projet Cigéo acquises depuis cette date.

### 1.1 LA PROCÉDURE D'INSTRUCTION DE CIGÉO

La procédure d'instruction du projet Cigéo est encadrée par des dispositions strictes découlant de la réglementation des installations nucléaires de base (INB) et du code de l'environnement. Les principales étapes de cette procédure sont rappelées en Annexe VIII. Conformément à la législation en vigueur, Cigéo, en tant qu'INB, sera soumis aux visites décennales de l'ASN. Par ailleurs, la loi de 2016 sur la réversibilité prévoit l'implication du public dans le pilotage de Cigéo.

#### 1.1.1 Les spécificités de Cigéo

Sur le plan technique, Cigéo diffère des autres INB par sa durée d'exploitation séculaire et la coexistence d'installations de surface et souterraines.

Cette durée d'exploitation implique une construction par tranches successives ainsi qu'une fermeture échelonnée des ouvrages. Il est raisonnable de considérer que les composants du stockage dont la construction est lointaine seront réalisés différemment par rapport à ce qui est prévu dans le dossier de DAC. En effet la flexibilité de Cigéo doit permettre de l'adapter pour intégrer le retour d'expérience et les progrès scientifiques et technologiques.

Le caractère souterrain de l'installation implique la conception et la qualification de matériels spécifiques. A cette fin, l'Andra prévoit une phase industrielle pilote (Phipil) en début de vie de Cigéo, pendant laquelle seront confortés les performances des équipements, le dimensionnement des ouvrages et la démonstration de sûreté. C'est au cours de la Phipil, envisagée sur une dizaine d'années, qu'interviendra la première mise en service pour permettre, vers 2030 selon l'Andra, la réception de colis radioactifs. Celle-ci sera autorisée sur la base d'un dossier prenant en compte le retour d'expérience et les démonstrations réalisés avec les colis inactifs. L'Andra prévoit de produire, après une expérimentation suffisante, un rapport pour engager le processus d'autorisation de mise en service industrielle à partir de 2036.

La flexibilité de Cigéo nécessite un accompagnement scientifique et technique pendant toute la durée de la vie de l'installation. L'Andra propose de définir un programme de R&D sous la forme d'un plan de développement de l'installation de stockage (PDIS), qui distingue la période

intermédiaire entre la DAC et la Phipil, la Phipil proprement dite puis la phase d'exploitation. Ce document fait actuellement l'objet de discussions avec l'ASN.

*La Commission rappelle que l'Andra doit prouver que la réalisation de Cigéo est possible avec les techniques disponibles aujourd'hui et que la phase industrielle pilote doit durer le temps nécessaire pour valider les options techniques et atteindre le fonctionnement en régime nominal. Par ailleurs, elle considère que la poursuite de la R&D est une nécessité pour que, dans le futur, de nouvelles solutions techniques puissent être mises en œuvre dans des conditions de sûreté optimales.*

### 1.1.2 L'impact du DOS sur la préparation de la DAC

Le dossier d'options de sûreté (DOS) déposé à l'ASN en avril 2016 a été instruit entre juillet 2016 et mai 2017. Les recommandations de l'IRSN ont été examinées par le Groupe permanent d'experts en mai 2017 qui a émis un avis comportant 3 recommandations et faisant état de 66 engagements de la part de l'Andra. L'avis final de l'ASN a été publié en janvier 2018.

Une analyse du DOS a aussi été produite par un groupe international d'experts sous l'égide de l'AIEA, qui a siégé en novembre 2016. La Commission a également remis une analyse du dossier en novembre 2016 dont les conclusions ont été exposées dans son rapport n°11. Une initiative citoyenne a enfin été conduite par l'IRSN en association avec l'Andra.

Les conclusions de ces différentes analyses s'accordent à souligner :

- le caractère documenté du dossier ;
- la maturité scientifique et technique globalement satisfaisante à ce stade ;
- l'aspect positif du principe de développement progressif de l'installation soutenue par le plan directeur d'exploitation.

Les recommandations ont porté de façon générale sur la nécessité de justifier, au moment de la DAC, l'architecture du stockage pour mieux assurer la sûreté. L'Andra a réagi positivement aux recommandations et demandes et s'est engagée vis-à-vis de l'ASN/IRSN notamment sur les questions scientifiques suivantes :

- la maîtrise du comportement et des performances des ouvrages de fermeture ;
- la maîtrise du comportement à grande échelle du stockage incluant les transitoires hydro-thermo-mécaniques à long terme ;
- les dispositifs de surveillance.

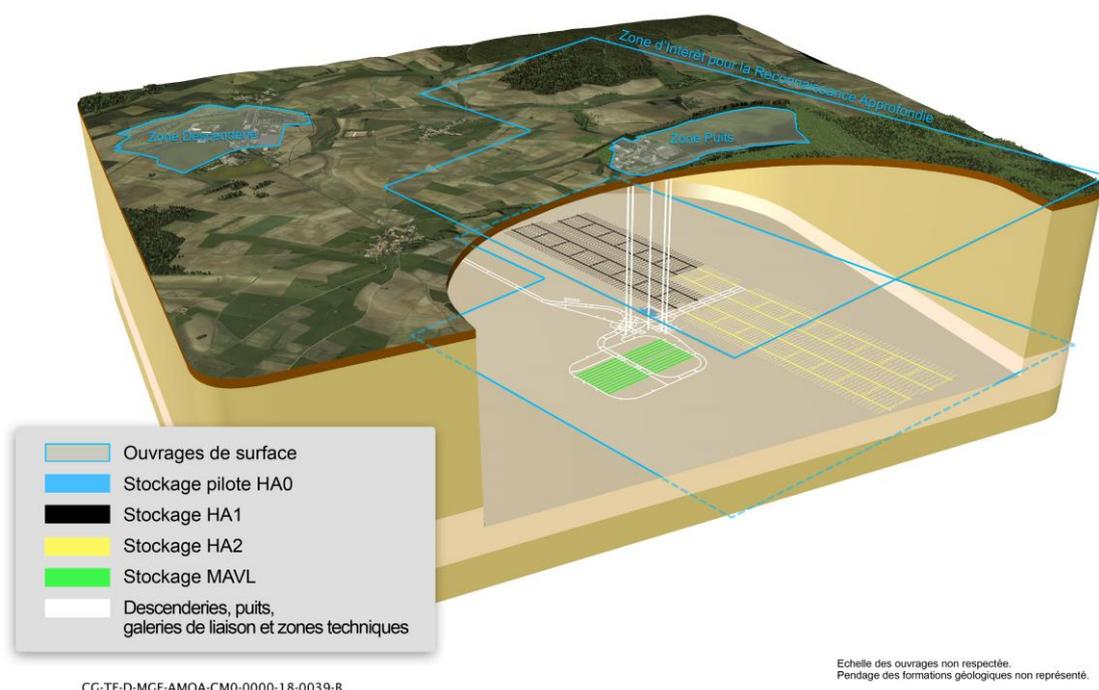
Les principaux axes de consolidation scientifique sur lesquels l'Andra a structuré son programme de R&D pour la DAC sont repris dans le sous-chapitre 1.4 du présent rapport.

Une réserve importante a été émise quant à la capacité de Cigéo à prendre en charge en l'état les colis de boues bitumées. Ce point fait l'objet du sous-chapitre 1.5 du présent rapport.

## 1.2 ÉTAT ACTUEL DU PROJET

A l'occasion de l'avant-projet détaillé (APD) en cours, l'Andra a fait évoluer la conception proposée en avant-projet sommaire (APS) utilisée pour le DOS. Cette évolution est rendue possible par la consolidation d'optimisations envisagées lors des études précédentes. Elle est encadrée par les exigences de sûreté du stockage et par la volonté de se rapprocher du coût objectif du stockage fixé par le ministère.

Dans ses réflexions, l'Andra a distingué les sujets pouvant être pris en compte au niveau de l'APD pour fixer la configuration de référence et les sujets qui seraient seulement mentionnés dans la DAC comme pouvant constituer des évolutions envisageables non encore démontrées (Cf. Annexe IX).



Plan de masse du projet Cigéo au stade de l'APD

Les évolutions majeures prises en compte dans l'APD ont des conséquences sur le plan de masse. Elles concernent les méthodes de construction du stockage, l'allongement des alvéoles HA et la conception du quartier MAVL (Cf. Annexe IX et X).

*La Commission constate que les évolutions de conception de Cigéo vont dans le sens d'une simplification de l'architecture, d'une augmentation de l'utilisation de moyens de creusement mécaniques plus sécurisés et corrélativement d'une diminution des coûts. Elle apprécie que l'Andra mette en œuvre sa recommandation de reconnaître, dès la Phase industrielle pilote, la totalité du périmètre de la zone MAVL.*

### 1.3 INVENTAIRE DES DÉCHETS CIGÉO

Les inventaires de référence et de réserves de Cigéo servent à concevoir l'installation (articles D 542 du code de l'environnement). Le premier est constitué des colis de déchets HA et MAVL du PIGD (version E de 2016). Il correspond à la production de déchets selon la stratégie actuelle de gestion du combustible nucléaire usé, quel qu'il soit (civil, militaire). Il sert à développer l'APD pour concevoir Cigéo et déposer la DAC. Le second est constitué des colis de déchets susceptibles d'être accueillis dans Cigéo si cette stratégie est modifiée et si les nouvelles filières de gestion d'autres déchets à vie longue ne pouvaient pas être mises en place. Il sert à développer les études dites d'adaptabilité pour concevoir Cigéo. Ces études, incluses dans l'APD, consistent à montrer que les choix techniques pris pour la configuration de Cigéo correspondant à l'inventaire de référence ne sont pas réhibitoires vis-à-vis d'autres déchets.

L'inventaire de référence est connu (10 000 m<sup>3</sup> HAVL, 73 000 m<sup>3</sup> MAVL) dont 48 000 m<sup>3</sup> sont déjà produits.

L'Andra a fait des propositions pour l'inventaire de réserve : combustibles usés (civil, militaires non retraités, quantités fonction du scénario d'arrêt de retraitement), surplus de déchets HA et MAVL si les réacteurs électrogènes fonctionnaient 60 ans au lieu de 50 ans (2 000 m<sup>3</sup> de chaque catégorie) et déchets FAVL en l'absence d'exutoires (colis bitumes de Marcoule – 40 000 m<sup>3</sup>, chemise graphite – 10 000 m<sup>3</sup>, déchets retraitement UNGG de la Hague – 7 000 m<sup>3</sup>). Ces quantités comptabilisées dans l'inventaire national de 2015 vont être révisées dans l'inventaire national de 2018.

Pour la conception de Cigéo, l'Andra s'appuie sur le socle de connaissances des colis primaires HA et MAVL de déchets, fondé sur les dossiers de connaissances de ces colis transmis par les producteurs. Les colis de l'inventaire de référence sont regroupés en 19 familles pour les colis HA et 80 familles pour les colis MAVL référencées dans le PIGD et rassemblées dans la base de l'Andra Oscar. Un tel socle n'existe pas pour les colis de l'inventaire de réserve. Pour les études d'adaptabilité, le conditionnement des nouveaux déchets potentiels est estimé à partir des spécifications préliminaires d'acceptation en stockage. L'APD est établi à partir du dossier de connaissances actuel et il pourra prendre en compte d'éventuelles modifications.

La R&D en support à la DAC est organisée selon les fonctions de sûreté que doit remplir chaque composant de Cigéo. La R&D sur la connaissance des colis primaires n'est pas concernée.

*La Commission demande que l'évaluation de la sûreté de Cigéo se fasse sur l'ensemble de l'inventaire identifié pour la demande d'autorisation de création.*

*Les connaissances acquises sur le comportement des combustibles usés dans Cigéo sont insuffisantes pour étayer une analyse de sûreté. Donc la Commission constate que les combustibles usés ne peuvent pas être intégrés dans l'inventaire de la demande d'autorisation de création qui sera déposée en 2019.*

## 1.4 LE SOCLE DE CONNAISSANCES

### 1.4.1 Un socle de connaissances pour étayer le dimensionnement de Cigéo

Le projet Cigéo bénéficie de plus de vingt-cinq ans d'études et de recherches menées par l'Andra et par la communauté scientifique française et internationale.

L'Andra a engagé un vaste programme de consolidation et de structuration des acquis qui prend la forme d'un socle de connaissances scientifiques et techniques. Il permet de positionner les connaissances et de recenser les implications opérationnelles, en particulier les besoins de développement. Il permet également d'identifier les incertitudes résiduelles, notamment en réponse aux demandes des évaluateurs (CNE, ASN, ...). Enfin, il doit constituer la référence des connaissances techniques pour la DAC.

Le socle de connaissances s'appuie sur différents supports. Les données brutes sur les caractéristiques et propriétés des composants de Cigéo sont répertoriées dans les *référentiels de connaissances scientifiques et technologiques* ; elles intègrent les incertitudes et la variabilité des paramètres. Les données sont organisées dans des *bases de données* qui assurent leur agrégation et leur traçabilité depuis les différentes sources (capteurs, analyses). Le socle est complété par des *notes conceptuelles* sur l'évolution des composants du stockage tout au long de sa vie.

Des fiches bilan dressent une synthèse des sujets scientifiques et techniques au cœur des enjeux de conception et de sûreté. Ces fiches sont fondamentales pour le dimensionnement de Cigéo. En effet, ce dernier consiste à montrer que les sollicitations pour lesquelles l'ouvrage doit être

garanti restent inférieures à des seuils admissibles (déformabilité, contraintes maximales, température, flux diffusif, ...). Cet ensemble d'inégalités constitue les « critères de dimensionnement ».

En détaillant les bases scientifiques, les hypothèses et choix qui sous-tendent les simulations, les fiches bilan constituent un référentiel indispensable pour l'opérateur qui calcule les sollicitations et détermine les seuils de dimensionnement. Elles sont tout aussi utiles pour le vérificateur qui peut critiquer la pertinence et la validité des hypothèses de base et vérifier la démarche de dimensionnement dans son intégralité. Ces fiches sont en cours d'élaboration, et seront soumises progressivement aux évaluateurs.

*La Commission note favorablement l'effort de structuration de l'ensemble des données et modèles qui soutiendront les calculs de dimensionnement de l'Andra.*

L'Annexe XI montre, à titre d'exemple, quels sont les critères de dimensionnement thermique, issus du socle de connaissances, conditionnant l'arrangement des colis dans les alvéoles MAVL moyennement exothermiques (CSD-C), et comment le dimensionnement des alvéoles MAVL basé sur une conception innovante interagit avec l'enrichissement du socle de connaissances par un programme de R&D.

- 1) L'ensemble des simulations thermiques réalisées montre que l'exigence des 65°C dans les éléments en béton, en situation nominale, est le critère enveloppe dimensionnant.
- 2) En matière de dimensionnement mécanique, les études démontrent la capacité de l'Andra à innover qui a proposé le couplage du creusement mécanisé par tunnelier avec la pose de voussoirs compressibles à l'avancement.

*La Commission recommande à l'Andra de généraliser cette démarche qui permet d'apprécier au mieux la pertinence des efforts de recherche entrepris et la validité des critères de dimensionnement.*

17

#### 1.4.2 Les axes de recherche prévus pour la DAC

Les efforts complémentaires de R&D prévus par l'Andra pour la DAC ou à prévoir au-delà sont organisés en quatre axes :

- conception des alvéoles HA ;
- maîtrise des mécanismes thermo-hydro-mécaniques (THM) dans le quartier HA ;
- caractérisation des performances hydrauliques eau/gaz de l'EDZ (zone de roche endommagée dans le voisinage proche des excavations souterraines) et des matériaux de scellement ;
- analyse des grands transitoires multi-physiques.

En fonction des besoins, ces développements seront menés en laboratoire de surface, au laboratoire souterrain ou dans l'ouvrage Cigéo au cours de la phase industrielle pilote.

Les éléments de ces axes de recherche sont repris ci-après. Une description plus détaillée est proposée dans l'Annexe XII.

##### a) Axe 1 : concept HA

Les alvéoles HA sont des micro-tunnels borgnes, orientés suivant la contrainte horizontale principale, de 100 m de long pour le quartier HA0 et de 150 m pour les quartiers HA1 et HA2. Ils sont équipés en guise de soutènement d'un chemisage en acier destiné à permettre la mise en place des colis pendant la phase d'exploitation et leur retrait pour une éventuelle récupération. Un

matériau de remplissage (ciment bentonitique) est injecté en extradoss du chemisage. Ce matériau a pour vocation de renforcer la tenue mécanique au cours du temps en limitant les vides et la dégradation des matériaux.

L'Andra prévoit pour la DAC de renforcer les recherches sur l'influence du matériau de remplissage sur la corrosion. Ultérieurement, la technique de creusement des alvéoles sera consolidée en laboratoire souterrain où une campagne de démonstrateurs est prévue de 2019 à 2024.

Rappelons enfin que la mise en service effective du quartier HA1/2 ne doit pas intervenir avant 2070. Des évolutions importantes sont hautement probables pour prendre en compte les progrès réalisés dans les domaines de la construction et des matériaux. Elles feront partie des évolutions rendues possibles par la flexibilité qui guide la construction de Cigéo.

### **b) Axe 2 : impact thermo-hydro-mécanique du quartier HA**

Les quartiers HA dégagent une importante quantité de chaleur pendant la phase thermique du stockage. L'élévation de température modifie le comportement hydraulique (surpression) et mécanique (contraintes en extension ou en cisaillement) de la roche hôte. Ces mécanismes sont fortement couplés. Les études ont permis de mettre au point, de qualifier et de valider des modèles numériques couplant processus thermiques, hydrauliques et mécaniques. Ces modèles reproduisent le comportement en champ proche et champ lointain observé au cours d'expériences au laboratoire souterrain.

Pour atteindre le double objectif de maintien en condition monophasique et de prévention de la fracturation de la roche, les caractérisations et calculs définissent un critère de température maximale de 90°C. Cette température est compatible avec les seuils de rupture en extension et en cisaillement.

18

Compte tenu de l'importance de certains paramètres (module d'Young, perméabilité) sur les résultats de calcul, l'étude de l'impact de la variabilité spatiale (inhérente à l'incertitude géologique) sur la dispersion de la réponse THM doit être détaillée en vue de la détermination d'une configuration enveloppe optimisée du quartier HA.

### **c) Axe 3 : performance hydraulique eau-gaz de l'EDZ et des matériaux bétons de scellement**

Les ouvrages de scellement prévus par l'Andra reposent sur un cœur de matériaux argileux remaniés contenu par des massifs d'appui en béton. Les revêtements de galerie au droit de chaque cœur de remplissage argileux doivent être déposés. Pour les liaisons surface-fond, le scellement est réalisé dans l'unité silto-carbonatée (USC). Pour les scellements de galeries horizontales, une option considérée consiste à pratiquer des saignées dans l'argilite, sur une profondeur correspondant à la zone fracturée connectée, puis à les remplir par des matériaux argileux gonflants pour constituer une coupure hydraulique.

Les massifs d'appui des ouvrages seront constitués en béton bas-pH. Leur fonction principale est la tenue mécanique et le confinement du noyau argileux. L'évolution chimique aux interfaces avec les argiles continue à être étudiée, notamment pour ce qui concerne la détermination des phases minérales secondaires magnésiennes qui y sont produites. Ces résultats, attendus après la DAC, ne portent pas d'enjeu de sûreté, puisque la fonction de confinement n'est pas portée par les massifs d'appui en béton mais par le noyau argileux.

L'Andra a prévu de poursuivre ses travaux sur les éléments de scellement. Des essais complémentaires sont programmés pour tester au laboratoire souterrain le remblayage des galeries avec des argilites des versées, la réalisation de saignées, la dépose des voussoirs. La caractérisation du comportement hydromécanique des mélanges argileux doit se poursuivre. Les tests réalisés par l'Andra permettront de définir et de justifier, avec un niveau de confiance suffisant pour la DAC, le choix des composants et les modes de réalisation des scellements. Les performances globales des ouvrages de scellements pourront ainsi être évaluées grâce à la

modélisation, capable d'intégrer les modes de fonctionnement de ces composants au cours des différentes phases de la vie du stockage.

#### **d) Axe 4 : les grands transitoires multi-physiques et l'équilibre final**

Cigéo est destiné à fonctionner pendant plus d'un siècle en mode exploitation ; ceci entraînera des perturbations notables du milieu environnant sur les plans thermo-hydro-mécanique et chimique. Certaines de ces perturbations seront encore actives pendant de longues périodes de temps après la fermeture. Elles s'estomperont progressivement jusqu'à obtention d'un nouvel état stabilisé. La complexité des mécanismes élémentaires entrant en ligne de compte et leurs couplages engendrent des situations transitoires dont les constantes de temps peuvent être très distinctes (Voir Annexe XII). Soucieuse d'en évaluer les conséquences sur la sûreté, l'Andra s'est attachée à caractériser et modéliser les différents domaines de fonctionnement de l'ouvrage aux différentes périodes de sa vie.

L'Andra identifie les principaux facteurs capables d'exercer des sollicitations sur le milieu en les classant d'après leur importance. Ils concernent en premier lieu les rapports entre l'eau et le gaz au sein des composantes de l'ouvrage et dans l'argilite environnante.

Les simulations du transitoire hydraulique-gaz atteignent un degré de représentativité élevé en distinguant l'architecture détaillée du stockage, ses composants multiples (Cox, EDZ, bétons, composants argileux et métalliques) et en prenant en compte les couplages multi-physiques majeurs (dégagement d'hydrogène, couplage diphasique eau/gaz, couplage thermo-hydraulique, diffusion/dissolution du gaz). Les simulations fournissent une prévision de l'évolution de la pression de gaz et de la saturation en eau dans les composants du stockage, sur plusieurs centaines de milliers d'années, ainsi qu'une évaluation des fuites de gaz par les voies de transfert identifiées.

Une fois le transitoire hydraulique-gaz résorbé, la phase gaz exprimée a disparu. L'Andra réalise des simulations hydrauliques tridimensionnelles en régime permanent du stockage en grand, en individualisant l'ensemble des alvéoles, galeries et liaisons surface-fond et en tenant compte des perméabilités des différents composants. L'ouvrage complètement resaturé évolue en fonction des conditions aux limites hydrogéologiques régionales, mais aussi des propriétés hydrodynamiques locales des composants du stockage.

Une prise en compte plus précise du régime transitoire hydraulique-gaz ne devrait pas modifier fondamentalement la sûreté à long terme de Cigéo, c'est à dire modifier la valeur maximum du flux de radionucléides aux limites du Cox. Toutefois, il convient de s'en assurer.

#### **e) Recommandations**

*La Commission apprécie favorablement le programme de recherches complémentaires en 4 axes mis en place par l'Andra.*

*L'Andra ayant montré que la performance du scellement est fortement influencée par le transitoire eau-gaz, particulièrement au sein de l'EDZ, la Commission estime que la démonstration gagnerait encore en robustesse si un essai permettant d'évaluer le comportement de l'EDZ au cours de sa réhydratation.*

*La Commission approuve que l'Andra prévoie la mise en place d'un essai de comportement hydromécanique d'un scellement de liaison surface-fond dans l'USC, à une échelle proche de 1 et dans des conditions représentatives de la resaturation après fermeture du stockage.*

*La Commission recommande que la variabilité spatiale et les variations temporelles des paramètres clés des simulations soient bien prises en compte. Une attention particulière doit être apportée au transitoire hydraulique-gaz et aux critères thermo-hydro-mécaniques car ils peuvent influencer les propriétés du Cox. Le rôle des gradients hydrauliques naturels et perturbés par l'exploitation, dans le Cox et dans les aquifères environnants, doit être précisé car ils peuvent influencer sur la sûreté à long terme.*

## 1.5 LES BITUMES

Les éléments essentiels concernant le stockage des colis de boues bitumées sont rassemblés ci-dessous. L'exposé des détails techniques et des diverses évaluations peut être consulté en Annexe XIII.

### 1.5.1 Bref historique

Le stockage, dans Cigéo, de 42 000 colis d'enrobés bitumineux MAVL est inscrit à l'inventaire de référence du PIGD version E (25 % des colis de déchets MAVL). Environ 30 000 colis produits à la STEL de Marcoule (Station de Traitement des Effluents Liquides) sont entreposés sur ce site. Les autres (12 000), produits à STE2 et STE3 (Station de Traitement des Effluents) sont entreposés à la Hague.

La R&D sur le comportement des colis bitume est conduite par le CEA et les autres producteurs/détenteurs de ces colis (Orano et EdF) depuis de nombreuses années. Les CNE 1 et 2 en ont évalué les résultats au fur et à mesure qu'elles en ont eu connaissance.

20

Dès les premières études d'option de sûreté portant sur l'APS de Cigéo (Avant-Projet Sommaire), la question du comportement des colis bitume vis-à-vis d'une élévation de température s'est posée. En effet ces colis ne sont pas inertes. Les composés chimiques enrobés dans la matrice bitume peuvent *a priori* réagir entre eux, voire avec le bitume ; les réactions seraient exothermiques et sensibles à la température. Par ailleurs le bitume, soumis à une élévation de température externe ou interne, peut, selon les circonstances, se pyrolyser et même s'enflammer à l'air. Ces réactions pourraient avoir comme conséquence de disperser la radioactivité emprisonnée dans les bitumes.

A la demande de la Commission (rapports n° 3 et 6), le CEA, l'Andra, EdF et Orano ont entrepris des études sur le comportement en température et au feu des colis bitume. Le CEA a remis à la Commission un rapport fin 2014. La Commission avait noté la bonne tenue au feu des colis de stockage de bitume et attiré l'attention sur les possibles effets dus au vieillissement des enrobés bitumineux radioactifs (Cf. Annexe XIII).

### 1.5.2 Etudes et recherche en cours

Suite aux demandes de l'ASN, l'Andra, le CEA, Orano et EdF ont mis en place un plan d'actions. Il s'agit de pouvoir décider entre concept de stockage adapté et traitement des colis. L'alternative est la suivante : l'Andra doit démontrer dans la DAC la sûreté du stockage des colis bitume en l'état, tel que prévu ou selon de nouvelles dispositions, ou bien les détenteurs des colis doivent pouvoir développer, à une échelle industrielle, un procédé de traitement des colis bitume.

La décision doit s'appuyer sur des dossiers scientifiques, techniques, économiques et de sûreté. Le plan prévoit la mise en place de groupes de travail et une revue externe.

Quelle que soit l'issue du plan, l'Andra examine dès maintenant les évolutions permettant de renforcer le concept du stockage des colis bitume vis-à-vis du risque incendie dans le respect de la réversibilité de Cigéo.

### 1.5.3 Conclusions et recommandations

La gestion des colis bitume MAVL en toute sûreté se pose depuis longtemps. Il s'agit de colis de déchets qui ne sont pas inertes au sens où les composés qu'ils renferment sous forme de micro-inclusions dispersées dans du bitume (enrobés bitumineux) pourrait conduire à des réactions exothermiques avec une élévation de température.

La question débattue par les différents acteurs est *in fine* de savoir s'il peut y avoir (1) une auto-inflammation d'un colis bitume au sein d'un alvéole MAVL et (2) une propagation à l'ensemble de l'alvéole si cela devait arriver. L'exploitation de Cigéo étant séculaire et certains colis bitume étant déjà âgés de 50 ans, le facteur temps doit être pris en compte dans les évaluations. Il convient de noter qu'aucune inflammation les quelque 70 000 colis entreposés en France au cours des 50 dernières années n'a été rapportée.

Le corpus de connaissances du comportement des colis bitume vis-à-vis d'un apport d'énergie calorifique, acquis essentiellement par le CEA à partir de 2013 est incomplet. Les interprétations de ces données par les experts sont divergentes. S'agissant du traitement physico-chimique des bitumes, seuls quelques essais ont été réalisés il y a une dizaine d'années. Le corpus de connaissances établi par le CEA est restreint.

La Commission a demandé lors de son audition devant l'OPECST en novembre 2017 que soit conduite une expertise scientifique et internationale. L'OPECST en a fait la demande auprès de l'Etat le 25 janvier 2018. Le Comité de Haut Niveau (CHN) du projet Cigéo réuni le 7 mars 2018 a annoncé la création d'une *commission d'expertise internationale sur les colis bitumineux, sous la commande partagée de l'Etat et de l'ASN*. Cette commission d'expertise devrait être lancée dans l'année 2018.

*La Commission suivra avec intérêt le déroulement de cette expertise internationale et analysera avec la plus grande attention le corpus de documents remis à la commission d'expertise internationale.*

21

## 1.6 SÛRETÉ À LONG TERME DE CIGÉO

À très long terme, après que les colis de déchets auront été ruinés, la sûreté passive de Cigéo sera assurée par la capacité du Cox à freiner la migration des espèces radioactives ou toxiques. Cette migration se fait essentiellement par diffusion. La convection pourrait seulement intervenir dans le champ proche du stockage (EDZ) (Cf. Annexe VII).

L'Andra a présenté le socle de connaissances relatif aux valeurs de tous les paramètres pris en compte dans les modèles de migration. La Commission a eu l'occasion d'évaluer dans ses précédents rapports les études et la R&D qui ont été nécessaires.

L'Andra considère que toutes les valeurs des paramètres sont suffisamment bien étayées pour conduire ses analyses de sûreté. En effet l'enjeu des analyses de sûreté n'est pas de se fonder sur une description complète et exhaustive de l'évolution de Cigéo, mais de démontrer le non dépassement de seuils de radioprotection en estimant les valeurs maximales de flux de radionucléides aux limites du Cox et consécutivement de doses aux exutoires du stockage.

*La Commission considère que le socle de connaissances de l'Andra sur les paramètres contrôlant la migration des radionucléides à vie longue dans le Cox sain, principale et ultime barrière de confinement de la radioactivité, est suffisant pour estimer par modélisation la migration des radionucléides jusqu'aux limites du Cox.*

## 1.7 SURVEILLANCE DE CIGEO EN EXPLOITATION

Le terme de surveillance se réfère globalement au suivi d'une évolution afin de s'assurer d'une bonne compréhension et anticipation du comportement global de l'objet considéré, de détecter un écart, s'il en est, et d'en identifier les causes pour y remédier rapidement. La surveillance de Cigéo porte sur les composants ouvragés dont l'exploitation sera séculaire, mais également la formation géologique qui les abrite. En outre, la surveillance permet, dans le cadre des revues de réversibilité, de vérifier la capacité de l'exploitant à mettre en œuvre la récupérabilité des colis.

Le programme de surveillance de Cigéo sera décrit dans la DAC. Il démarrera avec la construction de Cigéo, se poursuivra lors de la phase d'exploitation et au-delà de la fermeture. Il devra pouvoir évoluer en fonction des retours d'expérience et des progrès technologiques. L'Andra devra veiller à ce que ce programme ne perturbe pas le fonctionnement en mode passif de Cigéo.

Ce programme s'appuiera sur l'expérience acquise par l'Andra depuis le début des années 2000 dans le laboratoire souterrain de Bure et sur des résultats issus de participations à des consortiums de recherche internationaux. Différents capteurs et dispositifs d'auscultation ont été placés dans le laboratoire souterrain pour collecter tout un ensemble de mesures.

Certains capteurs ont été directement mis en œuvre dans le laboratoire souterrain quand ils étaient disponibles sur le marché, d'autres ont nécessité des développements particuliers. Les dispositifs testés sont fonctionnels avec un très bon retour d'expérience sur la défaillance des capteurs. Des voies de progrès sont envisagées en matière de résolution, d'énergie, de transmission sans fil, de robotisation et enfin de digitalisation comme souligné dans la section suivante. Elles sont explorées au travers de projets européens, de projets Investissements d'Avenir et de groupements de laboratoires académiques et industriels.

22

Au laboratoire souterrain, le suivi des capteurs et l'enregistrement des données est assuré par un système de gestion des données scientifiques développé par l'Andra depuis plus de 20 ans. Les données acquises en continu sont géo-référencées et intégrées dans le Système d'Acquisition et de Gestion des Données (SAGD). Parallèlement, les données collectées manuellement comme des mesures sur échantillons sont géo-référencées et intégrées via une base appelée GEO. Ce système de gestion des données préfigure celui qui sera mis en place dans Cigéo.

*La Commission note la qualité des travaux menés par l'Andra depuis 20 ans en lien avec la surveillance du laboratoire souterrain. La Commission rappelle que la préservation pour les temps futurs des données collectées est essentielle.*

*Avec la consolidation du projet, la Commission souhaite que l'Andra présente sa stratégie de surveillance de Cigéo, les dispositifs de capteurs, les dispositions relatives à l'assurance qualité des mesures effectuées et leur intégration dans les processus décisionnels.*

## 1.8 LA MAQUETTE NUMERIQUE DE CIGÉO

L'Andra a la volonté d'élaborer dans les trois ans une maquette numérique dont les usages seront multiples. En phase de projet, elle permet de tester virtuellement le fonctionnement, et vérifier les relations entre les objets et la géométrie de l'ouvrage. Pendant la construction, elle permettra d'intégrer les phases de travaux et de fluidifier les relations entre les intervenants du chantier. Pendant l'exploitation, elle fournira une aide à la formation des opérateurs, un moyen de tester de nouvelles procédures ou de gérer des situations inhabituelles. La maquette de Cigéo sera liée au système de gestion des données mentionné plus haut dans le cadre de la

surveillance du stockage. La maquette sera donc amenée à évoluer tout au long de la vie du projet tout en assurant la traçabilité de ses modifications. La cohérence de la maquette avec l'objet est capitale pour le rôle qui lui est dévolu, pour autant le suivi de version doit également être préservé.

L'Andra a développé un prototype opérationnel sur les opérations de manutention dans les galeries MAVL. Ce démonstrateur permet de suivre, en immersion, l'arrivée de colis depuis les galeries, les opérations d'accostage, le transfert du colis dans la zone de manutention puis vers l'alvéole de stockage.

*La Commission considère que les éléments du démonstrateur de manutention virtuelle des colis sont performants et encourage vivement l'Andra à poursuivre la numérisation de l'ensemble des composants opérationnels de Cigéo qui devrait être achevé au moment du dépôt de la demande d'autorisation de création.*

## 1.9 COÛTS DE CIGÉO ET INGÉNIERIE FINANCIÈRE

Le coût objectif de référence de Cigéo a été fixé par un arrêté ministériel en janvier 2016, sur la période 2016-2156. Le chiffrage retenu est de 25 G€ (2011) alors que le chiffrage initial était voisin de 34 G€. L'Andra estime pouvoir atteindre ce coût objectif par un ensemble d'actions : opportunités techniques, réduction des coûts d'achats, voire des gains de plus long terme. Ce coût objectif de Cigéo est couvert par des provisions constituées par les producteurs.

Cette démarche de réduction des coûts est importante, car elle indique quelles pistes permettraient à l'Andra de se conformer au coût objectif fixé par l'Etat, tout en respectant les exigences de sûreté, de sécurité et de réversibilité. Dans la gestion des opportunités techniques, à contraintes de sécurité et réversibilité inchangées, l'organisation de la maîtrise d'ouvrage et la stratégie d'allotissement prévoient la recherche d'équilibres dans la définition des marchés et l'échelonnement temporel de leur réalisation.

23

### 1.9.1 Ingénierie contractuelle

Le schéma retenu s'appuie sur la procédure des marchés publics et une concertation entre l'Andra et les producteurs, sur la base du principe pollueur-payeur. Une attention particulière sera accordée à la capacité des entreprises locales à répondre aux appels d'offres pour ces marchés, seules ou avec le concours d'entreprises plus spécialisées.

Deux procédures différentes sont envisagées.

- 1) La procédure dite de « marché en conception-réalisation » implique un dialogue entre plusieurs proposant et le maître d'ouvrage, débouchant la plupart du temps sur un prix ferme de l'ouvrage à réaliser par le maître d'œuvre choisi. Cette procédure serait envisagée principalement pour les ouvrages de surface. Pour ces derniers, l'Andra et les producteurs bénéficient d'un retour d'expérience garantissant la qualité de l'ouvrage à réaliser.
- 2) La procédure d'appel à candidatures, consiste à choisir tout d'abord un maître d'œuvre, puis à effectuer un allotissement pour réaliser l'ouvrage. Dans ce cas, le prix de l'ouvrage à réaliser est prévisionnel lors du choix de la maîtrise d'œuvre, car il dépend des marchés à passer pour chaque lot. L'Andra indique vouloir plutôt choisir cette procédure pour les ouvrages souterrains, en raison du risque financier plus important lié à leur réalisation.

*La Commission note que les choix d'ingénierie contractuelle n'optimisent pas la gestion du portefeuille de risques financiers. Ceux-ci sont, de façon presque unilatérale, assumés par l'Andra.*

### 1.9.2 Provisions des producteurs de déchets

Orano assure la couverture des dépenses affectées au périmètre Cigéo, la source de cette couverture n'a pas fait l'objet d'une présentation à la Commission. Le CEA présente un calendrier de provisions qui couvrent les apports dus, suivant une approche enveloppe (constitution d'une enveloppe additionnelle pour les aléas et une créance de l'Etat).

EdF a recours aux marchés financiers pour assurer des provisions basées sur le calcul de dépenses actuelles et engagées pour les actifs dédiés<sup>1</sup>. La gestion des actifs (portefeuille essentiellement constitué à parts égales d'actions, d'obligations et d'actifs non cotés) permet une couverture des charges à venir de 108,5 %. La réglementation en vigueur impose un taux de couverture de 110 %. En conséquence, EdF va augmenter ses provisions.

Pour EdF, le taux d'actualisation des charges à venir (4,1 % en 2017) est nettement inférieur au taux de performance des actifs dédiés (6,6 % en 2017). Le taux d'actualisation calculé suivant une méthode propre à l'entreprise et validée par ses commissaires aux comptes est encadré par le taux plafond fixé par l'administration (4,16 % en 2017). En moyenne, depuis 2004, EdF constate que le taux de performance de ses actifs dédiés (6,3 %) est nettement supérieur à celui de réactualisation de ses charges à venir (4,8 %). Toutefois, la baisse tendancielle du taux d'actualisation (4,2 % en 2016, 4,1 % en 2017) va mécaniquement augmenter le poids des dépenses futures et donc l'endettement d'EdF. Ceci entraîne corrélativement une augmentation des provisions dans l'objectif de garder une couverture suffisante. En effet, l'écart de 2,5 % constaté en 2017 entre les taux de performance et d'actualisation ne permet de couvrir que la moitié de l'augmentation des provisions due à une baisse de 0,1 % du taux de réactualisation.

24

*La Commission constate que la gestion globale des actifs dédiés assure une rentabilité nettement supérieure au taux d'actualisation. Cette constatation montre, a posteriori, le caractère prudent du choix du taux d'actualisation.*

*Par ailleurs, pour satisfaire les obligations réglementaires, EdF augmentera ses provisions du fait de la baisse du taux de réactualisation.*

*Enfin, la Commission demande qu'Orano lui présente la composition de ses provisions.*

Il convient toutefois de souligner que de fortes incertitudes existent sur le coût de Cigéo ce qui pourrait changer le montant des provisions dédiées à sa réalisation.

*A l'occasion de la mise à jour du chiffrage que l'Andra prépare actuellement, la Commission demande que l'Andra explicite l'impact des incertitudes et des aléas de réalisation sur les coûts.*

---

<sup>1</sup> Gestion des combustibles usés, gestion à long terme des déchets radioactifs, reprise et conditionnement des déchets anciens, déconstruction du parc en exploitation, déconstruction des centrales de première génération et derniers cœurs.

## 1.10 DE LA NÉCESSITÉ DE DÉCIDER

Quelle que soit la stratégie pour la filière électronucléaire, la France a d'ores et déjà 48 000 m<sup>3</sup> de déchets MAVL et HAVL actuellement en entreposage chez les producteurs et destinés, selon la loi de 2006, au stockage géologique. Ceux-ci représentent plus de la moitié du stock de déchets estimé à terminaison du parc actuel.

### 1.10.1 Entreposage ou stockage ?

L'industrie nucléaire génère des déchets de moyenne activité et de haute activité à vie longue. Ces déchets sont dangereux pour le public en cas d'exposition aux rayonnements radioactifs. Ils cessent de l'être s'ils sont isolés de manière efficace. Il existe deux solutions pour cela : une solution de court terme, qui est l'entreposage, et une solution de long terme, qui est le stockage géologique.

L'entreposage est une solution efficace, dans la mesure où, de fait, les déchets y sont mis à l'écart d'une interaction avec la population dans le cadre d'une surveillance active permanente. Toutefois, ce ne peut être qu'une solution de court terme : il faut en effet être capable d'assurer et de garantir cette surveillance pendant la période où ces déchets resteront dangereux. Celle-ci s'évalue en dizaine de milliers d'années pour beaucoup d'entre eux. Des reconditionnements réguliers des colis seraient également inévitables, avec une contrainte de coût, mais aussi de maintien d'une technicité notamment dans la manutention de matériaux fortement radioactifs. Ce temps long implique inévitablement des risques, puisque rien ne garantit, pour cet avenir nécessairement inconnu et sans doute instable, que la surveillance se fera de manière appropriée et efficace. Enfin, comme il paraît invraisemblable d'envisager qu'un tel entreposage se fasse de manière continue sur une période si longue, il faudrait nécessairement qu'il débouche sur une autre solution. Or aucun élément ne nous permet d'envisager raisonnablement qu'une nouvelle solution technique puisse contribuer à réduire la nocivité des déchets dans un avenir prévisible et régler le problème.

Par contraste, le stockage en profondeur offre une solution permettant d'isoler ces déchets à vie longue par le biais d'une sécurité passive permise par l'enfouissement en profondeur dans une couche d'argile. Cette solution présente l'avantage considérable de régler le problème en choisissant un site bénéficiant d'une stabilité géologique sur des temps très longs. Elle supprime l'aléa sur la surveillance future et permet de garantir la sûreté, assurée non par des moyens humains incertains mais par l'épaisseur de la couche géologique naturelle.

Elle permet aussi de ne pas imposer aux générations futures le fardeau d'une surveillance active extrêmement longue de ces déchets. Les coûts d'une telle surveillance sur une période très longue seraient imputés, par les bénéficiaires actuels de la production d'électricité, à un grand nombre de générations futures qui, de notre fait, devraient recevoir en héritage une telle charge. Par ailleurs, sur le long terme, le stockage est nécessairement moins coûteux que l'entreposage. Certes, la construction de l'ouvrage est, sur la période prévue, plus onéreuse que l'entreposage correspondant sur la même période. Mais ce qu'il faudrait comparer est le coût d'entreposages successifs sur une très longue période au coût limité de la construction du stockage sur cent à cent cinquante ans. Ce calcul ne peut pas être fait avec précision, mais le caractère incommensurable des durées montre bien que l'entreposage serait nécessairement plus onéreux.

### 1.10.2 Le risque de différer la décision

Compte tenu du fait que les études ont bien avancé pour garantir la faisabilité du projet, et compte tenu du fait que le cadre réglementaire permet de passer maintenant au dépôt d'une DAC, la société française est confrontée à ce qui ressemble à un dilemme qui débouche sur un risque important, celui de différer perpétuellement la décision de construire le stockage géologique.

- D'un côté, le stockage représente, s'il est bien conçu et bien réalisé dans le cadre d'un principe de réversibilité, une solution pérenne, sûre, éthique, complète et économique.

- D'un autre côté, l'entreposage existant est de fait une solution efficace et satisfaisante à court terme. Il n'y a aucun danger dans l'immédiat à poursuivre l'entreposage.

Un raisonnement tend alors à advenir spontanément : il n'y a aucune urgence à lancer la construction de l'ouvrage de stockage puisque, au regard de la persistance de la dangerosité des déchets, quelques années de plus ou de moins ne font pas de différence. Il paraît alors tentant d'attendre et de différer la décision. On peut toujours demander des études supplémentaires et considérer que, au regard des milliers d'années nécessaires pour la décroissance radioactive des déchets, le dossier n'a pas atteint un degré de maturité suffisant. Mais dans la mesure où des incertitudes sont inévitablement et structurellement liées à la construction d'un tel ouvrage, le risque est que l'on considère que l'on n'est jamais prêt. En réalité, on ne pourra être prêt que si l'on commence l'ouvrage et que, dans le cadre du principe de réversibilité, on s'efforcera de lever les incertitudes grâce à un retour d'expérience.

### 1.10.3 Le cadre institutionnel de la prise de décision

Le cadre général de la situation institutionnelle française, marquée par une défiance de la population à l'égard des institutions favorise la tentation d'un tel report *sine die*.

- Les producteurs, qui sont contraints par la loi à garder des provisions pour le financement du stockage, n'ont pas d'intérêt à court terme à s'engager dans celui-ci qui, d'un point de vue financier, peut être différé (voir § 1.9). Par contraste, dans la situation finlandaise et suédoise, le processus de décision y a beaucoup avancé car la loi avait fourni une incitation aux producteurs à aller vers un tel stockage, sans lequel ils ne pouvaient pas ouvrir de nouveaux réacteurs.
- Du point de vue des autorités de sûreté, le souci légitime de protection des populations naturellement inquiètes les conduit à attendre une démarche de sûreté convaincante avant d'autoriser la mise en service de l'ouvrage. Lors de la demande d'autorisation de création le dossier en support doit avoir un niveau de détail permettant la raisonnable assurance que cette démonstration de sûreté nucléaire sera confirmée. Le qualificatif de raisonnable peut conduire à des approches très différentes selon les pays et les cultures pour aboutir au même résultat final.
- Du côté de l'opérateur, soumis aux avis des autorités de surveillance et dépendant de la puissance publique, il a à répondre légitimement aux demandes renouvelées qui lui sont faites en termes de démonstrations de sûreté et d'attentes de résultats de débats publics.
- Dans les pays du Nord, l'Etat a comme interlocuteur politique unique des communes familiarisées avec le nucléaire, qui ont de larges compétences administratives, et qui ont pris la responsabilité d'accepter de recevoir le stockage, en prenant en compte les retombées économiques. En France, par contraste, les communes et les instances locales n'ont pas de compétences administratives pour, si elles le souhaitent, appuyer et favoriser le processus de décision et c'est donc l'Etat qui porte seul la décision.

Il y a donc un risque réel d'enlèvement dû à cette tentation de différer indéfiniment la décision, sur la base de l'idée qu'il n'y a pas d'urgence puisque nous disposons de la solution efficace de l'entreposage. Mais ce risque d'enlèvement réel pourrait conduire à l'abandon progressif et insensible du projet et donc au choix hautement contestable de pérenniser une solution de court terme au détriment d'une solution de long terme, favorisant ainsi les générations présentes au détriment des générations futures.

*La Commission recommande instamment que les pouvoirs publics mobilisent l'ensemble des parties prenantes pour que la DAC soit déposée dans les temps. Elle considère que le socle de connaissances acquis par l'Andra est suffisant pour cela. Le processus décisionnel ne doit pas être ralenti, de sorte que ce soit bien notre génération qui assume la responsabilité des déchets qu'elle a produits.*

## CHAPITRE II : SÉPARATION ET TRANSMUTATION

### 2.1 GESTION DES MATIÈRES ET DES DÉCHETS

La loi de 2006 dispose que les recherches sur la transmutation doivent être menées dans le cadre de celles sur les réacteurs de Génération IV. C'est pourquoi le CEA associé aux industriels a lancé le programme Astrid visant à concevoir et réaliser un démonstrateur industriel de réacteur à neutrons rapides (RNR) de 600 MWe se démarquant des projets antérieurs par un niveau de sûreté accrue grâce à de nombreuses innovations.

*La Commission a suivi le développement de ce projet conforme au sens de la loi et a favorablement apprécié le travail effectué dans le cadre de l'avant-projet détaillé.*

Tenant compte du faible coût de l'uranium, du déploiement, envisagé par EdF, d'une flotte d'EPR dont la durée de vie programmée est de 60 ans et devant la remise en cause par ses tutelles du niveau de puissance du RNR Astrid 600 MWe, le CEA envisage maintenant un programme de recherche fondé sur la mise en œuvre d'un RNR de plus faible puissance. Ce nouveau réacteur bénéficierait de tous les acquis actuels du programme Astrid et alimenterait un programme de simulation.

La Commission examine ci-dessous les acquis du programme Astrid, l'esquisse du nouveau programme envisagé par le CEA et les études menées par le CEA et les industriels pour répondre à la demande du PNGMDR d'analyser divers scénarios de gestion des matières nucléaires et du plutonium (Annexes XIV et XV).

27

### 2.2 ASTRID

Suite à la loi de 2006, pour répondre à la demande du Gouvernement, le CEA a lancé le programme Astrid en 2010. Le CEA possède avec les réacteurs Rapsodie, Phénix et Superphénix, une très grande expertise des RNR. Dans ses rapports précédents la Commission a souligné l'apport potentiel des RNR pour la gestion des matières et des déchets du cycle du combustible. Elle tire ici un bilan des principaux résultats acquis depuis huit ans.

Pour la mise au point d'un démonstrateur industriel et technologique, les études conjointes du CEA, d'EdF et d'Orano ont très rapidement convergé vers la conception d'un RNR Na de 600 MWe et des installations associées. Le cahier des charges prévoit que ce réacteur doit satisfaire à une série de critères :

- Posséder la sûreté et l'opérabilité d'un réacteur industriel et commercial qui seraient supérieures à celles de l'EPR. Ce réacteur prévu pour une durée de vie de 60 ans, serait iso-générateur en plutonium.
- Permettre le multi-recyclage du plutonium en utilisant un combustible associant l'uranium appauvri (ou l'uranium de retraitement) au plutonium issu du retraitement des UOx et des MOx usés. Cela implique l'adaptation des procédés de séparation de l'uranium et du plutonium pour le traitement des combustibles MOx REP usés ainsi que la mise au point d'un atelier de fabrication d'un combustible MOx RNR riche en plutonium.
- Permettre la transmutation des actinides mineurs, en particulier de l'américium et du neptunium. Cela implique la séparation de ces éléments, à l'échelle industrielle, à partir du combustible usé et la fabrication de combustibles chargés en américium ou neptunium pour irradiation en périphérie du cœur.
- Démontrer la capacité de consommation accrue du plutonium afin d'éliminer le plutonium engagé dans le cycle.

## 2.2.1 Conception du réacteur

Fin 2017 un rapport d'étape concernant la conception du RNR Na Astrid 600 MWe a été remis aux tutelles. Pour la fin de l'APD prévue en 2019, le CEA fournira les études de définition comprenant un dossier complet avec les plans pour la construction. C'est à cette échéance que se termine le financement du contrat CEA-Etat dans lequel Astrid 600 MWe est inscrit.

Les études réalisées ont permis, fin 2017, de définir les composantes majeures d'Astrid avec notamment le cœur, les dispositifs de manutention et de stockage du combustible, les systèmes (actifs et passifs) d'évacuation de la puissance résiduelle, le système de conversion d'énergie (SCE) ainsi que l'implantation sur le site avec le génie civil et les infrastructures associées. Grâce aux études et expérimentations réalisées en 2016-2017, la maturité du SCE gaz a été augmentée et peut permettre un choix étayé entre SCE vapeur d'eau et SCE gaz.

Le remontage d'ensemble d'Astrid en configuration SCE Gaz ou SCE vapeur d'eau est à présent disponible grâce à une maquette numérique 3D de l'ensemble du réacteur et des installations annexes. La numérisation est en cours d'extension vers la gestion complète du projet.

*La Commission considère que le concept du réacteur Astrid représente un progrès très significatif au regard des autres RNR existants ou en projet dans le monde.*

## 2.2.2 Les installations du cycle

Des innovations significatives concernant la fabrication des assemblages, qui mettent en jeu de nombreux matériaux tels que  $UPuO_2$ ,  $B_4C$ ,  $MgO$  et des aciers de plusieurs nuances, ont été obtenues. Enfin le CEA a engagé la reconstruction du tissu industriel pour la fabrication des tubes hexagonaux et des autres parties de l'assemblage MOx RNR.

Les études sur les installations pour le cycle des matières d'Astrid se poursuivent afin de préciser leur implantation et leur configuration.

Quant aux installations utilisées aujourd'hui pour l'étude de la transmutation de l'américium (Atalante) elles ne permettent que la manipulation de quelques grammes d'américium (échelle de l'aiguille) et de nouvelles installations spécifiques seront nécessaires pour la mise en œuvre industrielle d'un procédé.

## 2.2.3 Consommation accrue de plutonium

Le CEA poursuit également l'étude de la consommation accrue de plutonium à partir du cœur d'Astrid avec plusieurs approches : un combustible sans uranium, un assemblage spécifique (aiguilles inertes, modératrices ou absorbantes de neutrons) tout en conservant un faible effet de vidange, l'effet Doppler et la fraction de neutrons retardés assurant le pilotage.

## 2.2.4 Séparation et Transmutation

### a) Séparation

Afin de permettre l'étude des évolutions nécessaires au passage à un parc comprenant des RNR tout en préservant le fonctionnement des usines actuelles de retraitement et de fabrication du combustible, le CEA poursuit la R&D de la séparation poussée de l'uranium, du plutonium et des produits de fission. Depuis 2016, le CEA revisite toutes les opérations liées à cette séparation pour laquelle il a acquis une expertise unique dans le monde :

- désassemblage des aiguilles,
- séparation oxyde-gaine (découpe laser, voloxydation),

- dissolution des oxydes (en continu),
- séparation U/Pu en un seul cycle sans réducteur (monoamides dissymétriques),
- synthèse d'oxyde mixte (syn-cristallisation U(VI) et plutonium(IV), co-dénitration), fabrication des pastilles (granulation, pâte),
- conditionnement en ligne des déchets (fusion décontaminante des coques, incorporation des fines, nouveaux verres),
- contrôles en continu.

Devant la complexité du procédé Exam de séparation de l'américium en vue de sa transmutation, le CEA participe, depuis début 2017, au programme Geniors (GenIV Integrated Oxide fuels Reprocessing Strategies - 24 partenaires de 11 pays) avec l'ambition de simplifier les procédés Euro-Ganex, I-Sanex et Euro-Exam, tous fondés sur les procédés du CEA.

## **b) Transmutation**

Le CEA a acquis une bonne maîtrise de la préparation d'aiguilles constituées d'oxyde mixte d'uranium et d'américium (UAmO<sub>2</sub>) ou d'uranium-américium métalliques (UAm).

Les irradiations du programme Diamino ont été réalisées dans les réacteurs HFR et Osiris et les examens post-irradiations sont réalisés ou en cours. D'autres programmes (Marios, Marine et américiumBB-1) prévoient de nouvelles irradiations pour lesquelles le CEA envisage que les examens soient réalisés dans le cadre de collaborations internationales.

Le CEA poursuit ainsi l'étude de la transmutation de l'américium qui une fois éliminé des déchets vitrifiés, en diminuerait sensiblement la contribution thermique.

*La Commission souligne l'importance stratégique des études et recherches sur la séparation et la transmutation. Celles-ci sont indispensables pour une gestion maîtrisée des matières et des déchets du cycle électronucléaire ; la transmutation permettrait notamment de minimiser les quantités d'actinides à stocker. Dans ce sens, la Commission souhaite que le CEA maintienne et développe une expertise et une compétence en physique et chimie des actinides.*

## **2.3 PROPOSITION D'ÉVOLUTION DU PROJET ASTRID**

La nécessité de disposer d'un prototype industriel de RNR étant devenue moins urgente pour développer un parc de RNR, le CEA envisage aujourd'hui un projet de RNR adapté à la recherche. Ce projet, dédié à la transmission et au développement de l'expertise française sur les RNR de quatrième génération, utiliserait largement la simulation, domaine d'excellence du CEA.

Ce RNR de recherche devrait, comme Astrid, être en mesure :

- de fonctionner avec un combustible alliant l'uranium appauvri (250 000 tonnes issues du procédé d'enrichissement sont disponibles) et le plutonium (issu du traitement des UOx et MOx usés) ;
- de poursuivre les études sur la transmutation des actinides mineurs ;
- de recycler son propre plutonium ;
- d'étudier les modalités d'une consommation accrue de plutonium.

Le CEA devrait préparer en 2018 un dossier de présentation du programme « Simulation RNR Na » qui préciserait notamment la puissance du réacteur, les outils de simulation et les plateformes expérimentales.

Cette phase préparatoire permettrait aussi de redéfinir les partenariats nationaux et internationaux en commençant par la relation privilégiée avec le Japon établie dans le cadre du programme Astrid.

Ce réacteur serait conçu non comme un démonstrateur industriel mais comme un outil de recherche dédié aux expériences concernant la physique des RNR-Na, les composants et les matériaux de structure, les dispositifs de conversion d'énergie ainsi que les combustibles adaptés aux modes de fonctionnement iso-, sur- ou sous-générateur. Sa conception bénéficierait de toutes les études et des avancées obtenues pour Astrid car elles sont compatibles avec cette réduction de puissance.

L'idée avancée par le CEA retient les éléments essentiels de la loi de 2006 que sont la transmutation des actinides mineurs et la consommation de plutonium en vue de la fermeture du cycle.

*La Commission déplore qu'une stratégie globale et cohérente à moyen-long terme pour la filière électronucléaire ne soit toujours pas clairement définie pour les RNR. Les incertitudes qui en résultent ont des conséquences graves sur la programmation nécessairement pluriannuelle des recherches à mener pour donner à la France les moyens de ses ambitions. Ceux-ci doivent être mobilisés dès à présent pour éviter de mettre en péril un savoir-faire reconnu internationalement.*

## 2.4 SCÉNARIOS ET VALORISATION DU PLUTONIUM

### 2.4.1 Scénarios de déploiement d'un parc de RNR et conséquences

Le CEA, Orano et EdF étudient depuis 2013 des scénarios industriels d'évolutions possibles du parc électronucléaire. L'approche consiste à développer des logiciels pour établir les bilans matières des cycles pour estimer la nature et les quantités de déchets correspondants. Les résultats des calculs indiquent les modifications d'installations du cycle qui seraient nécessaires ; ils sont confrontés aux réalités industrielles et économiques (Cf. Annexe XIV).

### 2.4.2 Multirecyclage du plutonium en REP

En absence de RNR et à la demande du PNGMDR le CEA, Orano et EdF ont repris les études d'un multi-recyclage uranium et plutonium en REP, avec des assemblages Corail et Mix (Cf. Annexe XV). Alors qu'EdF avait démontré que le multirecyclage en REP du plutonium était impossible pour des taux de combustion voisins de 70 GWj/t, un taux de combustion limité à 45-50 GWj/t rend possible ce multirecyclage. La consommation d'uranium naturel est alors réduite (environ 10 %) par rapport à celle du parc actuel mais la production d'américium et des autres actinides mineurs est significativement augmentée (environ 30 %). Cette augmentation du volume de déchets nécessiterait une augmentation de l'emprise de la zone HA dans le stockage géologique. S'agissant du plutonium ce multi-recyclage stabilise son stock mais n'accroît pas sa consommation.

*La Commission note que le multi-recyclage du plutonium en REP ne permet qu'une diminution limitée de consommation d'uranium naturel au prix d'un accroissement notable de la production d'actinides mineurs. Par ailleurs comparée à celle d'une filière RNR, cette gestion des matières n'intègre pas les objectifs de la loi de 2006 : transmutation des actinides mineurs et consommation accrue de plutonium.*

## CHAPITRE III : GESTION DES DÉCHETS

La gestion des déchets radioactifs est encadrée par le PNGMDR et les arrêtés du décret 2017-23 du 23 février 2017. Elle présente de multiples facettes. La Commission évalue dans ce chapitre les avancées dans quelques domaines en mettant l'accent sur les déchets de démantèlement. Elle développe ces points dans les Annexes XVI et XVII.

### 3.1 DÉCHETS DE TRES FAIBLE A TRES TRES FAIBLE ACTIVITÉ

En 2016 la Commission avait souligné le manque d'exutoires prévisibles pour ces déchets et par conséquent la nécessité d'une nouvelle approche pour leur gestion afin de tenir compte des volumes très importants à venir. Ils seront générés par les opérations de démantèlement des installations du parc électronucléaire et des installations nucléaires historiques déjà mises à l'arrêt (voire déjà démantelées). Par ailleurs l'implantation géographique des réacteurs et installations sur le territoire national va donner lieu à des productions disséminées.

Une réflexion est en cours qui associe l'Andra et les producteurs de déchets pour mettre en place de nouvelles gestions des déchets de très faible activité (TFA) et de très très faible activité (TTFA). L'IRSN étudie aussi ces évolutions sur le plan scientifique et technique mais également sociétal.

Plusieurs points importants motivent ces différentes réflexions :

- la création de centres de stockage dédiés pour anticiper la saturation du centre de stockage des TFA, le Cires situé à Morvilliers, à l'horizon 2030 ;
- l'évaluation technique et économique du recyclage des TFA métalliques et des gravats issus des bétons ;
- les conditions de création d'un seuil de libération pour des déchets TTFA.

Le recyclage des TFA nécessite que la législation française évolue sur le problème d'un seuil de libération ; ce seuil serait évidemment lié à l'absence d'impact sanitaire des déchets ainsi libérés. L'introduction d'un seuil de libération doit, bien entendu, être accompagné de mesures de contrôle.

Une étude récente de l'Andra montre qu'en moyenne 70 % des TFA (notamment métalliques et des gravats) stockés depuis 2003 au Cires ont une activité spécifique inférieure aux déclarations des producteurs et inférieure à 1 Bq/g. L'activité des autres TFA n'est jamais supérieure aux déclarations des producteurs qui sont donc, dans tous les cas, conservatives. Dans les pays où il existe un seuil de libération (voir Chapitre IV) ces déchets auraient été déclassés pour être recyclés ou rejoindre un stockage conventionnel. Cette démarche appliquée en France aurait reculé de plusieurs décennies la date de saturation du Cires.

Les études sur la valorisation des TFA se poursuivent. EdF a acquis récemment Cyclife (voir Chapitre IV et Annexe XXI). Cette entreprise située à Studsvik en Suède a une expertise de 30 ans dans le domaine du recyclage des métaux activés, voire contaminés. EdF a acquis Cyclife pour gagner en expérience dans le domaine du recyclage des métaux. En effet EdF souhaite valoriser de grands lots homogènes de matériaux métalliques (80 000 t de générateurs de vapeur). EdF va prochainement procéder à une expérience en recyclant dans Cyclife deux générateurs de vapeur venus de France.

Les TFA, contrairement aux autres déchets, ne sont pas inscrits dans un plan industriel de gestion des déchets (PIGD) qui gère, en concertation entre les producteurs et l'Andra les flux à venir. Un tel plan apparaît indispensable. A cet égard l'ASN souhaite la mise en place d'un schéma industriel global de gestion des TFA d'ici 2020.

*La Commission constate que les études en cours n'ont conduit, pour le moment, vers aucune solution innovante capable de faire évoluer les méthodes de gestion des TFA.*

*La Commission rappelle que la politique de gestion des TFA doit reposer sur des études caractérisant leur nocivité et répondre ainsi aux attentes sociétales. Elle demande que lui soit présenté l'état de l'art sur ces questions.*

### 3.2 DÉCHETS TENORM

Les modalités de stockage des Tenorm (Cf. Chapitre IV et Annexe XVI), issus de l'industrie non-nucléaires et gérés par la direction générale de la prévention des risques (DGPR), seront modifiées à partir de juillet 2018. Le décret est imminent. Tout Tenorm dont l'activité en uranium (U), thorium (Th) ou potassium (<sup>40</sup>K) est supérieure à 20 Bq/g sera stocké au Cires comme les TFA provenant des INB. Seuls les Tenorm de très faible activité (inférieure à 1 Bq/g en U ou Th et 10 Bq/g en K) pourront rejoindre un stockage conventionnel autorisé ou être valorisés. Il appartiendra aux exploitants, qui produisent des Tenorm de les caractériser selon la réglementation à venir. Selon leur type, ils seront dirigés vers un recyclage, vers un stockage conventionnel ou un stockage de déchets radioactifs.

*La Commission s'interroge sur les protocoles qui permettront la caractérisation de la radioactivité naturelle à des niveaux voisins du Bq/g pour les déchets industriels. Elle demande que lui soit présenté l'état de l'art sur cette question.*

### 3.3 DÉCHETS FAVL

Concernant les déchets à faible activité à vie longue (FAVL) l'Andra poursuit la caractérisation du site de Vendevre-Soulaines. Elle évalue les capacités du site à accueillir, isoler, puis confiner les radionucléides selon les deux concepts de stockage à faible profondeur. Le DOS d'un avant-projet de stockage des FAVL doit être fourni à l'ASN pour 2021.

Le stockage des déchets FAVL est un problème important et complexe sur lequel la Commission attire l'attention des producteurs et des pouvoirs publics depuis de nombreuses années. L'absence de stockage conduit notamment à prolonger les entreposages ou à différer les démantèlements. Il impacte l'inventaire de réserve de Cigéo. La nature variée des déchets regroupés sous l'appellation FAVL rend difficile la conception d'un stockage unique.

*La Commission rappelle que le démantèlement produira des quantités significatives de FAVL qui s'ajouteront à ceux issus des procédés mis en œuvre dans le cycle du combustible. A ce jour, il n'existe toujours pas d'exutoire pour ces déchets. La Commission recommande que les producteurs et l'Andra se concertent de façon approfondie pour proposer à l'ASN des stratégies de gestion des FAVL prenant en compte les spécificités des déchets.*

## 3.4 GESTION DES DÉCHETS

### 3.4.1 Entreposage

Les colis de déchets provenant du parc électronucléaire et des installations du cycle rejoignent les sites de stockage de déchets FMAVC et TFA ou vont, selon leur nature, en entreposage en attente : de la décroissance de leur activité (déchets tritiés), de leur puissance thermique (déchets HAVL) ou encore de la mise en service d'un stockage géologique (FAVL, MAVL et HAVL).

Tous les entreposages industriels bénéficient d'un bon retour d'expérience tant au plan de leurs performances que de leur exploitation. Leur modularité de construction apporte de la souplesse dans la gestion des déchets destinés à Cigéo ou à d'autres stockages (Cf. Annexe XVII). Toutefois le prolongement de l'entreposage des colis de déchets au-delà des nécessités techniques de leur acceptation en stockage n'est pas une solution responsable de gestion. Elle oblige à assurer une sûreté active en mobilisant des moyens qui ont un coût économique qu'il conviendrait de chiffrer. Elle contribue à l'immobilisme.

*La Commission considère que seul le stockage autorisé est apte à apporter une solution sûre et également éthique au problème*

*Bien que les capacités d'entreposage actuelles ou planifiées soient suffisantes pour faire face à un décalage de mise en service des stockages appropriés jusque vers 2040, la Commission souligne que la prolongation des entreposages ne doit pas être une stratégie pour reporter la mise en œuvre des stockages.*

33

### 3.4.2 Assainissement & démantèlement

La Commission a abordé ce vaste sujet dans ses précédents rapports et le détail des derniers résultats de la R&D est donné dans l'Annexe XVII.

Celles conduites par EdF portent essentiellement sur plusieurs réacteurs (Chooz, Brennilis, UNGG, ...) tandis que celles d'Orano et du CEA concernent plutôt les installations du cycle du combustible nucléaire, UP2 400, GB1 pour Orano et UP1 pour le CEA. Aux déchets issus de la déconstruction s'ajoutent des déchets entreposés, accumulés au cours de l'exploitation des installations, dont la reprise est souvent très contraignante.

Le CEA a en charge le démantèlement des réacteurs G1 G2 et G3 de Marcoule qui sont au niveau AIEA-2 (Cf. Annexe XVII) depuis des décennies. Les actions en cours permettent de développer des méthodes de caractérisation et d'analyse de l'activité du graphite qui pourront être appliquées au démantèlement de tous les réacteurs UNGG. Par ailleurs, le CEA poursuit la R&D sur les déchets magnésiens, déchets difficiles à gérer en raison de leur réactivité avec l'eau. La matrice retenue répond aux critères rhéologiques de coulée et de résistance mécanique qui sont recherchés pour une mise en œuvre à l'échelle industrielle. Les premiers essais de cette matrice à échelle 1 ont été réalisés.

Orano poursuit ses recherches sur la reprise et le conditionnement des déchets, entreposés dans plusieurs silos à la Hague (Cf. Annexe XVII).

EdF est engagé depuis une dizaine d'années dans le démantèlement des 6 réacteurs électronucléaires UNGG-EdF (Cf. Annexe XVII). La stratégie d'EdF a été de commencer par le démantèlement de Chinon A2 comme tête de série et de mettre en configuration sécurisée les 5 autres réacteurs. Actuellement Chinon A2 est quasiment au niveau AIEA-2. La partie la plus difficile du démantèlement d'un réacteur UNGG est celle du caisson (cœur du réacteur enfermé

dans une sphère métallique). Le démantèlement du caisson de Chinon A2 (2030-2055), sous air, sera précédé par la construction d'un démonstrateur industriel pour tester les outillages et acquérir un retour d'expérience. Ce démonstrateur comprendra des maquettes à l'échelle 1 de parties représentatives du caisson, des simulateurs physiques permettant de tester les outils robotisés et des plateformes de simulation numérique. EdF prévoit environ 25 ans pour démanteler un caisson UNGG, dont celui de Chinon A2. Le démantèlement des 5 caissons des autres réacteurs est programmé pour après 2060.

L'évacuation des empilements de graphite de Chinon A2 est prévue vers le CSA en 2045. Cette solution est possible en raison d'une meilleure évaluation de l'activité en  $^{36}\text{Cl}$  des empilements graphite. EdF va construire vers 2023 une installation d'entreposage sur le site de Saint-Laurent pour accueillir les chemises graphites actuellement entreposées dans des silos. Cela permettra leur retrait à partir de 2028. L'évacuation des empilements graphite des 5 autres caissons et des chemises graphite de Saint-Laurent A vers un stockage FAVL est prévue au-delà de 2070.

EdF prépare la mise à l'arrêt définitif de l'AMI (Atelier d'examen des Matériaux Irradiés, site de Chinon). Le planning est d'environ 10 ans

Pour toutes les opérations de démantèlement les opérateurs développent une R&D stratégique et technologique très importante associée à la recherche d'optima économiques tout en respectant les contraintes de sûreté du nucléaire.

Le démantèlement fait l'objet du projet européen INSIDER ([insider-h2020.eu](http://insider-h2020.eu)) lancé en juin 2017 pour une durée de 4 ans (18 partenaires européens). Il a pour objectif de proposer une méthodologie de caractérisation des matériaux de démantèlement, d'évaluation des performances des méthodes de mesure et d'évaluation des coûts financiers et impacts radiologiques.

34 *La Commission note que les projets de démantèlement engagent les industriels sur de très longues périodes de temps, avec le risque d'une dérive des plannings. Elle souhaite que les échéanciers prévus soient respectés.*

### 3.5 STRATÉGIE DE DÉMANTÈLEMENT

Les déchets MAVL et FAVL qui seront issus du démantèlement des réacteurs et des installations du cycle sont pris en compte dans la gestion actuelle de ces déchets. Les TFA à venir après saturation du Cires seront gérés selon de nouvelles dispositions.

De nombreuses installations ont déjà été démantelées par le CEA, Orano et EdF depuis quelques décennies. Plus de trente INB et INBS sont en cours d'assainissement et de démantèlement avec ou sans reprise et conditionnement des déchets. Ces opérations s'étendront probablement jusqu'à la fin du siècle.

Les acteurs français du démantèlement possèdent une expertise de premier plan reconnue internationalement. Pour l'instant chaque industriel acquiert cette expertise dans le cadre du démantèlement de ses installations nucléaires selon sa stratégie. Il existe toutefois des actions communes ne serait-ce que dans les méthodes de caractérisation des sites et des installations, l'utilisation d'outils robotisés et de moyens d'archivage numériques des données.

*Au moment où le démantèlement des installations nucléaires devient une activité internationale, la Commission encourage la mise en place d'une stratégie industrielle et d'une école du démantèlement au sein de la Plateforme France Nucléaire afin de mieux valoriser ce savoir-faire.*

## CHAPITRE IV : PANORAMA INTERNATIONAL

### 4.1 EXCLUSION, EXEMPTION, LIBÉRATION, NORM, TENORM – APPROCHE INTERNATIONALE.

#### 4.1.1 Introduction

Le démantèlement d'installations nucléaires, le stockage de stériles miniers ou le contrôle de denrées alimentaires suite à la catastrophe de Fukushima ont généré un intérêt croissant pour les problématiques associées à la libération de matières très faiblement radioactives considérées comme déchets, aux matières premières naturellement radioactives (Norm), aux matières à radioactivité naturelle renforcée par un procédé industriel (Tenorm), ou à la libération de locaux ou sites après assainissement et décontamination.

Les concepts et les réglementations qui régissent les différentes problématiques prêtent parfois à confusion. Les paragraphes qui suivent donnent un aperçu des grandes approches internationales.

Rappelons d'abord que toute matière qui nous constitue ou nous entoure présente une radioactivité naturelle et que les rayons cosmiques qui bombardent la terre produisent en permanence de nouveaux noyaux radioactifs qui entrent dans les cycles biogéochimiques. Ces sources radioactives naturelles nous exposent annuellement à une dose efficace de quelques milliSieverts par an (mSv/an).

Le fait que toute matière soit radioactive n'implique pas qu'elle soit dangereuse. Une réglementation, basée sur des données scientifiques et médicales, est nécessaire pour différencier la matière qui est sans réel danger pour l'individu ou l'environnement et ne nécessite donc pas de régulation, et celle qui requiert des mesures de radioprotection et donc des règlements spécifiques.

#### 4.1.2 Quelques définitions internationalement acceptées

**Matière radioactive :** Matière, en raison de sa radioactivité, devant faire l'objet d'un contrôle radiologique réglementaire pour son utilisation.

**Norm (Naturally Occurring Radioactive Materials) :** Matières premières naturellement radioactives en raison des radionucléides qu'elles contiennent et ne contenant pas de quantités significatives de radionucléides artificiels.

**Tenorm (Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials) :** Matières premières dont la concentration en radionucléides naturels a été renforcée de façon significative par un traitement, le traitement n'ayant pas pour objet d'en utiliser les propriétés radioactives.

**Exclusion :** Décision de soustraire du contrôle radiologique réglementaire des matériaux ou des installations ou encore des pratiques.

**Exemption :** Décision générique prise, *a priori*, d'exonérer des matériaux, installations ou pratiques du contrôle radiologique réglementaire, étant donné que leur nature est telle que le danger pour la santé est inexistant et que tout contrôle est par conséquent superflu.

**Libération (ou déclassement) :** Décision prise, *a posteriori*, par l'organisme de contrôle, de libérer de tout contrôle des matériaux, des installations ou des pratiques provenant d'une activité humaine, elle-même sous contrôle. Cette décision est prise dès lors que leurs caractéristiques ou leurs impacts radiologiques sont inférieurs à des seuils prédéfinis.

Remarques :

- La dose « triviale » est actuellement définie comme un centième de la dose limite de 1 mSv/an (soit 10 µSv/an) pour les expositions autres que celles dues à l'exposition naturelle ou aux examens médicaux pour le public). A titre de comparaison, la dose due aux sources naturelles est de 2-3 mSv/an en France.
- Les critères de libération sont liés à la dose reçue par le public.
- La dilution ou dispersion de matières, afin d'arriver en-dessous d'un seuil de libération, n'est pas autorisée, sauf décision spécifique par l'organisme de contrôle. Ceci est le cas pour des rejets autorisés en mer ou dans l'atmosphère.
- La libération peut être soit inconditionnelle, auquel cas les matériaux ou sites peuvent être utilisés sans restrictions, soit conditionnelle pour un usage à une fin spécifique. Ceci est le cas dans certains pays comme l'Allemagne, la Belgique ou la Suède pour la fusion de métaux de démantèlement très très faiblement actifs (TTFA). Après fusion décontaminante, ces métaux sont libérés « conditionnellement » moyennant une dilution supplémentaire d'un facteur dix.
- Les seuils d'exemption utilisés par les pays qui autorisent la libération sont logiquement plus bas que les seuils de libération.
- L'appellation Tenorm n'est pas reprise par l'AIEA.
- L'ASN définit le déclassement comme l'ensemble des opérations administratives et réglementaires destinées soit à classer une installation nucléaire dans une catégorie inférieure, soit à en supprimer le classement initial. Elle ne définit pas la libération.
- La DGPR prescrit la gestion des TFA contenant uniquement de la radioactivité naturelle renforcée, Norm et Tenorm suivant la transposition de la directive 2013/59/EURATOM.

En France, les matières qui sortent d'une zone nucléaire d'une INB sont considérées comme matières radioactives, soumises au contrôle, même si leur activité additionnelle n'est pas mesurable. Cela équivaut à un seuil de libération de 0 Bq/g. Les seuils d'exemption pour matières Norm sont alors *de facto* supérieurs aux seuils de libération, là où les seuils d'exemption devraient logiquement être égaux ou inférieurs aux seuils de libération. Cela implique qu'une matière identique peut être considérée soit comme déchet radioactif, soit comme matière non-radioactive, rien que sur la base de sa localisation et non sur celle de son activité.

#### 4.1.3 Approches internationales

Les approches internationales qui intéressent plus particulièrement la Commission sont celles qui concernent l'exemption et la libération de déchets dont la radioactivité est très faible ou non-mesurable (Cf. Annexe XVIII).

L'AIEA publie des guides de sûreté qui représentent la référence internationale en matière de sûreté nucléaire et de radioprotection. Le guide RS-G-1.7 traite de l'application des concepts d'exclusion, exemption et libération. Les guides de l'AIEA ne s'appliquent ni à l'alimentation, ni aux eaux potables, ni à l'exposition au radon ou au <sup>40</sup>K dans le corps, ni aux activités de transports. D'autres règlements, comme ceux de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), de l'Organisation des Nations unies pour l'agriculture et l'alimentation (FAO) ou de l'Agence de l'énergie nucléaire (AEN-OCDE) régissent partiellement ces matières.

La Directive 2013/59/EURATOM fixe les normes de base relatives à la protection sanitaire contre les dangers résultant de l'exposition du public ou des travailleurs aux rayonnements ionisants. Elle se base en grande partie sur les travaux de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) et des recommandations de l'AIEA, OMS, FAO et AEN.

Les seuils d'exemption et de libération spécifiés par l'AIEA et Euratom sont identiques.

En Annexe XVIII, nous avons rappelé les pratiques de certains pays membres de l'OCDE sur la gestion des déchets nucléaires (Allemagne, Belgique, Canada, Espagne, Etats-Unis, Finlande, Royaume-Uni, Italie, Pays Bas, Suède, Suisse).

*La Commission constate que la France et les Etats-Unis occupent une position singulière dans le concert international en ne pratiquant pas la libération de déchets nucléaires.*

## **4.2 LE PROJET DE STOCKAGE EN SUÈDE**

### **4.2.1 Introduction**

La procédure pour la demande d'autorisation d'un stockage géologique profond pour les combustibles usés a commencé en mars 2011 quand la compagnie suédoise en charge des déchets radioactifs et des combustibles usés (SKB) a déposé sa demande auprès du gouvernement suédois. Cette demande est constituée de trois dossiers :

- une demande dans le cadre de la réglementation des activités nucléaires pour le Clab (entreposage pour les combustibles usés) et pour l'usine d'encapsulation à Oskarshamn ;
- une demande dans le cadre de la réglementation des activités nucléaires pour un stockage géologique profond des combustibles usés à Forsmark dans la commune d'Östhammar suivant le design KBS (Cf. section 4.3.2) ;
- une demande suivant le code de l'environnement sur l'ensemble du concept (Clab, usine d'encapsulation et stockage géologique).

Les demandes relevant du code des activités nucléaires sont analysées par l'autorité de sûreté suédoise (SSM) et la demande relevant du code de l'environnement est analysée par la Cour environnementale. Les deux autorités transmettent leurs avis au gouvernement qui prend la décision finale. Toutefois, les communes ont un droit de veto sur l'implantation de toute installation nucléaire envisagée sur leur territoire.

Pendant la période 2011-2017, un processus formel d'analyse s'est déroulé comprenant des expertises indépendantes sur les points clés, des informations complémentaires fournies par SKB et des échanges sous forme de questions/réponses entre les parties prenantes et SKB. Pendant 5 semaines, la Cour a tenu des auditions publiques à Stockholm, Oskarshamn et Östhammar où les autorités, les parties prenantes et SKB ont pu présenter leurs arguments en faveur et en défaveur du projet. A la fin de 2017, la Cour et SSM ont terminé leurs analyses et en janvier 2018, leurs avis ont été transmis au gouvernement.

### **4.2.2 Avis de l'Autorité de sûreté (SSM)**

SSM (Voir Annexe XIX) recommande que les projets déposés par SKB pour construire un stockage géologique profond pour les combustibles usés à Forsmark et l'usine d'encapsulation à Oskarshamn soient approuvés par le gouvernement.

SSM a donné un avis favorable à la demande de création de stockage présenté par SKB et l'a assujéti à la production d'analyses de sûreté avant chacune des phases principales du projet (construction, opérations de test, exploitation industrielle).

### **4.2.3 Avis de la Cour environnementale**

L'avis de la Cour environnementale (Voir Annexe XX) est également positif sur plusieurs points importants. La Cour a approuvé les propositions relatives aux choix du site de Forsmark, de la roche hôte (granite) et des barrières ouvragées. Elle approuve aussi les conclusions des études d'impact environnemental. La Cour donne un avis favorable sur l'usine d'encapsulation et sur le site d'entreposage des combustibles usés (Clab).

Toutefois, la Cour souhaite que SKB complète son dossier sur le conteneur de cuivre et son impact sur la sûreté à long terme. De plus, la Cour souhaite que le gouvernement détermine qui

assumera la responsabilité à long terme du stockage après sa fermeture, rejoignant ainsi la demande de la commune.

#### 4.2.4 Etape suivante

C'est maintenant au gouvernement de prendre en main le processus d'autorisation en tenant compte des avis qui lui ont été transmis. La commune d'Östhammar a annulé le référendum qu'elle avait planifié sur la question du stockage géologique profond en attendant de savoir comment le gouvernement allait gérer ces deux avis partiellement divergents. Cette divergence réside dans le fait que l'autorité de sûreté se prononcera sur le projet tout au long de sa réalisation alors que la Cour environnementale ne le fait qu'une fois sur le projet initial.

La gestion du dossier est maintenant entre les mains des ministères en charge de l'énergie et de l'environnement. SKB de son côté prépare le rapport que la Cour environnementale lui a demandé. C'est en fait un document que SKB s'était déjà engagé à transmettre à l'autorité de sûreté pour la revue d'analyse de sûreté préalable au début des travaux. SKB prévoit que l'ensemble des études complémentaires sera finalisé pour la fin de l'année 2018.

La conséquence de la demande d'informations complémentaires de la part de la Cour environnementale est que le processus d'autorisation du stockage géologique profond a pris un retard d'un an. Les communes abritant des sites nucléaires en Suède ont écrit au Gouvernement et au Parlement pour attirer leur attention sur la nécessité de mettre en œuvre un stockage géologique profond et demander au Gouvernement de veiller à ce que le processus d'autorisation ne soit pas inutilement ralenti.

### 4.3 MISSION D'ÉTUDE EN SUÈDE ET EN FINLANDE

38

L'objectif essentiel de la mission était de rencontrer les différents acteurs des filières nucléaires ainsi que les élus des communes concernées par le stockage des déchets radioactifs afin d'explorer les deux points suivants :

- 1) le processus d'acceptation sociétale de la construction des sites de stockage géologique profond pour les déchets nucléaires de forte activité
- 2) le recyclage des métaux activés, voire contaminés.

#### 4.3.1 Les systèmes énergétiques

Il y a un contraste intéressant entre les deux pays, puisque l'un, la Finlande, est engagée dans un développement actif de la filière nucléaire, tandis que l'autre, la Suède, s'est prononcée pour un retrait progressif. C'est dans ce contexte très différent que toutes deux ont néanmoins engagé une politique de stockage des déchets très avancée.

Ces déchets résultent de l'exploitation des parcs de réacteurs suivants. Pour plus de détails voir l'Annexe XXI.

##### a) Finlande

La Finlande a deux centrales nucléaires exploitées l'une par TVO, située à Olkiluoto commune de Eurajoki (réacteurs OL1 et OL2, REB ABB de 880 MW entrés en service en 1979 et 1982 pour 60 ans et OL3 EPR de 1600 MWe en construction) et l'autre par Fortum à Hastholmen commune de Loviisa (réacteurs LO1 et LO2, REP VVER de 488 MWe entrés en service en 1977 et 1981 pour 50 ans). Fennovoima; une troisième compagnie créée en 2007, a demandé l'autorisation de construire 1 REP de GenIII de 1200 MW à Hannhikivi commune de Pyhäjoki. Le nucléaire produit 25 % de l'énergie électrique et 18 % de l'énergie consommée. La Finlande vise 50 % d'énergie électrique nucléaire dans 10 ans.

## **b) Suède**

La Suède a trois centrales nucléaires exploitées par trois opérateurs différents (RAB, OKG, FKA), situées à Ringhals (1 BWR ABB de 875 MW, 3 PWR WH de 800, 900 et 1000 MW), à Oskarshamn (3 BWR ABB de 500, 600 et 1400 MW) et à Forsmark (3 BWR de 900, 1100 et 1200 MW). Elles sont entrées en service entre 1974 et 1985. Aujourd'hui 4 réacteurs sont en exploitation à Ringhals, 3 à Forsmark et 1 à Oskarshamn. Les réacteurs 1 et 2 à Ringhals fermeront en 2019 et 2024. Le nucléaire produit 40 % de l'électricité et 20-25 % de l'énergie consommée. La Suède devrait sortir à terme du nucléaire (position affichée, mais pourtant peu claire).

## **c) Le marché NordPool**

La Finlande et la Suède sont intégrées dans le plus grand marché électrique européen, le NordPool, comprenant entre autres la Norvège, le Danemark, mais également l'Allemagne et le Royaume Uni. Le marché nordique est l'un des plus intégrés d'Europe : 80 % de l'électricité consommée dans la région est vendue sur le marché spot (marché intrajournalier et du jour au lendemain).

La Finlande importe presque 20 % de son électricité, essentiellement de la Norvège. La production hydroélectrique, bien qu'élevée dans le mix finlandais (24 %), est en nette baisse (24 % en 2016, comparée à un pic historique de 80 % dans les années soixante). Bien que cette baisse soit partiellement compensée par d'autres sources renouvelables, la production reste faible face à une consommation d'électricité qui n'a pas cessé de croître dans les 20 dernières années, et qui est toujours prévue à la hausse. Les interconnexions avec les autres pays du NordPool, Suède, Estonie et Norvège, sont souvent saturées, ce qui provoque un décrochage à la hausse du prix en Finlande par rapport aux autres pays du NordPool. L'approvisionnement en gaz est assuré par un seul point d'importation en provenance de la Russie. Globalement, il s'agit d'un pays à risque par rapport à la sécurité d'approvisionnement et à la continuité de la fourniture électrique dans les années à venir. Dans ce contexte, la production d'électricité nucléaire, jouera un rôle clé dans le développement du mix énergétique de la Finlande et son intégration dans le NordPool.

La situation de la Suède est similaire à celle de la Finlande quant à la baisse de la production hydroélectrique dans les vingt dernières années, mais avec une tendance moins prononcée (aujourd'hui la part d'hydroélectricité s'élève à plus de 40 %). Plusieurs facteurs permettront à la Suède de ne pas être confrontée à une tension entre offre et demande d'électricité: la consommation d'électricité est en baisse depuis 2001, grâce essentiellement à d'ambitieux programmes d'efficacité énergétique; la part des énergies renouvelables hors hydroélectricité est très élevée ; le gaz est faiblement utilisé dans la production électrique. De plus, la nouvelle interconnexion avec la Lituanie (le NordBalt, opérationnel depuis 2016) facilite les échanges avec le NordPool, permettant au prix de l'électricité de rester aligné à la moyenne des pays nordiques et baltiques.

### **4.3.2 Gestion des déchets**

La Finlande et la Suède ont adopté un cycle du combustible électronucléaire ouvert c'est-à-dire que les assemblages de combustible usé issus des réacteurs sont considérés comme des déchets ultimes HAVL. Ils ne peuvent pas être exportés vers un pays tiers pour y être stockés. De façon réciproque les législations ne permettent pas l'importation de déchets nucléaires HAVL pour stockage. Pour les gérer les deux pays ont choisi le stockage géologique profond dans le granite. L'exploitation des réacteurs conduit à des déchets technologiques FMAVC. Le démantèlement conduira aussi à des déchets de même type et à des déchets FAVL. Les deux pays ont choisi de les stocker dans des silos ou galeries excavés à faible profondeur dans le granite. Exportation et importation de ces déchets pour stockage sont interdits comme pour les déchets HAVL. Tous les transports de déchets se font par mer.

Il est à noter que, dans ces deux pays, ce sont les producteurs qui sont responsables de la gestion des déchets et non, comme en France, une agence nationale publique. Ils ont créé des compagnies spécifiques (Posiva et SKB) pour cette tâche.

#### **a) Le concept de stockage KBS 3 pour les combustibles usés**

La Suède (SKB) avec l'aide de la Finlande (Posiva) a développé le concept de stockage dit KBS3 pour stocker les assemblages de combustible usé issus de réacteurs BWR et/ou PWR. Des galeries sont creusées à une profondeur de 450 m environ, dans du granite. Dans ces galeries, séparées d'au moins 6 m, on creuse des puits verticaux d'une profondeur d'environ 8 m, dans lesquels sont positionnés les canisters qui renferment les assemblages. Les canisters sont des cylindres de cuivre de 5 m de haut et 1 m de diamètre, leurs parois ont une épaisseur de 5 cm. Ils sont hermétiques. Un canister peut contenir 12 assemblages BWR ou 4 assemblages PWR disposés dans un étui en acier, adapté aux caractéristiques des assemblages, étui qui s'emboîte dans le canister et fait corps avec lui. Le cuivre est quasi inaltérable et l'étui en acier assure la rigidité du colis. Dans les puits, les canisters sont entourés d'anneaux de bentonite. Les galeries d'accès aux puits seront remplies de blocs de bentonite avant la fermeture du stockage. Les galeries sont accessibles depuis la surface par une descenderie.

La mise en œuvre du concept KBS3 nécessite des entreposages d'environ 30 ans pour laisser aux assemblages le temps de refroidir et une usine d'encapsulation qui inclut le scellement des couvercles.

Tous les sites de stockage sont en bord de mer. Néanmoins, la remontée des eaux n'est pas considérée comme un problème car ces zones bénéficient d'un rebond isostatique conséquent suite à la fonte des calottes glaciaires (presque 1 cm/an).

#### **b) Le concept de stockage des déchets technologiques**

Parmi les déchets FMAVC stockés dans des silos et des tunnels à 60 m de profondeur dans le granite il y a des colis de résines échangeuses d'ions enrobées dans du bitume. Les possibilités d'incendie ont été évaluées. La conclusion est que le risque est très faible et donc acceptable.

#### **c) Les déchets Finlandais**

C'est l'entreprise Posiva Oy (environ 80 personnes) qui gère des déchets, sous le contrôle de l'autorité de sûreté STUK. Les déchets HAVL seront stockés à Onkalo commune d'Eurajoki. Le site de Onkalo a été choisi par le gouvernement en 2000 pour y implanter un stockage de 6500 tU. La construction d'un laboratoire de caractérisation du site a commencé en 2004 par un laboratoire de recherche. En 2015 Stuk a autorisé le stockage.

Les déchets FA-MA sont stockés à Olkiluoto et à Loviisa dans des silos à 60 m de profondeur dans le granite.

Il n'y a pas d'équivalent du CEA en Finlande. La recherche sur le nucléaire est faite par VTT et les universités.

#### **d) Les déchets Suédois**

C'est l'entreprise SKB (500 personnes) qui gère les déchets, sous le contrôle de l'autorité de sûreté, SSM. Les déchets HAVL seront stockés à Forsmark commune d'Osthammar. Le site de stockage de Forsmark a été choisi par SKB en 2009 pour y implanter un stockage de 12 000 tU. Les assemblages de combustible usé sont entreposés dans le Clab situé à Simpevarp commune d'Oskarshamn. L'usine d'encapsulation sera située près du Clab. Il est aussi envisagé d'y implanter l'usine de préparation des canisters. Les demandes d'autorisation pour le stockage et l'usine d'encapsulation datent de 2011. Les déchets FMAVC sont stockés dans le SFR à Forsmark dans des silos à 60 m de profondeur dans le granite. SKB a demandé l'extension du SFR. Il est prévu que des déchets FAVL soient aussi stockés en profondeur à Forsmark.

SKB exploite sur la commune Oskarshamn depuis 1996 le laboratoire d'Aspö à 480 m de profondeur où a été testé le concept KBS3 et les laboratoires d'encapsulation (1998) et de bentonite (2007).

Outre l'autorité de sûreté, Il existe en Suède un Conseil national de Suède (SNC) qui comprend 11 membres issus de domaines de compétence divers (6 femmes et 5 hommes). Il produit un rapport par an qui fait l'état des lieux sur la gestion des déchets nucléaires. Il organise des séminaires avec les différents acteurs de la filière et le gouvernement, ainsi que d'autres plus larges auxquels participent les habitants des communes. C'est pour une part équivalent de la CNE.

Il n'y a pas d'équivalent du CEA en Suède. La recherche sur le nucléaire est faite par les universités.

### 4.3.3 Le processus d'acceptation sociétale

La représentation des citoyens dans la gouvernance dans les deux pays se situe fondamentalement à deux niveaux : celui du gouvernement et celui des communes, qui sont relativement peu nombreuses et beaucoup plus étendues qu'en France. Les communes ont des compétences très larges, elles prélèvent des impôts très importants et ont la responsabilité de missions qui, en France, sont de niveau national. Il existe également en Suède un niveau régional, mais il est peu important dans le processus de décision.

Les communes sont gérées par une Commune dont les membres sont renouvelés tous les 4 ans. Le mode d'élection des membres au scrutin strictement proportionnel fait que les communes représentent la position de la population (70 % de votants). La gestion de la vie publique (finances, services sociaux, implantation des industriels, ...) se fait dans un souci d'information, d'ouverture et de transparence, notamment pour ce qui touche au nucléaire. Il existe diverses commissions municipales qui instruisent les dossiers.

Les rôles et les responsabilités de chaque niveau sont clairement définis : SKB engage le processus de sélection des sites ; il se tourne vers les communes concernées qui doivent manifester leur intérêt et ont ensuite la responsabilité finale d'accepter ou d'empêcher (droit de veto en Finlande et en Suède) l'implantation de toute installation nucléaire, y compris donc la construction d'un stockage. Toute décision est suivie d'effet.

Le fait que la commune soit en dernière analyse responsable de la décision d'implantation a conduit à la possibilité d'organisation d'un référendum en Suède, dans la commune concernée, qui aura lieu en 2018. Le résultat sera cependant consultatif et la décision de la commune est prise par le conseil municipal.

#### a) Finlande

##### ▪ Les communes concernées

La Commission a rendu visite à la Commune de Eurajoki qui comprend 9400 habitants (17 hab/km<sup>2</sup>) ; elle a des compétences très larges, au sens où elle recouvre et utilise taxes et impôts. Elle a, depuis 1978, une longue pratique de la prise de décision pour ce qui concerne le nucléaire dans la mesure où plusieurs installations sont présentes sur son territoire (réacteurs, stockage FAVL, ...).

Les représentants rencontrés ont exprimé une confiance importante dans les entreprises et les institutions en charge de la filière nucléaire. Ils ont estimé d'une part que TVO et Posiva ont une grande expérience en technologie et en sûreté, et d'autre part que les avis de l'autorité de sûreté STUK sont entièrement crédibles. Cela s'est fondé sur une coopération étroite depuis 1995 entre ces organismes et la Commune (information, séminaires, audits, ..). La commune s'est battue pour obtenir le site de stockage d'Onkalo. Dès 1999, un sondage d'opinion indiquait que 60 % de la population était en faveur du stockage, que la commune a accepté un an plus tard (20 voix pour, 7 contre).

Elle estime que l'implantation et la gestion du stockage représentent une opportunité de développement pour la commune (emplois, taxes). La Présidente du conseil de la Commune pense que les votes sont fondés sur des convictions personnelles et non sur celles des partis politiques. Enfin la Commune a engagé des coopérations sous forme de visites et de partage d'information avec plusieurs pays européens.

La Commission a aussi rencontré la Commune de Loviisa. Elle gère la commune de 15 000 habitants (18 hab/km<sup>2</sup>). Celle-ci n'a pas été retenue *in fine* pour la construction du stockage, et les représentants rencontrés ont fait part de leur déception à cet égard (en particulier en termes de perspectives d'emploi).

- **Processus de sélection du site de stockage géologique profond.**

Le processus de sélection a commencé en 1983 par un screening de l'ensemble du territoire finlandais. Quatre sites ont été examinés plus précisément par la suite. A l'étape suivante, les communes d'Eurajoki et Loviisa, qui avaient manifesté leur intérêt pour ces projets, ont été retenues. C'est au regard des critères géologiques que le choix final s'est porté sur Eurajoki, qui s'est donc prononcé en faveur du stockage.

## **b) Suède**

- **Les communes concernées**

La Commission a rencontré la Commune de Osthrammar (22 000 habitants pour 2 800 km<sup>2</sup>). Le taux de chômage y est inférieur à 2 %. La commune (Président du conseil et maire) est très impliquée depuis 1995 dans les discussions avec SKB et avec les habitants pour expliquer les raisons pour lesquelles il semble pertinent d'accueillir un stockage géologique profond. Elle cherche également à diffuser à l'international l'approche développée dans sa commune. Cette commune a été choisie pour le stockage des déchets nucléaires HAVL car le granite y est de très bonne qualité (1 fracture tous les 100 m contre 1 tous les 2,5 m pour le laboratoire d'Äspö).

La Commission a rencontré le Maire de la Commune de Oskarshamn, Commune où seront encapsulés des assemblages de combustibles usés, entreposés dans le Clab.

- **Processus de sélection du site.**

SKB avait choisi initialement 2 sites au nord de la Suède, mais les communes ayant refusé, SKB a préféré choisir des communes connaissant déjà le nucléaire via la présence de réacteurs. Il a donc retenu deux communes, Oskarshamn et Osthrammar. C'est Osthrammar qui l'a emporté.

## **c) Quelques caractéristiques qui favorisent l'acceptation sociétale vis-à-vis des stockages de déchets nucléaires**

Le processus de décision relatif à la création de stockage des déchets nucléaires est très avancé dans les deux pays.

- **Certains sont communs aux deux pays**

D'un point de vue social général, ces deux pays se caractérisent, dans les enquêtes d'opinion, par un niveau de confiance élevé envers les institutions. Lors des rencontres avec la Commission, les différents acteurs ont présenté des enquêtes d'opinion qui révélaient en particulier que les autorités de sûreté nucléaire des deux pays bénéficient d'un niveau de confiance élevé. Or ces autorités de sûreté se sont prononcées clairement en faveur du stockage, et leur avis a donc rencontré un écho favorable dans la population, même s'il y a bien sûr des oppositions. Par ailleurs, ce sont des pays qui ont l'habitude d'un débat démocratique de proximité important et approfondi, ce qui favorise la légitimité des décisions prises. A l'issue du débat sur les déchets nucléaires, l'idée du caractère plus sûr de leur stockage en profondeur par rapport à un stockage en surface s'est révélée majoritaire, en particulier au niveau local, pour les populations directement concernées, les résultats au niveau national étant plus faibles.

D'un point de vue institutionnel, la clarté de la répartition des rôles entre le niveau gouvernemental et le niveau local est très grande, et elle favorise la rapidité du processus de décision. En effet si, au niveau gouvernemental, l'initiative a été de prendre la décision de préparer un stockage et de rechercher des sites pertinents pour les soumettre ensuite à l'approbation des communes, celles-ci ont eu la possibilité de se porter candidates au stockage ou de le refuser. Ce sont donc elles qui avaient la responsabilité ultime d'accepter ou de refuser le stockage, en sorte que le processus de décision bénéficie d'une plus grande légitimité, notamment en raison de sa plus grande clarté institutionnelle et démocratique.

D'un point de vue organisationnel, le nombre d'acteurs impliqués est relativement peu nombreux : ce sont les producteurs qui ont la charge de la gestion des déchets, non une organisation dédiée distincte. Dans chacun des deux pays, il n'y a qu'une seule autorité de sûreté qui donne des avis publics, ce qui limite le risque de discordance dans les avis produits. Par ailleurs, le Stuk a pris sa décision de principe sur la base d'un projet encore relativement général, mettant en avant le fait qu'il serait, à ce stade, inefficace d'entrer davantage dans les détails. Il devra se prononcer à nouveau sur ceux-ci, en vue de l'autorisation de stockage, une fois les études davantage développées.

D'un point de vue économique, le processus de décision a été favorisé par deux aspects complémentaires. Les communes retenues ont toutes déjà des implantations nucléaires sur leur territoire. Les populations sont donc familières de ces problématiques, et ont évidemment des intérêts économiques associés à ces implantations. Par suite, l'installation de stockage peut apparaître comme une source d'emplois et de revenus supplémentaires, par l'intermédiaire des taxes nouvelles qu'elles collecteront. A partir du moment où ce sont les communes qui décident *in fine* de l'implantation, et que ce sont elles qui bénéficient directement des avantages économiques (emploi, taxes et compensations diverses), elles ont une plus grande incitation économique à accepter ces projets.

Enfin, d'un point de vue environnemental, on peut supposer que le fait que les communes retenues connaissent déjà des implantations nucléaires, réduit le sentiment d'un impact environnemental fort modifiant radicalement la nature et les paysages. L'impact a déjà eu lieu, et la perspective du stockage conduit à favoriser des actions de protection complémentaire du paysage.

- **Spécifique à la Finlande**

Le stockage d'Onkalo a été accepté en 2001 par la commune. TVO est l'employeur le plus important de la commune et les taxes du nucléaire contribuent à 30 % du budget autour de 60 M€. Posiva a constamment aidé la commune dans ses projets immobiliers. Les deux organismes ont toujours tenu bien informé la population. Tous ces facteurs ont largement aidé au processus. Onkalo est destiné aux déchets des centrales actuelles. Le stockage des déchets du réacteur en projet à Hanhikivi (commune de Pyhäjoki) en sont exclus. Le problème de leur stockage est à venir.

La construction du stockage d'Onkalo qui précède celle de Forsmark (Suède) est une démonstration en vraie grandeur de la sélection des blocs de granite pour y creuser les puits de dépôt des canisters.

- **Spécifique à la Suède**

Le processus d'acceptation du stockage de Forsmark a été longuement préparé par l'exploitation d'Aspö où le concept KBS 3 a été développé.

#### 4.3.4 Le recyclage de déchets métalliques

En accord avec les dispositions de plusieurs règlements édités par l'autorité de sûreté (SSM) en 2011 les producteurs de déchets peuvent libérer certains déchets métalliques sans (SSMFS 2011/EC RP122) ou avec conditions (EC RP89). Les conditions portent sur les informations que les fabricants de produits manufacturés avec les métaux libérés doivent attacher aux produits

pour usages conventionnels par le public. Ainsi en Suède des métaux issus d'installations nucléaires, intacts ou décontaminés, sont utilisés pour fabriquer des produits de consommation courante. L'obtention d'un certificat de « libération » implique un long processus. Dans ce processus la Suède applique les prescriptions de l'AIEA.

#### **a) Conditions de libération de déchets en Suède**

La Suède classe les matériaux radioactifs (ou supposés) de très faible activité en fonction des risques radiologiques qu'ils peuvent faire encourir selon les critères de l'AIEA. Pour les déchets de démantèlement des réacteurs nucléaires, par exemple, seuls ceux dont l'activité en  $^{60}\text{Co}$  est supérieure à 0,1 Bq/g et inférieure à 1000 Bq/g sont considérés comme présentant un risque plus ou moins important. En deçà de 0,1 Bq/g il s'agit des déchets conventionnels pour lesquels le risque est extrêmement faible (activité non détectable) et de déchets pour lesquels le risque est faible (activité douteuse). Tous les matériaux au delà du « risque faible » sont candidats à libération (et aussi ceux qui sortent de la classification). Pour le démantèlement d'un BWR 150 000 t de déchets sont conventionnels, 30 000 t sont à risque faible et 10 000 t sont à risque. Sur ces 10 000 t environ 70 % sont métalliques (la moitié à moins de 0,1 Bq/g), 25 % sont des matériaux de construction et moins de 5 % sont incinérables. Dans le processus de libération les métaux sont caractérisés, une partie est libérée sans traitement et l'autre est traitée.

#### **b) Le recyclage des métaux de l'industrie nucléaire en Suède**

EdF a acheté à Studsvik, commune de Nyköping, une petite entreprise, qu'il a dénommée Cyclife. Elle fait travailler environ 90 personnes. Cette entreprise a une grande expertise et expérience dans le domaine du recyclage des métaux activés, voire contaminés, acquise depuis sa mise en service en 1987. EdF a décidé d'acquérir Cyclife pour gagner en expérience dans le domaine du recyclage des métaux. EdF observe aussi que l'acceptabilité sociétale vis-à-vis site du stockage des déchets TFA décroît, que le coût du stockage est de plus en plus élevé. EdF voit s'ouvrir le marché du démantèlement d'un grand nombre de réacteurs. Cyclife travaille pour de nombreux clients (11 pays européens).

Cyclife est située à Studsvik dans un complexe industriel desservi par un port. Elle comprend une unité de découpe de gros déchets (échangeurs de réacteur par exemple) d'une capacité de 200 t/an attenante à une unité de fusion des métaux par induction (fer, cuivre, aluminium, plomb) d'une capacité de 5 000 t/an et une unité de pyrolyse et d'incinération de déchets organiques. La fusion se fait par lot de 3,5 t d'acier (2 t pour l'aluminium). Les déchets métalliques sont triés et caractérisés. La partie non libérable est découpée, décontaminée par sablage et fondue en lingots. Ces derniers sont caractérisés (15 à 20 radionucléides mesurés) et envoyés aux clients. Les déchets secondaires (déchets non traitables, déchets de sablage, crasses de fusion), environ 5 % en poids des déchets, sont aussi caractérisés, conditionnés et renvoyés aux clients dans les pays d'origine (tous les 3 ans). Le procédé permet de réduire le volume des déchets métalliques de démantèlement de 90 %.

La libération des métaux est valable si le coût du stockage de ces déchets est suffisamment élevé pour justifier le coût du recyclage. Le kilo d'acier recyclé par Cyclife vaut environ 3 euros/kg.

Le travail dans cette entreprise reste très manuel, il pourrait être davantage robotisé.

EdF va prochainement procéder à une expérience en recyclant un générateur de vapeur venu de France. EdF souhaite en effet recycler des métaux activés et contaminés en France en valorisant de grands lots homogènes de matériaux métalliques (80 000 t de générateurs de vapeur et 13 000 t de diffuseurs d'Eurodif). Ce projet nécessite que la législation française évolue sur le problème de seuil de libération en France.

La Commission a visité Cyclife. A nouveau, la confiance entre la population, les clients et l'industrie a été mise en avant. Cyclife affiche sa transparence. Cette entreprise rend compte tous les ans à la SSM via un rapport accessible à tous. Elle a des échanges également avec un comité de sûreté/sécurité nucléaire qui représente la commune de Nyköping. Ce comité est composé de politiciens sans experts techniques. Les échanges reposent sur la confiance.

Cyclife dit que les clients à qui elle fournit les métaux recyclés sont parfaitement informés de leur origine, que la traçabilité est assurée. C'est vrai si on comprend que leurs clients sont les industries qui achètent les métaux recyclés. Ça l'est moins si on considère l'utilisateur final du produit manufacturé, par exemple la personne qui achète une voiture. A aucun moment on ne dit à cette personne qu'elle achète une voiture qui peut contenir des métaux recyclés. Les métaux recyclés en Suède se retrouvent donc partout ailleurs, y compris en France.







## ANNEXE I : ACTIVITE DE LA COMMISSION

Depuis la publication de son précédent rapport en mai 2017, la Commission a présenté son rapport n°11 à l'OPECST et aux départements ministériels concernés. Une délégation de la Commission s'est rendue à Joinville le 29 mars 2018 pour y présenter son rapport aux membres du Clis du laboratoire de Bure (Cf. Annexe II).

La Commission a suivi la même méthode de travail que les années précédentes. Elle a procédé à 9 auditions d'un jour (Cf. Annexe III), et 5 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 84 personnes de l'Andra et du CEA, mais également des institutions universitaires et organismes industriels, français et étrangers (Cf. Annexe IV). Ces auditions rassemblaient en moyenne une soixantaine de personnes, notamment des représentants de l'Autorité de sûreté nucléaire, d'Orano, d'EdF, de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire et de l'Administration centrale.

La Commission a consacré deux demi-journées à la visite de la Centrale de Brennilis et la visite du site de Chinon, visite l'AMI – visite de Chinon 2 et visite du Musée de l'atome (Cf. Annexe II). Elle a également effectué un voyage d'études en Suède et Finlande.

Pour préparer ce rapport, la Commission a tenu un pré-séminaire de 2 jours, à l'occasion de sa visite du site de Chinon. 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 III du présent rapport. La liste des documents qu'elle a reçus des organismes auditionnés est donnée en Annexe V.



## ANNEXE II : PRÉSENTATIONS ET VISITES DE LA COMMISSION

### *Auditions de la Commission*

23 novembre 2017 : Présentation du rapport n°11 à l'OPECST

29 mars 2017 : Présentation du rapport n°11 au Clis

### *Visites de la Commission*

12 décembre 2017 : EdF – Visite de la centrale de Brennilis

05 avril 2018 : EdF – Visite du site de Chinon – Visite de l'AMI – Visite de Chinon A2 – Visite du Musée de l'atome

### *Voyage d'étude de la Commission*

03 au 13 octobre 2017 : Voyage d'étude de la Commission nationale d'évaluation en Suède et Finlande



## ANNEXE III : AUDITIONS REALISEES PAR LA COMMISSION

### AUDITIONS PUBLIQUES

- 20 septembre 2017 : CEA & Producteurs – Entreposage et programmes de R&D pour la RCD
- 21 septembre 2017 : Andra – Le Dossier de DAC – L’inventaire présenté au Dossier de DAC – Les activités de R&D
- 22 novembre 2017 : Andra – Domaine de fonctionnement, programme de surveillance et maquette numérique de Cigéo
- 06 décembre 2017 : Andra – Socle de connaissances scientifiques et technologiques et travaux de R&D pour la DAC de Cigéo : Le milieu géologique et les quartiers HA et MAVL
- 07 décembre 2017 : CEA – Impacts sanitaires et environnementaux de la radioactivité
- 10 janvier 2018 : CEA – Orano – EdF – Stratégie et technico-économie du retraitement des combustibles
- 11 janvier 2018 : Andra – Socle des connaissances scientifiques et technologiques et travaux de R&D pour la DAC de Cigéo : Les ouvrages de fermeture, les liaisons surface/fond et le stockage en grand
- 14 février 2018 : CEA – Roadmap scientifique et technologique ASTRID
- 15 février 2018 : Andra – FAVL, TFA & Tenorm : Vers un schéma industriel global et cohérent

51

### AUDITIONS RESTREINTES

- 18 octobre 2017 – matin : Andra
- 18 octobre 2017 – après-midi : EdF
- 19 octobre 2017 – matin : Haut-Commissaire à l’Energie Atomique
- 19 octobre – matin : Orano
- 14 février 2018 – matin : Administrateur Général du CEA
- 15 mars 2018 : Andra – Coûts et financement de Cigéo



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

### *ANDRA*

ABADIE Pierre-Marie  
ARMAND Gilles  
BENABDERRAHMANE Hakim  
BOSGIRAUD Jean-Michel  
BOURBON Xavier  
BUMBIELER Frédéric  
CALSYN Laurent  
CAMPS Guillaume  
CHABIRON Aliouka  
COCHEPIN Benoit  
CRUSSET Didier  
DELAUROQUE Philippe  
DELRIEU Nicolas  
DE LA VAISSIERE Rémi  
FARHOUD Radwan  
FOIN Régis  
HURET Emilia  
LASSABATERE Thierry  
LAUNEAU Frédéric  
LEMAITRE Elsa  
LEVERD Pascal  
LIEBARD Florence  
MICHAU Nicolas  
MUNIER Isabelle  
PEPIN Guillaume  
PLAS Frédéric  
PRIN Coralie  
RENAULD Valérie  
RIGAL Jean-Pierre  
ROBINET Jean-Charles  
SCHUMACHER Stephan  
SEYEDI Darius  
TABANI Philippe  
TALANDIER Jean  
TALLEC Michèle  
THABET Soraya  
VOINIS Sylvie  
WENDLING Jacques  
YVEN Béatrice

### *Orano*

FORBES Pierre-Lionel  
GAGNER Laurent  
LAMOUREUX Christine  
ROMARY Jean-Michel

### *CEA*

ABONNEAU Eric  
ADNET Jean-Marc  
ADVOCAT Thierry

CHABERT Christine  
DEFFAIN Jean-Paul  
DELEUIL Stéphane  
DEVICTOR Nicolas  
DUBUISSON Philippe  
FERRY Cécile  
FILLION Eric  
FIRON Muriel  
GARNIER Jean-Claude  
GORGUE Vincent  
JOURDA Paul  
MAGNIN Magalie  
MARTIN Guillaume  
MENETRIER Florence  
MIRGUIRDITCHIAN Manuel  
MONFORT Margot  
PIKETTY Laurence  
PLANCQ David  
ROMEO Paul-Henri  
ROUDIL Danielle  
SARRADE Stéphane  
SATURNIN Anne  
TOURON Emmanuel  
VARAINE Frédéric

### *CNRS - IN2P3*

DAVID Sylvain

### *DGEC*

DEPROIT Laurent

### *EdF*

BENOIT Géraldine  
DUVIVIER Remi  
FERNANDES Roméo  
GIRAUD Olivier  
ISNARD Luc  
LAUGIER Frédéric

### *HC*

BRECHET Yves

### *POSIVA*

AALTONEN Isma

*IRSN*

LEURAUD Klervi  
RENAUD Philippe

*VIANOVA SYSTEM*

MARC Cédric  
RIVES Michel

## ANNEXE V : LISTE DES DOCUMENTS TRANSMIS À LA COMMISSION EN 2017-2018

### ANDRA

- Synthèse et bilan des travaux du Groupement de Laboratoires Verre-Fer-Argiles (2006-2014) – 20 juin 2017.
- Rapport d'activité R&D 2016 – Andra – 2016.
- Rapport d'activité Andra – 2016.
- Rapport de Veille internationale sur la gestion des déchets radioactifs et les projets de stockage géologique des déchets à haute activité et ceux à vie longue – Février 2018.
- Déchets radioactifs : rapport de veille – Veille internationale sur la gestion des déchets radioactifs et les projets de stockage géologique des déchets à haute activité et ceux à vie longue – février 2018.

### CEA

- Rapport annuel – Le CEA au cœur des grands défis du futur – 2016.
- Monographie de la DEN – L'assainissement-démantèlement des installations nucléaires.

### HC

- Rapport « Expertise du programme de R&D de l'Andra pour le projet Cigéo – mars 2017.



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

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

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

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

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

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

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

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

**Mickaele LE RAVALEC** – Chef du département Géoressources, Direction Géosciences, à l'IFPEN.

**Emmanuel LEDOUX** – Expert invité 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 honoraire - Ecole européenne de chimie, polymères et matériaux de Strasbourg.

**José Luis MARTINEZ** - . Directeur de recherche au CSIC (Institut de Science de Matériaux, Madrid, Espagne). Représentant officiel de l'Espagne au sein du Forum Européen sur les Infrastructures de Recherche (ESFRI, Commission Européenne), responsable du groupe stratégique en Physique et Ingénierie.

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

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



## ANNEXE VII : L'ENVIRONNEMENT GÉOLOGIQUE, HYDROGÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOCHIMIQUE

### LE MILIEU GÉOLOGIQUE

Le site sélectionné pour l'ouvrage Cigéo, situé au sein de la Zone d'intérêt pour une reconnaissance approfondie (ZIRA), est d'excellente qualité en termes géologiques. De façon générale, le Bassin parisien est très peu affecté par la tectonique. La zone sélectionnée est remarquablement stable, quasi asismique. Elle se distingue par l'absence de failles dans le Callovo-oxfordien (Cox).

Le Cox, dans la zone d'intérêt, se trouve à 490 m de profondeur, fait 130 m d'épaisseur et est faiblement incliné. Il est entouré de 2 couches calcaires : le Dogger au-dessous et l'Oxfordien au-dessus. Les sédiments argileux du Cox se sont déposés il y a 155 millions d'années, dans un environnement marin ouvert et calme, éloigné des sources d'apport (d'où particules très fines). On distingue 3 séquences sédimentaires du fait des variations du niveau marin : du haut vers le bas,

- l'unité silto-carbonatée (USC), épaisse de 20 à 30 m, plus hétérogène ;
- l'unité de transition, peu épaisse, passage entre les roches franchement argileuses de l'unité argileuse sous-jacente et les roches de l'unité silto-carbonatée sus-jacente ;
- l'unité argileuse (UA), épaisse de 100 à 120 m, la plus riche en minéraux argileux, très uniforme.

La proportion maximale de minéraux argileux passe de 25 % en haut à 60 % au milieu de la couche. La proportion de carbonates évolue de 80 % maximum dans la partie supérieure à 15 %. On trouve aussi de la pyrite (sulfure de fer) dont la proportion maximale est de 2 % environ au milieu de la couche.

La présence de carbonates assure une bonne résistance mécanique de la roche tandis que la forte proportion de minéraux argileux limite drastiquement la circulation des fluides.

Toutes les données collectées ont permis l'élaboration d'un modèle 3D représentatif du milieu géologique. Ce modèle sert de base aux simulations pour évaluer les performances du système de stockage.

### LE MODELE HYDROGÉOLOGIQUE DU SITE

Le modèle hydrogéologique a pour objectif l'évaluation numérique de l'impact de Cigéo sur son environnement à l'échelle du bassin de Paris et sur une échelle de temps allant jusqu'au million d'années. Il prend en compte la géologie du milieu et les écoulements de fluides dans ce milieu à l'actuel et dans le futur. Cette modélisation doit permettre d'identifier les exutoires des eaux souterraines qui peuvent entrer en contact avec les constituants du stockage et de quantifier les temps de transfert pour atteindre ces exutoires depuis le stockage. Ces éléments seront ensuite pris en compte dans le calcul des doses reçues via la voie de transfert eau souterraine, intégré à l'analyse de sûreté.

La fiabilité du modèle hydrogéologique est fondée sur le fait que tout un ensemble de données et connaissances régionales, sectorielles et locales s'y trouve intégré : observations géologiques, mesures hydrologiques, hydrochimiques...

Le modèle a progressivement évolué depuis le dossier 2005 sur le plan conceptuel, en bénéficiant de nouvelles campagnes de reconnaissance, et sur le choix des outils de calcul. Il comprend actuellement un modèle régional étendu à l'ensemble du Bassin parisien et un modèle sectoriel qui en est extrait. Ce modèle est construit avec le code de calcul en éléments finis

GROUNDWATER de l'Université de Neuchâtel en Suisse, il constitue la référence à l'actuel. Les améliorations apportées ont permis un meilleur calage de la piézométrie du Dogger grâce à une représentation plus élaborée du rôle des failles.

La modélisation de l'évolution hydrogéologique au cours du prochain million d'années est effectuée avec l'outil de calcul GEOAN (Golder Associates) ; il requiert la prise en compte de différents processus intimement liés comme la surrection tectonique, l'érosion et la sédimentation, le climat. Une hypothèse d'évolution naturelle du climat a été privilégiée jusqu'à ce jour.

## HYDROGÉOCHIMIE DU SITE

Les excellentes propriétés hydrauliques et géochimiques de la formation du Callovo-oxfordien, alliées à son épaisseur, en font l'élément majeur de la sûreté du stockage. Ces propriétés sont très largement étudiées depuis plus d'une vingtaine d'années, à différentes échelles, par des laboratoires et consortia français, européens et internationaux. L'Andra dispose ainsi d'un socle de connaissances très important et robuste.

La minéralogie et la structure des pores de la roche sont maintenant bien connues. Les propriétés de diffusion sont bien caractérisées au laboratoire et présentent une faible variabilité spatiale. L'effet de l'exclusion anionique et l'effet (réversible) d'une élévation de température ont été étudiés. Les tests de traceurs *in situ* ont déjà confirmé les résultats obtenus sur échantillons.

La géochimie des eaux du Callovo-oxfordien est bien comprise : elle repose sur un corpus de prélèvements et d'analyses et de calculs de spéciation géochimique. L'évolution liée à une élévation de température est également bien maîtrisée, largement contrôlée par la solubilité des carbonates ; il a également été démontré qu'elle était réversible.

La rétention de très nombreux radionucléides est également abondamment étudiée. L'Andra bénéficie des résultats des programmes de recherche qu'elle a engagés, et des résultats des travaux de nombreuses équipes internationales travaillant sur des milieux analogues. La sorption sur les surfaces argileuses est le mécanisme dominant, elle apparaît peu affectée par la variabilité spatiale de la minéralogie. La dépendance aux conditions géochimiques (pH, Eh, ions compétiteurs) est également bien comprise.

L'Andra continue de soutenir les travaux de développement de bases de données thermodynamiques, notamment la consolidation de l'ensemble des constantes jusqu'à 80°C.

## MIGRATION DES RADIONUCLÉIDES

Pour modéliser la diffusion dans les différents milieux poreux du stockage (matériaux anthropiques dégradés, Cox altéré, Cox sain) l'Andra utilise en principe pour chaque espèce et milieux trois paramètres expérimentaux, le coefficient de diffusion effectif  $D_e$ , la porosité apparente et le coefficient  $K_d$  (excepté pour le césium), coefficient qui traduit la sorption d'une espèce indépendamment de sa concentration (dans le cas du Cs elle est prise en compte). Cette approche est classique pour évaluer les distances de déplacement des éléments dans un milieu saturé et les temps mis à les parcourir. La concentration des éléments reste toujours très faible dans le Cox et dans le champ proche car elle est limitée par la solubilité d'un composé ( $C < C_{sat}$ ) ou les faibles taux de relâchement des colis. La migration d'un élément étant régie par celle des espèces chimiques qu'il forme dans l'eau porale des milieux solides traversés, la composition (présence de complexants comme les carbonates, sulfates, chlorures, silicates, d'espèces organiques, teneurs en cations naturels, ...), le pH et l'Eh de cette eau ainsi que la valeur de C jouent des rôles importants. En effet ils définissent la spéciation de l'élément. Tous les paramètres et la distribution des espèces sont sensibles à la température.

Les valeurs retenues par l'Andra pour le Cox sain et pour les radionucléides à vie longue classés en fonction de leur nature anionique ou cationique dans l'eau porale du Cox sont mesurées (labo, *in situ*) pour les espèces monochargées ( $Cs^+$ ,  $Na^+$ ,  $I^-$ ,  $Cl^-$ ) et souvent estimées pour les autres.

Pour cela, l'Andra se fonde sur plusieurs méthodes (séries incomplètes de valeurs connues, analogies, calculs selon les données de bases thermochimiques, effet de la température, profils naturels, ...). Elles rendent compte des comportements de certains éléments sur toute l'étendue de l'échelle spatiale allant du nanomètre (expériences de laboratoire sur les feuillets des minéraux argileux) à la centaine de mètres (expériences in situ dans le LSMHM et traceur naturel dans l'épaisseur du Cox). Toutes les valeurs sont conservatives.

Il en est de même pour les valeurs retenues pour les milieux altérés. Ces milieux sont bien caractérisés qu'il s'agisse de l'EDZ, du Cox au contact de béton et réciproquement, du Cox au contact de matériaux métalliques et de verre et des produits de corrosion correspondants, du Cox au contact de l'air, ... En effet la composition de l'eau interstitielle du Cox sain dépend de la minéralogie de l'argilite qui est connue de façon satisfaisante en trois dimensions. Ses principales caractéristiques mesurées dans la gamme 30-80°C permettent de comprendre : 1) la corrosion des bétons et des matériaux métalliques ainsi que les altérations consécutives des matériaux argileux à leur contact, 2) l'altération des matrices de confinement, 3) la diffusion des éléments et leur sorption, phénomènes qui ont été largement étudiés et décrits dans la littérature scientifique.

L'Andra peut ainsi estimer les corrections éventuelles à apporter aux paramètres du Cox sain pour en représenter l'altération, s'ils ne peuvent être directement mesurés. Notons que c'est finalement la barrière du Cox sain qui est l'ultime rempart, milieu pour lequel les valeurs des paramètres sont les mieux connues.



## ANNEXE VIII : LA PROCÉDURE D'INSTRUCTION DE CIGÉO

Le projet Cigéo est en premier lieu soumis aux règles administratives de création d'une installation nucléaire de base (INB) qui comprend trois étapes.

- La première étape optionnelle prévoit le dépôt d'un dossier d'options de sûreté (DOS). Le conseil d'administration de l'Andra a décidé en 2014 de réaliser cette étape et le DOS a été envoyé à l'ASN en avril 2016 marquant l'entrée dans la procédure de la future INB Cigéo. L'instruction de ce dossier sous l'égide de l'ASN s'est déroulée de juillet 2016 à octobre 2017.
- Une seconde étape aboutit à la remise de la demande d'autorisation de création (DAC), prévue courant 2019 suivie d'une période d'instruction d'une durée moyenne de trois ans qui peut être étendue à cinq ans si la complexité du dossier l'exige. L'instruction est réalisée par l'IRSN sous la conduite de l'ASN. La DAC donne lieu à un rapport de la Commission.
- Une troisième étape est finalisée par la publication du décret d'autorisation de création qui intègre les prescriptions de l'ASN, termine normalement l'instruction de la DAC.

La réglementation générale INB (décret 2007-1557 du 2 novembre 2017) prévoit les pièces et le contenu des pièces du dossier de DAC. Deux pièces importantes sont, d'une part, le rapport préliminaire de sûreté qui doit couvrir dans le cas d'un stockage les phases de fonctionnement et de long terme après fermeture et, d'autre part, le plan de démantèlement qui doit tenir compte du fait qu'une partie de l'installation ne sera pas démantelée. Une étude d'impact doit également être fournie.

Une fois le décret d'autorisation publié, le projet passe successivement par les phases de construction, d'exploitation puis de fermeture qui sont encadrées par le décret « procédure ».

La mise en service de l'INB est autorisée sur la base de compléments au dossier.

- Le rapport de sûreté procède de la mise à jour du rapport préliminaire de sûreté destiné à intégrer le retour d'expérience de la construction et à vérifier la conformité de l'installation par rapport aux prescriptions de construction définies par l'ASN. Ce rapport doit apporter la démonstration détaillée de la sûreté nucléaire. Il doit également décrire les conditions dans lesquelles seront réalisés les essais de démarrage et les procédures de contrôle.
- La mise à jour de l'étude d'impact.
- La fourniture de pièces complémentaires fixant les règles générales d'exploitation (RGE), le mode de gestion des déchets de l'installation et le plan d'urgence interne (PUI).

Lorsque l'INB est autorisée à être exploitée, le décret « procédure » prévoit les dispositions suivantes. Des évolutions de conception sont possibles et encadrées par la réglementation. Une mise à jour du rapport de sûreté constitue le dossier de fin de démarrage. Le contrôle de l'ASN continue au moyen d'inspections régulières.

Ces dispositions générales applicables aux INB doivent être adaptées et complétées pour tenir compte des spécificités de Cigéo.

Ainsi, sur le plan réglementaire, le dossier de DAC doit prendre en compte plusieurs facteurs.

- *La temporalité* : elle est exprimée par les différentes phases de la vie de Cigéo allant de la construction/exploitation jusqu'à la période post-fermeture où l'installation, une fois démantelée, fonctionne en mode passif.
- *La gouvernance* : elle doit garantir la participation des citoyens tout au long de la vie de l'installation ; c'est le rôle du plan directeur pour l'exploitation. Une première version a été fournie avec le DOS ; une version révisée accompagnera la DAC. Il est prévu par la loi que ce document soit mis à jour tous les cinq ans pendant la période d'exploitation avec une participation citoyenne.

- *La réversibilité* : elle doit permettre de réévaluer les choix en cours d'exploitation et de faire évoluer les solutions de gestion. Un « rapport réversibilité » sera joint à la DAC.
- *L'acceptation des colis* : leurs spécifications sont en cours de révision et seront jointes à la DAC.

A cette fin et compte tenu des spécificités de Cigéo, sont attendues à l'échéance du dépôt de la DAC les pièces complémentaires suivantes :

- le plan directeur d'exploitation (PDE) ;
- les spécifications préliminaires d'acceptation des colis ;
- le plan de développement de l'installation de stockage ;
- le rapport réversibilité.

## ANNEXE IX : EVOLUTION TECHNOLOGIQUE DE CONCEPTION DES ALVEOLES MAVL ET GALERIES

Les concepts technologiques du stockage évoluent encore. L'Andra intègre progressivement des optimisations après leur validation. Ces évolutions sont rendues possibles par l'amélioration de la connaissance du site et des processus. Elles vont généralement dans le sens d'une diminution des coûts, en conservant le même niveau de sûreté.

Les alvéoles MAVL et les galeries construits dans Cigéo auront des diamètres excavés de l'ordre de 10 m. Ils rentrent dans la catégorie des ouvrages souterrains de grande dimension. Un important programme de faisabilité a été réalisé par l'Andra dans le laboratoire souterrain de Bure au cours des 15 dernières années. Des galeries de diamètre croissant, allant jusque 9 m, ont été creusées ; différentes méthodes de revêtement/soutènement ont été étudiées. Ces expériences ont démontré le principe de constructibilité des alvéoles MAVL.

Les résultats principaux concernant la fracturation induite par la construction des galeries sont rappelés ci-dessous.

- Une zone endommagée (EDZ) est apparue autour de la galerie, elle comprend 2 zones : une zone fracturée où les fractures sont connectées et au-delà, une zone présentant peu de fractures qui sont de plus non connectées. La perméabilité de la zone connectée est importante ; elle est liée au réseau de fractures induites par le creusement, non à la matrice. Au-delà de la zone fracturée, la perméabilité décroît rapidement. L'extension de la zone perturbée est à peu près égale au rayon de la galerie.
- Seule l'orientation de la galerie par rapport à la contrainte horizontale principale joue sur la zone perturbée, elle influence la direction d'extension privilégiée.
- Une cicatrisation hydraulique des fractures a été observée dans l'UA.
- La fracturation est anisotrope. Le dimensionnement de l'ouvrage tient compte de l'impact de cette anisotropie sur le comportement mécanique de l'ouvrage, notamment en alignant la direction des ouvrages sur les directions principales.
- Les efforts sur le soutènement dépendent de l'interaction roche/structure (rigidité respective et délai de mise en œuvre).
- La convergence présente deux régimes : un régime de convergence rapide suivi d'une relaxation beaucoup plus lente. Plusieurs types de revêtements ont été testés pour minimiser les contraintes à long terme les affectant.
- La mise en place d'éléments compressibles (voussoirs compressibles) atténue significativement les déformations/contraintes à long terme dans les revêtements.

## LE COMPORTEMENT DES MATÉRIAUX (HA ET MAVL) ET LES INTERACTIONS AVEC LE CALLOVO-OXFORDIEN

### *Quartiers MAVL*

Les matériaux cimentaires seront très largement présents dans Cigéo : leur volume est de l'ordre de la moitié du volume excavé. Ils seront notamment utilisés pour les revêtements/soutènements, matériau de remplissage (espace entre le chemisage de l'alvéole HA et la roche hôte), mais aussi comme matrices de conditionnement des déchets MAVL. Ces ciments devront répondre à deux fonctions :

- une fonction mécanique, c'est-à-dire assurer la stabilité physique des éléments de structure (ouvrages et conteneurs) en phase d'exploitation ;
- une fonction chimique, c'est-à-dire assurer le maintien d'un environnement physico-chimique limitant la migration des radionucléides sur le long terme après fermeture, en particulier grâce au pH.

L'Andra a étudié, seule ou en collaboration avec d'autres groupes dans le monde, l'impact de diverses perturbations qui pourraient modifier les performances des bétons. Elle dispose d'un socle solide de connaissances sur ce sujet. L'évolution des composants cimentaires est décrite à partir :

- du comportement mécanique différé (retrait, fluage) en fonction des conditions hydriques et thermiques. L'intégration des déformations différées dans les modèles de comportement fait et fera l'objet de travaux de recherche jusqu'à la DAC ;
- de la carbonatation en milieu saturé ou non ;
- de la corrosion des armatures en acier ;
- de l'impact des rayonnements sur les comportements mécaniques et la corrosion ;
- des dégradations chimiques en milieu saturé en relation avec les conditions physico-chimiques imposées par le Cox ou certains déchets.

Plus généralement, les processus chimiques qui se développeront dans les matériaux cimentaires au cours des différentes phases du stockage sont connus. Ce sont les conditions aux limites imposées par les déchets ou le Cox qui contrôleront les temps caractéristiques et les extensions.

Un thème de recherche qui reste important pour l'Andra d'ici la DAC est la description des phénomènes couplés.

En présence de matériaux cimentaires, il convient d'examiner leur comportement, mais également les interactions avec le milieu encaissant. L'Andra a mené, au travers de nombreux programmes de recherche en interne ou en collaboration, des études à propos de la perturbation alcaline, i.e., de l'ensemble des phénomènes qui affectent le Cox du fait de la présence de ciment.

A nouveau, on note dans ce domaine, une très bonne maîtrise du sujet par l'Andra. Le développement de la perturbation alcaline est bien appréhendé. Les résultats obtenus montrent des effets limités (extension du panache alcalin de quelques mètres dans la zone fracturée). L'intensité et l'extension des transformations sont plus faibles dans les matériaux à base de bentonite. Les modifications attendues dans les argiles sont liées à leur potentiel de gonflement. A l'interface entre matériaux argileux et cimentaires, la perturbation alcaline peut conduire à une diminution de la porosité, et donc à une réduction de la circulation des fluides.

## ANNEXE X : HYPOTHÈSES INFLUENÇANT LE PLAN MASSE DE CIGÉO

### HYPOTHÈSES

Il s'agit de la configuration de référence (cible) de Cigéo pour le dossier de DAC fondée notamment sur les hypothèses suivantes.

- L'inventaire de référence comprend les déchets produits et à produire pour les installations existantes et celles déjà décidées (EPR de Flamanville).
- Tous les combustibles usés sont retraités et la durée de vie des réacteurs est de 50 ans (Hypothèse SR1 de l'inventaire national des matières et déchets radioactifs 2018).
- Les alvéoles MAVL sont construits suivant une section excavée unique de 85 m<sup>2</sup> de (22 alvéoles en tout).
- Les alvéoles sont polyvalents et l'intérieur est adapté aux différentes formes de colis de stockage ou colis primaires MAVL.
- Le quartier pilote HA0 comprend les déchets HA UMo de La Hague (environ 800 colis ; 19 alvéoles) et les alvéoles ont une longueur de 100 m.
- La longueur des alvéoles HA1/2 est de 150 m.
- Le dimensionnement thermique garantit la préservation des propriétés favorables du Callovo-oxfordien : inférieur à 90°C maximum dans le Callovo-oxfordien et vérification de l'absence de fracturation par chargement THM avec un critère de fracturation prudent pour le quartier pilote HA0.
- Le stockage direct de certains déchets MAVL est pris en compte (5 alvéoles).

### CAS DES BOUES BITUMINÉES

S'il est décidé de les stocker dans Cigéo, l'hypothèse prévoit que les boues bituminées sont stockées de façon identique à celle décrite dans le dossier d'orientation de sûreté de Cigéo.

67

### EVALUATION DES ALÉAS

Si le stockage direct de certains déchets n'était pas autorisé, il faudrait 2 alvéoles de plus.

Si les boues bituminées devaient être stockées dans des alvéoles renforcés, il faudrait 2 alvéoles en plus.

Dans un cas extrême, l'Andra estime que le nombre d'alvéoles passerait de 22 à 26 ce qui amènerait l'emprise de la zone MAVL de (1 km x 1,3 km) à (1,1 km x 1,3 km).

### EVOLUTIONS MAJEURES DE CIGÉO

Comme conséquence des hypothèses sur la configuration de référence, les évolutions majeures qui sont prises en compte dans l'APD concernent les points suivants.

- *Le plan de masse et les méthodes de construction du stockage* : l'implantation générale en trois quartiers de stockage borgnes assurant le regroupement dans un secteur central restreint de l'arrivée des liaisons surface-fond est conservée. L'ouvrage complet comprend un quartier HA0 de 19 alvéoles de 100 m de long, un quartier MAVL incluant 22 alvéoles de 500 m de longueur utile, une zone de soutien logistique (ZSL), un quartier HA1/2 rassemblant 916 alvéoles longs de 150 m. Dans un souci de maximiser la sécurité des chantiers, les descenderies et les galeries d'accès au quartier MAVL sont creusées au tunnelier en une seule phase et les alvéoles MAVL ainsi que les galeries d'accès aux zones HA sont réalisés au tunnelier à attaque ponctuelle. Seuls les ouvrages concernant les zones ZSL, HA0, MAVL et bien sûr les liaisons surface-fond seront construits en

première tranche. La construction du quartier HA1/2 est reportée en tranche ultérieure de façon à être en mesure de recevoir les premiers colis vers 2070.

- *Le quartier HA au nord de la Zira* : l'innovation principale est l'allongement des alvéoles à 150 m, ce qui permet de réduire le linéaire de galeries d'accès sans changer le critère de dimensionnement thermo-hydro-mécanique et de favoriser les transferts par diffusion via le Cox et de limiter les transferts par les ouvrages du stockage. La faisabilité d'une telle extension a été démontrée en laboratoire souterrain. Le quartier HA1/2 recevra des déchets vitrifiés MAVL et une partie des colis HA0, peu exothermique, qui serviront d'intercalaires entre les déchets HA1/2 afin d'y limiter la charge thermique. Du même coup l'extension du quartier HA0 à réaliser en première tranche s'en trouvera réduite.
- *Le quartier MAVL* : cette zone subit une évolution majeure. La section excavée des alvéoles passe à 85 m<sup>2</sup> ce qui a pour conséquence de ramener d'une cinquantaine à vingt-deux leur nombre et de diviser par deux l'emprise totale de la zone. Les conséquences de cette optimisation sont importantes : un seul type d'alvéole creusé au tunnelier à attaque ponctuelle pour l'ensemble des colis MAVL, creusement des galeries d'accès au tunnelier en une seule boucle permettant de reconnaître, dès la Phipil, la totalité du périmètre de la zone MAVL. Enfin, l'Andra retient à présent la possibilité du stockage direct de certains colis primaires. Cela concerne environ 30 % des déchets MAVL qui seront stockés dans 6 alvéoles sur un total de 22.

## ANNEXE XI : EXEMPLE DE DIMENSIONNEMENT D'OUVRAGES DE CIGÉO

La démarche structurante associant conception innovante et l'enrichissement du socle de connaissances est illustrée par les exemples suivants concernant les alvéoles MAVL.

### LE DIMENSIONNEMENT THERMIQUE D'UN ALVÉOLE MAVL

Le dimensionnement thermique d'un alvéole de stockage de colis MAVL moyennement exothermiques (CSD-C) relève de plusieurs contraintes de dimensionnement. Ainsi, l'arrangement des colis de déchets est contraint par plusieurs exigences de respect des limites de fonctionnement des matériaux, telles que des seuils de température :

- 90°C au sein de la roche, justifié par le besoin de maintenir les propriétés favorables du Callovo-oxfordien ;
- 70°C au moment de l'arrivée de l'eau sur les déchets justifié par le besoin de rester dans le domaine où le comportement des radionucléides dans l'eau est bien caractérisé ;
- 65°C, en phase d'exploitation, au sein des éléments de béton que justifie le souci d'éviter un endommagement thermique ou des transformations physicochimiques susceptibles d'altérer les capacités de confinement et de tenue mécanique du béton ;
- 80°C en situation incidentelle au sein des bétons de structure ou de confinement (colis), admissible jusqu'à une durée d'une dizaine de jours.

A ces exigences spécifiques s'ajoute la vérification par les maîtres d'œuvre des règles de l'art du génie civil, c'est-à-dire du caractère acceptable, au sein de l'ouvrage, des contraintes mécaniques que produisent, en particulier, les gradients thermiques générés. L'Andra privilégie enfin une dissipation passive de la puissance thermique des colis, en configuration nominale de stockage, sans avoir recours à la ventilation.

L'ensemble des simulations thermiques réalisées montre que l'exigence des 65°C dans les éléments en béton, en situation nominale, est le critère enveloppe dimensionnant.

### LE DIMENSIONNEMENT MÉCANIQUE DES REVÊTEMENTS D'ALVÉOLE MAVL

En matière de dimensionnement mécanique, l'objectif de conception porte sur différentes exigences :

- pour tous les ouvrages, il est d'abord recherché un objectif de dimensionnement pour une durée de service de l'ordre de 120 ans couvrant la période d'exploitation de Cigéo ;
- pour les ouvrages participant de la performance de sûreté à long terme, tels que les alvéoles MAVL et les segments de galerie MAVL devant accueillir les scellements, des exigences supplémentaires s'ajoutent, concernant la limitation et la maîtrise dans le temps de la zone fracturée connectée (EDZ).

Ces deux exigences sont caractérisées par différents critères : pour la première, ce sont des dimensions de structure conformes aux standards de faisabilité industrielle, ainsi que des états de contraintes et de déformations à maintenir dans le domaine de fonctionnement attendu ; pour la seconde, ce sont des caractéristiques de l'EDZ à ne pas dégrader, telles que l'étendue de l'EDZ ou son augmentation de perméabilité, du fait de son importance pour la sûreté après fermeture du stockage.

La démarche de dimensionnement consiste ainsi à rechercher le bon compromis entre deux stratégies antagonistes qui concourent à l'atteinte de ces exigences :

- l'une consistant à bloquer les convergences du terrain afin de limiter l'EDZ ;
- l'autre privilégiant la formation par convergence d'une zone plastique absorbant les contraintes et permettant un fonctionnement en deçà des limites de rupture de soutènements/revêtements d'épaisseur raisonnable.

La configuration de référence de Cigéo retient, pour l'ensemble des descenderies et galeries de liaison MAVL, un creusement mécanisé par tunnelier accompagné de la pose de voussoirs à l'avancement. Ceux-ci intègrent une couche de matériau compressible à leur extrados permettant une décompression contrôlée du massif. Ce dispositif innovant a été développé par l'Andra.

L'Andra a motivé tout d'abord ce choix de dispositions constructives par plusieurs arguments, dont l'amélioration de la sécurité du chantier et une plus grande rapidité de réalisation. L'intérêt d'une telle solution constructive était aussi, selon l'Andra, d'accommoder une partie de la convergence des massifs excavés, avec une meilleure gestion des incertitudes et des marges de dimensionnement. Il fallait donc confirmer un tel choix par un programme de recherche qui a permis d'aboutir à de nouveaux résultats :

- en premier lieu le suivi des ouvrages du Laboratoire Souterrain et la réalisation d'une nouvelle galerie au tunnelier à attaque ponctuelle avec pose à l'avancement de voussoirs compressibles ont confirmé la faisabilité de cette disposition constructive innovante ;
- les simulations numériques ont permis de préciser les marges de dimensionnement, c'est-à-dire les marges séparant le domaine de fonctionnement nominal de l'ouvrage de son domaine critique (à la rupture).

Ces recherches ont donc démontré le rôle positif des revêtements compressibles (atténuation de l'anisotropie de contraintes initiales de la roche, limitations de la concentration des déformations dans les voussoirs et dans l'EDZ du fait de la sensibilité au fluage).

Elles ont aussi apporté une évaluation complémentaire des marges de dimensionnement : le calage des modèles sur les données issues des convergences mesurées à court terme surestime de 15 à 20 % le comportement prédit à l'horizon de la durée de service de Cigéo par rapport à un calage sur les convergences mesurées en régime plus « établi » (c'est-à-dire entre 40 et 100 jours). Il est donc le plus pénalisant pour le dimensionnement.

En caractérisant l'évolution des ouvrages et de l'EDZ, en profitant du retour d'expérience de la Phipil, ces études devraient permettre *in fine* de confirmer le domaine de fonctionnement des ouvrages de soutènement, d'améliorer les stratégies de surveillance et, pour les alvéoles MAVL, de vérifier que la récupérabilité des colis reste possible en phase d'exploitation.

## ANNEXE XII : LES AXES DE R&D POUR LA DAC

### AXE 1 : CONCEPT HA

Les alvéoles HA sont des micro-tunnels borgnes montants (pente de 1 à 2 %), orientés suivant la contrainte horizontale principale, de 100 m de long pour le quartier HA0 et de 150 m pour les quartiers HA1 et HA2. Ils sont équipés en guise de soutènement d'un chemisage en acier destiné à faciliter la mise en place des colis HA pendant la phase d'exploitation et leur retrait pour une éventuelle récupération.

Un matériau de remplissage (ciment bentonitique) est injecté en extradados du chemisage, *a priori* à partir du fond de l'alvéole. Ce matériau a pour vocation de renforcer la tenue mécanique en limitant la corrosion par effet de neutralisation de la perturbation acide transitoire liée à l'oxydation des pyrites de l'argillite.

Les expériences menées dans le laboratoire souterrain de Meuse-Haute Marne ont permis de consolider la technique de creusement des alvéoles HA. Une campagne de démonstrateurs d'alvéoles HA est prévue de 2019 à 2024 dans le futur chantier de la zone 4 du laboratoire souterrain.

L'Andra a mené une analyse à la fois expérimentale et par modélisation informatique de la déformation des alvéoles. Un dispositif de mesure original de la déformation par fibre optique a été déployé. Des expériences menées dans certaines conditions, par exemple avec des alvéoles de 60 m ou encore des colis à 8 patins, contribuent à la démonstration de la récupérabilité des colis.

De nombreuses études ont également été menées sur la corrosion des composants métalliques de l'alvéole HA (conteneur et chemisage) depuis 15 ans. Les résultats sont les suivants :

- Les cinétiques de corrosion sont décroissantes en milieu anoxique, d'où l'atteinte de vitesses faibles de corrosion.
- Un ciment bentonitique a été ajouté en extradados pour éviter les vides et favoriser la protection de l'acier en limitant les vitesses de corrosion.
- L'influence de certains facteurs (rayonnements, oxygène, chimie, contraintes mécaniques) est minimisée du fait des choix de conception.

Rappelons que ces études sont indispensables pour démontrer dans la DAC la faisabilité du stockage des HA, avec les techniques actuelles. Cependant, la mise en œuvre effective ne doit pas intervenir avant 2070. Suivant le concept de flexibilité qui guide la construction de Cigéo, des évolutions importantes sont hautement probables, pour tenir compte de la disponibilité des matériaux d'une part, mais aussi des progrès réalisés dans les domaines de la construction et des matériaux.

### AXE 2 : IMPACT THM DU QUARTIER HA

Les quartiers HA dégagent une importante quantité de chaleur pendant la phase thermique du stockage. L'élévation de température modifie le comportement hydraulique (surpression) et mécanique (contraintes en extension ou en cisaillement) de la roche hôte. Ces mécanismes sont fortement couplés. Les études et recherches doivent donner les éléments de justification du dimensionnement thermique du quartier, afin que les propriétés de confinement de la roche soient préservées.

Les résultats actuels intègrent la détermination des propriétés à partir de mesures sur des échantillons en laboratoire, des essais dans le laboratoire souterrain, et l'analyse du comportement en grand de formations argileuses sur des analogues géologiques. Ces résultats ont permis de mettre au point, de qualifier et valider des modèles numériques couplant processus

thermiques, hydrauliques et mécaniques. Ainsi, des expériences ont été menées au laboratoire souterrain pour simuler les comportements en champ proche et champ lointain ; le modèle reproduit correctement le comportement en pression et température. Par ailleurs, l'analyse montre qu'une loi de comportement mécanique complète (poro-élasto-plastique) est indispensable pour représenter le rôle de la zone endommagée au voisinage de l'alvéole, alors qu'une loi plus simple (poro-élastique) est suffisante pour simuler le champ lointain.

Pour atteindre le double objectif de prévention de l'ébullition de l'eau porale et de fracturation de la roche, les caractérisations et calculs définissent un critère de température maximale de 90°C. Cette température est compatible avec les seuils de rupture en extension et en cisaillement.

Les calculs permettent également de hiérarchiser l'importance de la valeur des propriétés des roches sur le résultat. Ainsi, le module d'Young d'abord et la perméabilité ensuite, sont les deux paramètres principaux des modèles. Selon la valeur du module d'Young des effets antagonistes peuvent être constatés : une valeur faible (faible élasticité de la roche) limite la convergence autour des alvéoles, à l'inverse une valeur élevée absorbe plus efficacement les contraintes et limite l'endommagement.

Ces paramètres sont déterminés à différentes échelles : centimétrique sur des échantillons, décimétriques lors d'expériences au laboratoire, métrique pour les expériences *in situ*. A plus grande échelle, la variabilité spatiale de ces paramètres est évaluée de manière indirecte, par des méthodes géophysiques. Ainsi, l'analyse des données sismiques 3D haute résolution donne accès au module d'Young dynamique et à sa variabilité dans l'espace. Cette variabilité est ensuite appliquée au module d'Young statique intervenant dans les calculs THM.

Les travaux prévus par l'Andra visent en premier lieu à réduire les incertitudes résiduelles, par l'acquisition de données nouvelles, et par l'analyse de la réponse des modèles dans différentes configurations. Une nouvelle campagne de forage aura pour objectif la réduction de l'incertitude sur les paramètres THM, notamment le module d'Young, à l'échelle de la ZIRA. Un essai de grand volume de chargement THM sera conduit dans le laboratoire souterrain, en vue d'atteindre la fracturation et d'évaluer l'impact sur les propriétés hydromécaniques.

### **AXE 3 : PERFORMANCE HYDRAULIQUE EAU-GAZ DE L'EDZ ET DES MATÉRIAUX BÉTONS DE SCELLEMENT**

Les ouvrages de scellement prévus par l'Andra reposent sur un cœur de matériaux argileux remaniés contenu par des massifs d'appui en béton. Les revêtements au droit du remplissage argileux doivent être déposés. Pour les liaisons surface-fond, le scellement est réalisé dans l'unité silto-carbonatée (USC). Pour les scelllements de galeries horizontales, une option considérée consiste à pratiquer des saignées dans l'argilite, sur une profondeur correspondant à la zone fracturée connectée ; le remplissage par des matériaux argileux gonflants doit ainsi constituer une coupure hydraulique.

Les massifs d'appui des ouvrages seront constitués en béton. Leur fonction principale est la tenue mécanique et le confinement du noyau argileux, sur lequel repose la fonction étanchéité. Les données sur le comportement des bétons sont très vastes : elles proviennent de travaux initiés par l'Andra et d'autres institutions dans le cadre des recherches sur les stockages de déchets radioactifs, mais aussi d'une communauté scientifique très développée sur la thématique des ciments et bétons.

L'Andra envisage à ce stade l'utilisation de bétons bas-pH : faible alcalinité limitant la perturbation alcaline sur le noyau argileux, et faible chaleur d'hydratation limitant la température au cœur du massif et les problématiques de fracturation du béton par attaque sulfatique interne. Les bétons bas-pH sont d'une utilisation plus récente que les formulations plus traditionnelles ; ils bénéficient tout de même d'une quinzaine d'années d'études internationales sur leur rhéologie, leurs propriétés mécaniques et leurs interfaces avec d'autres matériaux.

L'évolution chimique aux interfaces avec les argiles continue à être étudiée, notamment pour ce qui concerne la détermination des phases minérales secondaires magnésiennes produites à cette

interface. L'utilisation des bétons bas pH dans le stockage reste très marginale (limitée aux seuls massifs d'appui dans les concepts actuels de l'Andra) : les incertitudes résiduelles sur le comportement des interfaces n'ont pas d'impact en grand sur les fonctions de sûreté demandées à ces massifs.

L'Andra a démontré sa capacité à manipuler de grandes quantités de béton bas-pH dans des conditions représentatives d'une mise en place en galerie. Les méthodes reposent sur des technologies classiques de génie civil. Les incertitudes résiduelles sur le comportement des interfaces n'ont pas d'impact sur les fonctions de sûreté puisque la fonction d'étanchéité n'est pas dévolue au massif d'appui mais au noyau argileux.

Les méthodes de mise en place des noyaux argileux ont fait l'objet de programmes d'études dédiés. Les choix technologiques et ajustements, qualifiés à l'échelle 1 sur une maquette de surface, visent à obtenir un remplissage du noyau le plus homogène possible, et à éviter les vides technologiques. Différentes options ont été étudiées. Le dépôt par convoyeur d'un mélange de pellets et poudre de bentonite est bien adapté au remplissage du noyau. La mise en place de briques de bentonite, éventuellement par robot, avec complément par poudre et pellets, est plus adaptée au remplissage des coupures hydrauliques. Enfin, la projection de shotclay (analogue du shotcrete, mais avec un matériau argileux) peut être utilisée en complément pour commencer ou finir le remplissage.

L'Andra a étudié le comportement de ces matériaux de remplissage. La phase de resaturation est déterminante : l'arrivée d'eau provoque un gonflement des argiles, ce qui a pour effet dans un premier temps, de boucher les vides technologiques et d'assurer un bon contact avec la roche, puis de créer, dans un second temps, une pression de gonflement qui s'ajoute aux contraintes dans le système. L'Andra a réalisé un très important corpus d'expériences au laboratoire afin de déterminer les relations entre composition du matériau, densité sèche du dépôt, pression de gonflement et perméabilité, effet de la composition de l'eau de resaturation (en particulier eau équilibrée avec le Callovo-oxfordien ou différentes formulations de béton). Sur une vaste gamme de matériau et de densité sèche, les perméabilités obtenues sont très faibles, inférieures à  $10^{-11}$  m/s.

Par ailleurs, la saturation de l'argile dans la roche au voisinage du scellement s'accompagne également d'un gonflement des minéraux argileux : ce gonflement conduit à une fermeture des fractures. Associée à la pression de gonflement engendrée par la resaturation du noyau, ce mécanisme diminue fortement la transmissivité du réseau de fracture dans la zone endommagée.

L'Andra dispose d'un socle de connaissances important et robuste, sur le comportement hydromécanique des bentonites et des argilites remaniées pendant la phase de resaturation.

L'Andra a prévu de poursuivre ses travaux sur les éléments de scellement. Des essais complémentaires sont prévus pour tester au laboratoire souterrain le remblai de galerie avec des argilites des verses, la réalisation de saignées, la dépose des voussoirs. La caractérisation du comportement hydromécanique des mélanges argileux doit se poursuivre : influence de la forme ou de certaines eaux de percolation. Des essais de longue durée sont par ailleurs encore en cours au laboratoire souterrain. Leurs résultats contribueront évidemment à alimenter le socle de connaissances.

#### **AXE 4 : LES GRANDS TRANSITOIRES MULTI-PHYSIQUES ET L'ÉQUILIBRE FINAL**

Cigéo est destiné à fonctionner pendant plus d'un siècle en mode exploitation ; ceci entraînera des perturbations notables du milieu environnant sur les plans hydro-thermo-mécanique et chimique. Certaines de ces perturbations seront encore actives pendant de longs laps de temps après la fermeture. Elles s'estomperont progressivement avec le temps jusqu'à obtention d'un nouvel état d'équilibre. La complexité des mécanismes élémentaires entrant en ligne de compte et leurs couplages engendrent des situations transitoires multi-physiques et multi-échelles dont les constantes de temps peuvent être très distinctes. Soucieuse d'en évaluer les conséquences sur la sûreté, l'Andra s'est attachée à caractériser et modéliser les différents domaines de fonctionnement de l'ouvrage aux différentes périodes de sa vie. La compréhension des différents

processus en jeu relève de bases phénoménologiques complexes que l'Andra a progressivement enrichies depuis plus de vingt ans grâce à des expérimentations en laboratoire de surface, en laboratoire souterrain et à des coopérations avec la communauté scientifique nationale et internationale. La difficulté de l'exercice est grande, car il faut à la fois appréhender les mécanismes physiques de base, tenir compte des couplages pertinents, identifier les paramètres et disposer des bons outils de calcul.

L'Andra identifie les mécanismes essentiels capables d'exercer des forçages sur le milieu en les classant d'après leur importance. Ils concernent en premier les rapports entre l'eau et le gaz au sein des composantes de l'ouvrage et dans l'argilite environnante.

Sur le plan des mécanismes de base, l'Andra relève les facteurs suivants comme ayant une influence prépondérante.

- La production de gaz, majoritairement de l'hydrogène, intervient essentiellement après fermeture du stockage sous l'effet de la corrosion anoxique des métaux mais également dès la phase d'exploitation par radiolyse dans les alvéoles MAVL. Cette production pourrait atteindre une quantité cumulée de plusieurs dizaines de milliards de moles réparties sur plusieurs centaines de milliers d'années, ce qui représente un flux moyen de l'ordre de  $5 \text{ m}^3$  de gaz par jour dans les conditions normales de pression et de température.
- La très forte pression d'entrée du gaz (5 à 6 MPa) dans les argilites saines saturées en eau rend le Cox non endommagé quasi imperméable au gaz et favorise en conséquence les transferts par les constituants de l'ouvrage dont les propriétés capillaires sont moins accentuées.
- La très faible diffusion du gaz dissous dans l'argilite limite les capacités d'évacuation du gaz par l'intermédiaire du Cox.
- les propriétés particulières des interfaces entre matériaux et de la zone endommagée constituent des voies de transfert privilégiées pour le gaz.

74

Le transitoire hydraulique-gaz à l'échelle du stockage est modélisé dans le but d'établir un historique d'évolution de la pression de gaz et de la saturation en eau dans les composants du stockage ainsi qu'une évaluation des fuites de gaz par les voies de transfert identifiées.

Les simulations réalisées au moyen du logiciel Though-MP atteignent un degré de représentativité élevé en distinguant l'architecture détaillée du stockage, ses composants multiples (Cox, EDZ, bétons, composants argileux et métalliques) et en prenant en compte les couplages multi-physiques majeurs (dégagement d'hydrogène, couplage diphasique eau/gaz, couplage thermo-hydraulique, diffusion/dissolution du gaz). Les simulations s'appuient sur un important corpus de connaissances sur les propriétés des matériaux constituant le stockage provenant d'expérimentation en laboratoire et *in situ*.

Les enseignements issus de la modélisation sont les suivants.

- Il existe un couplage fort entre la production d'hydrogène et la circulation de l'eau qui tend à resaturer le stockage, la pression du gaz s'opposant à l'arrivée de l'eau. Le temps de resaturation total est ainsi de plusieurs centaines de milliers d'années. Les durées maximales sont constatées dans la zone MAVL où le dégagement d'hydrogène est le plus persistant.
- La resaturation s'effectue en priorité dans les noyaux de scellement bentonitiques où s'exercent les plus fortes succions.
- La resaturation est la plus rapide dans les scellements des liaisons surface-fond qui sont en contact avec l'eau de l'aquifère oxfordien calcaire dès la fermeture du stockage.
- A l'intérieur de l'ouvrage la migration du gaz s'effectue essentiellement par l'intermédiaire de la zone de fracturation connectée (ZFC) de l'EDZ.
- La pression du gaz est maximale dans le stockage au bout de quelques milliers d'années. Elle varie entre 3,5 et 12 MPa selon le jeu de paramètres retenu pour le flux de production de gaz et les propriétés de la ZFC. Elle s'établit autour de 5 à 6 MPa pour les valeurs médianes des paramètres.

- Lorsque la phase gazeuse a disparu, environ 30 % du gaz a migré par transfert diphasique vers l'aquifère supérieur par l'intermédiaire des liaisons surface-fond et 70 % par diffusion sous forme dissoute à parts égales dans l'encaissant argileux supérieur et inférieur.

Une fois le transitoire hydraulique-gaz résorbé, la phase gaz exprimée a disparu et l'ouvrage complètement resaturé évolue en fonction des conditions aux limites hydrogéologiques régionales et des propriétés hydrodynamiques locales des composants du stockage. Les mouvements convectifs de l'eau susceptibles d'être drainée à travers le stockage et la diffusion sont les processus entraînant un transfert de radionucléides à long terme vers l'environnement aquifère. Ce mode de fonctionnement n'est atteint qu'au bout de quelques centaines de milliers d'années, temps nécessaire à la resaturation complète.

L'Andra pointe les éléments influençant le mouvement de l'eau dans cet état final :

- la très faible perméabilité du Cox ( $10^{-14}$  à  $10^{-13}$  m/s) homogène sur la Zira ;
- le faible gradient de charge hydraulique vertical engendré par les aquifères encaissants de part et d'autre du Cox ;
- l'existence d'une surcharge hydraulique dans le Cox, d'une cinquantaine de mètres au milieu de la couche, dont l'origine (donc le rôle) n'est pas identifiée avec certitude ;
- la perméabilité plus élevée de deux à trois ordres de grandeur que celle du Cox des composants internes du stockage qui favorise un drainage par les liaisons surface-fond ;
- l'architecture globale du stockage en quartiers borgnes associés à un regroupement centralisé de la base des liaisons surface-fond.

L'Andra réalise des simulations hydrauliques tridimensionnelles en régime permanent du stockage en grand, en individualisant l'ensemble des alvéoles, galeries et liaisons surface-fond et en tenant compte des perméabilités des différents composants. Ces simulations mettent en évidence :

- un débit d'eau drainé par les liaisons surface-fond de quelques litres à quelques dizaines de litres par an avec une contribution hydraulique venant principalement du quartier MAVL ;
- des vitesses de l'eau très faibles (quelques dixièmes de mm par an) au sein des composants du stockage. Ces vitesses sont augmentées de deux ordres de grandeur en cas de défaillance des scellements. Ceci a pour conséquence que le transfert de solutés à partir du stockage s'effectue essentiellement par diffusion à travers le Cox.



## ANNEXE XIII : BITUMES : ECHAUFFEMENT DES COLIS BITUMES – DONNÉES ACTUELLES

### DONNÉES SCIENTIFIQUES SUR LE BITUME

Les données de l'Andra sur les bitumes et enrobés bitumineux sont celles connues en 2013 (caractéristiques chimiques et microstructurales, radiolyse, rhéologie, dégradation sous eau) [Référentiel des colis HA-MAVL, tome 3, CG.RP.ASCM.12.0026]. Le bitume 70/100 utilisé pour produire les enrobés bitumineux se ramollit vers 40 °C, devient fluide vers 100 °C et très fluide vers 140°C. La pyrolyse, qui est une lente transformation du bitume en gaz, en présence ou non d'air, commence vers 200 °C. L'auto-inflammation du bitume nécessite de dépasser 300 °C en présence d'air mais le point éclair est vers 230 °C. Il est établi que le bitume a une faible capacité calorifique, une faible conductivité thermique et une faible diffusivité thermique qui freinent la propagation de la chaleur en son sein.

Ces données sont valables pour les enrobés bitumineux fraîchement préparés dont la concentration en sels est en moyenne 50 % mais celle-ci présente des variations très importantes dont il faut tenir compte.

Pour la démonstration de sûreté de Cigéo, l'Andra a retenu la température de 180°C à ne pas dépasser pour éviter pyrolyse et inflammation des enrobés bitumineux en situation accidentelle. En situation normale les colis seront à 30 °C. En situation incidentelle l'Andra fixe la limite de température des colis à 50°C.

### DONNÉES SCIENTIFIQUES SUR LE COMPORTEMENT DES ENROBÉS SOUMIS À UNE ÉLÉVATION DE TEMPÉRATURE

Le CEA a produit fin 2014 un ensemble de 15 notes techniques référencées dans une note de synthèse [CEA/DEN/DADN DO 103 (23/3/2013) - Programme de R&D CEA-Andra-Orano-EdF sur le comportement des colis de boues bitumées] faisant état des études entreprises suite à la demande de la CNE2 de 2012.

Ces notes décrivent les expériences et contiennent toutes les données ouvertes sur le comportement des enrobés bitumineux soumis à diverses sollicitations thermiques.

S'il existe d'autres documents complémentaires issus du CEA, la Commission n'en a pas eu connaissance.

Le CEA a établi des modèles donnant les caractéristiques des épisodes thermiques (énergie dégagée, températures de début, du maximum et de la fin des épisodes, puissance dégagée) que connaissent des enrobés bitumineux soumis à des flux de chaleur en fonction de la composition chimique des enrobés ainsi qu'un modèle de transfert de chaleur dans les enrobés.

En bref, les expériences de microcalorimétrie différentielle sur des échantillons de 500 mg ont montré l'existence de réactions exothermiques, impliquant souvent les nitrates, qui débutent dans l'ensemble vers 120 °C et sont plus intenses vers 180 °C et au-delà. Au maximum elles dégagent environ 0,5 mW/g. Ces données résultent d'interprétations statistiques des caractéristiques de très nombreux thermogrammes. Certains montrent des débuts de réactions exothermiques en dessous de 100 °C. Les expériences de transfert de chaleur sur des lots de 2 kg jusqu'à 400 °C ont montré que la chaleur se propage par conduction tant que la température imposée ne dépasse pas 150 °C, puis par convection au delà. L'énergie dégagée localement par les réactions exothermiques ne conduit pas à un auto-échauffement généralisé.

Sur la base de ses modèles le CEA a extrapolé le comportement d'un colis bitume de 200 kg en réponse à une augmentation de température externe.

Les expériences de tenue à un feu conventionnel (courbe Iso R834, four 945 °C , exposition 1 h) ou réel (puissance 1,3 MW, 1 h) sur des colis de stockage échelle 1 (4 colis primaires et colis de stockage) ont montré que la température de paroi des colis primaires bitume n'a pas dépassé 150 °C et que le bitume n'était pas altéré.

Comme la Commission l'a fait remarquer dans son rapport n°11 (page 39 et annexe IX, page 97) toutes les données quantitatives sur le comportement des enrobés bitumineux en réponse à une élévation de température, due soit à un auto-échauffement ou à un apport externe de chaleur ou bien à leurs effets combinés, concernent des enrobés synthétiques inactifs fraîchement préparés et ne contenant donc pas de gaz de radiolyse.

La Commission a eu connaissance, en 2017, de travaux en cours conduits par le SCK-CEN sur l'inflammation d'échantillons d'Eurobitumes frais, âgés et saturés de gaz de radiolyse ainsi que d'échantillons d'Eurobitumes radioactifs prélevés dans des colis bitume âgés de 13 ans. Il s'agit de mesures portant sur les points éclairs et d'auto ignition. La Commission attend avec intérêt les résultats de ces études.

## **DONNÉES SUR LES COLIS BITUME DÉJÀ PRODUITS**

Il existe de nombreuses données sur les colis réels de déchets, c'est-à-dire contenant des enrobés radioactifs. Elles proviennent des chroniques de préparation des colis qui ont permis de définir les fourchettes de compositions chimiques des enrobés bitumineux inactifs utilisés pour les expériences. Les autres données sont obtenues lors de la reprise des fûts à Marcoule pour reconditionnement avant entreposage dans l'EIP. Il s'agit de mesures radiologiques non destructives et pour 5 % des colis de mesures sur des échantillons d'enrobés prélevés, donnant compositions chimiques et radiochimiques.

Leurs compositions sont conformes aux prévisions faites d'après les chroniques de préparation et, selon le CEA, l'examen des colis analysés ne montre pas de sédimentation des sels enrobés.

78

La majorité des données concerne en fait des colis bitume FAVL, les premiers qui ont été repris pour reconditionnement et qui sont entreposés dans l'EIP (environ 11.000 à ce jour). La reprise des colis MAVL destinés à Cigéo est programmée pour plus tard.

La Commission n'a pas connaissance de rapports du CEA concernant ces données

## **RAPPEL DE L'ÉVALUATION DE LA CNE2 SUR CES DONNÉES**

La Commission a analysé dans son rapport n°9 (2015, annexe IX, page 97) les résultats présentés par le CEA fin 2014 et a considéré qu'ils démontraient la robustesse des colis bitume face à un incendie d'une heure et l'inertie des enrobés bitumineux dans les conditions réalistes des expériences de tenue au feu.

Dans son rapport n°10 (2016, annexe V, page 69) suite à quelques compléments apportés par le CEA sur l'interprétation des thermogrammes des enrobés bitumineux, elle a attiré l'attention sur de possibles modifications de leurs propriétés chimiques et physiques sur la longue durée de l'exploitation de Cigéo.

Dans son rapport n°11 (2017 annexe XIII page 94), suite à des études du CEA sur la rhéologie d'enrobés vieillissés par irradiation (viscosité et dynamique des bulles d'hydrogène), la Commission a recommandé de faire, à défaut d'expériences sur des échantillons réels de déchets radioactifs, des expériences sur des enrobés simulés afin de vérifier si les réactions exothermiques sont découplées de la présence d'hydrogène lors d'une montée en température et dans quelle mesure une répartition inhomogène des sels accélérerait les réactions exothermiques (page 39). Une telle répartition pourrait provenir du dégagement d'hydrogène ou d'une sédimentation lors d'une diminution de viscosité des enrobés liée à leur histoire.

## LES POSITIONS DES DIVERS ACTEURS SUR LE DOS

### *Position de l'Andra dans le DOS*

Pour la démonstration de sûreté de Cigéo, l'Andra a retenu la température de 180°C à ne pas dépasser pour éviter pyrolyse et inflammation des enrobés bitumineux en situation accidentelle. En situation normale les colis seront à 30 °C. En situation incidentelle l'Andra fixe la limite de température des colis à 50°C. Ces choix s'appuient sur les données scientifiques relatives au bitume et aux enrobés bitumineux disponibles à l'issue des études et recherches entreprises jusqu'à 2014 rappelées ci-dessus.

### *Analyse du DOS par la CNE*

Dans le rapport n°11 et dans son analyse du DOS, la Commission a considéré que les études menées par le CEA conjointement avec les producteurs et l'Andra apportaient des informations importantes et crédibles s'agissant du stockage des bitumes. Les essais ont aussi montré que des températures très élevées n'affectaient pas l'intégrité des colis de stockage pendant au moins une heure selon la norme ISO 834. Dans ces conditions expérimentales, les températures observées dans les colis primaires écartent la possibilité d'une inflammation de ceux-ci due à une source de chaleur externe. Toutefois, la Commission ne dispose pas d'éléments permettant d'évaluer la propagation d'un incendie à un alvéole entier, dans des conditions représentatives du stockage, si un colis devait prendre feu.

### *Position du CEA*

Sur la base des modèles de comportement des enrobés face à une élévation de température (voir ci-dessus), le CEA conclut qu'aucune inflammation de colis ne peut se produire, ni qu'aucun feu ne peut se propager dans les conditions de manutention et de stockage des colis, telles que prévues par l'Andra. Pour le CEA tout échauffement du colis par l'extérieur ne conduit que très lentement (un à plusieurs jours) à une élévation de la température au cœur de l'enrobé bitumineux, au plus égale à celle imposée en paroi. Celle-ci peut être ajustée par le colis de stockage, bien en dessous de 180 °C. Pour atteindre 180 °C par échauffement interne il faudrait que les réactions exothermiques dégagent des quantités de chaleur avec des puissances sans commune mesure avec celles qui ont été mesurées. Le cumul des deux sources de chaleur, externe et interne, peut être modélisé. Le CEA étudie plusieurs scénarios en présence ou en absence d'oxygène (nécessaire pour alimenter un feu de bitume) en considérant des départs de réactions exothermiques dès 50 °C. Pour l'instant, le CEA considère que tout risque de perte de confinement est écarté.

Un dossier devait être prêt pour fin 2017 pour consolider cette position.

### *Position de l'IRSN dans son analyse du DOS*

L'IRSN a fait connaître sa position vis à vis de la réactivité des enrobés bitumineux et du comportement d'un colis bitume lors d'une élévation de température jusqu'au déclenchement d'un incendie dans le rapport IRSN n° 2017-00013. Celui-ci a été communiqué à la Commission. L'IRSN a aussi donné un avis sur ces sujets à propos de la tenue en 2016 d'une CSLUD (Commission Sûreté Laboratoire et Usine Défense) sur les colis bitume de Marcoule. Cet avis n'est pas directement connu de la Commission, les documents sur lequel il se fonde non plus.

L'IRSN émet des réserves à propos des résultats de l'étude CEA de 2014 sur plusieurs points : représentativité des bitumes utilisés pour les essais, traitements statistiques des données des expériences de micro calorimétrie qui conduisent à ne pas considérer la possibilité de réactions exothermiques à faible température, non prise en compte de la variabilité des propriétés colis due aux phénomènes de radiolyse (montée des bulles, modification microstructurales possibles). En conséquence selon l'IRSN les modèles du CEA sont discutables ainsi que les conséquences que l'on peut en tirer.

Par ailleurs l'IRSN fait remarquer que les colis bitume de Marcoule produits avant 1990, l'ont été dans des conditions d'assurance qualité peu fiable et que l'hétérogénéité initiale de l'enrobé a pu s'accroître avec le temps (radiolyse, sédimentation). L'IRSN considère qu'on ne peut écarter un emballement de montée en température dû à des réactions exothermiques auto-entretenues à des températures bien inférieures au seuil de 180 °C, par exemple de l'ordre de 40/50 °C.

Enfin, au-delà de considérations critiques sur les moyens de prévention et de lutte contre un incendie indiqués par l'Andra, l'IRSN n'écarte pas, au cas où un colis bitume serait le siège d'un emballement thermique, la propagation de l'onde thermique d'un colis de stockage à des colis adjacents. L'IRSN a conduit à cet égard des calculs préliminaires (annexe T13 du rapport IRSN précité) qui montrent que les délais de propagation pourraient être de quelques jours selon les scénarios et qu'un incendie dans Cigéo pourrait porter un colis de bitume dans son colis de stockage à une température critique de perte de confinement en quelques heures.

Ces considérations conduisent l'IRSN à recommander d'examiner les possibilités de neutraliser la réactivité chimique des colis bitume, rejoignant ainsi les prescriptions du PNGMDR (arrêté du 23 février 2017) ou de modifier le concept de stockage des colis.

L'IRSN fixe comme limite le dépôt de la DAC pour statuer (mi-2019), le PNGMDR fixe fin 2019 pour avoir un dossier complet sur le sujet (article 48 du décret PNGMDR).

### *Position des GP sur l'analyse du DOS*

Des GPU et GPD ont émis en mai 2017 un avis reprenant les considérations de l'IRSN. Cet avis fait état d'un risque d'emballement par réactions exothermiques qui pourraient conduire à un rejet important d'activité dans l'environnement. Les deux voies de gestion indiquées par l'IRSN sont retenues : développement à une échelle industrielle d'un procédé assurant la neutralisation de la réactivité chimique des enrobés ou évolutions de concept du projet permettant d'exclure le risque d'emballement exothermique en cas d'incendie ou d'élévation de température.

80

L'état actuel du dossier ne permettant pas de trancher, les GP estiment qu'un processus doit être mis en place pour aboutir à une décision.

### *Position de l'ASN*

L'ASN a émis son avis définitif le 15 janvier 2018.

Celui-ci se fonde sur l'analyse de l'IRSN et sur l'avis des GP. Il fait état des incertitudes sur le comportement physico-chimique, thermique et microstructural des colis bitume en stockage, pouvant conduire à une élévation de température (situation incidentelle ou accidentelle) et considère que la conception actuelle du stockage ne permet ni de prévenir, ni de limiter les risques à un niveau acceptable en cas de réaction exothermique à l'intérieur d'un colis bitume.

Pour la gestion des colis bitume déjà conditionnés, l'avis rappelle l'alternative : développement à une échelle industrielle d'un procédé assurant la neutralisation de la réactivité chimique des colis ou évolutions substantielles des options de conception pour exclure le risque d'emballement de réactions exothermiques en cas d'incendie ou d'élévation de température.

Enfin il rappelle que les colis bitume ont fait l'objet de demandes d'études encadrées par l'arrêté du 23 février 2017, en particulier ses articles 46, 47 et 48.

La conclusion de l'avis ASN est la suivante : « L'ASN estime que la recherche de la neutralisation de la réactivité chimique des colis de déchets bitume doit être privilégiée. En tout état de cause, la caractérisation dans les meilleurs délais de ces colis par leurs producteurs est un préalable indispensable ».

## TRAITEMENT DES COLIS BITUME

La voie qui a été explorée par le CEA et dont la Commission a connu les résultats lors de l'audition du 22 janvier 2015 est l'incinération des colis bitume par torche à plasma suivie d'une vitrification des résidus.

L'IRSN a rendu un avis (avis n° 2016-00245 du 20 juillet 2016) sur le rapport PNGMDR 2013-2015 « d'Evaluation technico économique d'un procédé de traitement d'enrobés de boues bituminées par incinération/vitrification » qui est le seul document ouvert comportant des données scientifiques et techniques sur le sujet.

L'IRSN note les nombreuses difficultés soulevées par le CEA dans ce rapport pour l'industrialisation d'un procédé qui à l'échelle du laboratoire semblait donner satisfaction. Selon le CEA de nombreuses années de R&D seraient nécessaires pour lever les verrous et il juge que le prix d'une installation industrielle serait rédhibitoire. C'est la présence des sels qui complique la mise en œuvre du procédé. L'IRSN estime néanmoins que les études relatives à l'industrialisation d'un tel procédé doivent être poursuivies, en intégrant le cas échéant des pré-traitements chimiques.

A cet égard le CEA n'a pas conduit d'études. Seuls quelques essais d'extraction des sels après dissolution des enrobés bitumés dans un solvant organique, ont été conduits par le SCK/CEN belge.

Le projet de décret PNGMDR 2016-2018 (article 48) reprend la demande de l'IRSN de poursuivre les études et fixe à fin 2019 l'échéance finale pour une « évaluation technique, économique et de sûreté comparant les différents modes de traitement et de conditionnement envisagés pour les déchets bitumés ». Cette étude doit intégrer toutes les étapes de la gestion du déchet ainsi que l'impact des différents choix sur la conception et le dimensionnement de Cigéo : « transport, sûreté en entreposage et phase d'exploitation, impacts environnementaux, impact radiologique à long terme ».

Dans son rapport n°11 (annexe XIII page 94) la Commission note que les quelques essais du CEA, conduits pour l'essentiel entre 2003 et fin 2005, montrent que la difficulté essentielle du procédé est due à la présence des sels réfractaires, porteurs de la radioactivité, qui ne peuvent être totalement décomposés thermiquement qu'à très haute température. Le procédé serait très difficilement contrôlable. La maîtrise des bilans matières des nombreuses opérations nécessaires pour assurer le contrôle du procédé s'avère très difficile.



## ANNEXE XIV : PROGRAMME ASTRID ET MULTIRECYCLAGE EN RNR

La Commission a suivi et évalué dans ses précédents rapports la R&D que le CEA et les industriels ont réalisée depuis 2010. Comme il est indiqué dans le corps du rapport le projet Astrid est en cours de révision/redéfinition dans le cadre stratégique de la fermeture du cycle du combustible nucléaire avec la priorité de recycler U et Pu, la transmutation de Am étant considéré comme un axe de progrès.

Les dernières avancées du programme Astrid-600 MWe sont décrites dans ce qui suit.

### ASTRID 600 MWE

#### *Design du réacteur*

Le design du réacteur Astrid à la fin 2017 intègre : le SCE gaz, les derniers systèmes de manutention du combustible, de stockage du combustible, d'évacuation de la puissance résiduelle (actifs et passifs), du cœur et d'infrastructure du site et du génie civil. Le CEA a essentiellement travaillé en 2016-2017 sur le SCE gaz pour le mettre au même niveau de maturité que le SCE vapeur d'eau. Le choix des échangeurs de chaleur (2 échangeurs de 187 MWth à 8 modules d'échange sur chacun des 4 circuits secondaires) et du cycle thermodynamique (2 lignes comprenant chacune 1 turbine de 300 MWe, 3 compresseurs et 3 refroidisseurs) a été arrêté. Cela conduit à un rendement optimisé calculé de 37,8 %.

Le CEA a poursuivi, en parallèle à ces études, des essais expérimentaux afin de poursuivre la qualification de composants ou de sous-ensembles du réacteur à échelle réelle ou réduite. Cette R&D vise à qualifier les composants (passage sur l'échelle de TRL 5 à 6), à consolider les choix de conception et à fournir les outils de calculs qui accompagnent l'expérimentation. Elle a porté par exemple :

- 1) sur des composants du cœur : tests sur les barres d'arrêt à sustentation hydraulique, examen d'aiguilles de MOx déjà irradiées dans Phénix. Des échantillons de B<sub>4</sub>C qui entre dans la composition des aiguilles d'Astrid vont être irradiés pendant plusieurs années dans Bor 60 (deux mini aiguilles sont prêtes) et,
- 2) sur des équipements : essais d'endurance et de tenue aux chocs thermiques de la maquette de l'échangeur de chaleur sodium-gaz sur Diademo, débit et pilotage en tension et fréquence de la pompe électromagnétique à sodium sur la boucle Pemdyn. La qualification complète d'un assemblage demandera encore de longues expériences d'irradiation.

Le CEA a également avancé sur la fabrication des assemblages qui mettent en jeu de nombreux matériaux UPuO<sub>2</sub>, B<sub>4</sub>C MgO et aciers de plusieurs nuances. Plus de 600 pastilles MOx ont été préparées à Melox en 3 campagnes depuis 2015 selon le procédé classique de mélange de poudres UO<sub>2</sub> et PuO<sub>2</sub> ; à l'échelle du laboratoire de nouveaux procédés sont étudiés. Les structures microscopiques (taille et fraction massique des amas de Pu) ont été caractérisées. La préparation de pastilles de B<sub>4</sub>C et MgO est aussi maîtrisée. Quelques centaines de gaines munies de leur fil espaceur (acier15-15 AIM1) ont été réalisées dans des conditions industrielles. Enfin le CEA a engagé la reconstruction du tissu industriel pour la fabrication des tubes hexagonaux et des autres parties de l'assemblage. Un poste de montage automatique des aiguilles sur le pied de l'assemblage et des plateformes pour des études thermiques existent à Marcoule et Cadarache.

Le remontage d'ensemble d'ASTRID en configuration SCE Gaz ou SCE vapeur d'eau est à présent disponible au travers d'une maquette numérique 3D de l'ensemble du réacteur, de la salle des machines et des circuits et installations annexes. La numérisation est en cours d'extension vers la gestion complète du projet.

Les études sur les installations pour le cycle des matières d'Astrid ont été poursuivies. En 2016 l'option de l'implantation de l'AFC pour la fabrication des assemblages MOx Astrid (cœurs de démarrage et de montée en régime) a été prise. Les options sont en évaluation (adaptations des installations ou installations neuves) et les études de dimensionnement d'équipements sont en cours.

Les installations de traitement-recyclage actuelles pourraient répondre, sous réserve de certaines adaptations, aux premières phases de démonstration industrielle du cycle : retraitement et fabrication de quelques assemblages en plutonium issu de combustibles usés MOx REP et RNR. Quant aux installations pour la transmutation de l'américium (Atalante) elles ne peuvent servir que pour quelques grammes d'Am (échelle de l'aiguille). Pour passer à l'échelle du kilogramme il faudrait de nouvelles installations.

## SÉPARATION & TRANSMUTATION

La Commission a fait le point sur la R&D concernant la S&T dans son rapport n°11 (2017). Les dernières expériences concernent le programme Exam et les irradiations d'échantillons d'oxydes des séries UAmO<sub>2</sub> (U(1-x)Am<sub>x</sub>O<sub>2±δ</sub>). Il s'agit pour l'instant de valider et de qualifier le concept CCAm jusqu'à l'échelle d'une aiguille expérimentale. Les autres étapes pour aller vers la qualification d'un combustible sont à définir.

### *Examen d'échantillons irradiés*

Dans l'expérience Marios 4 mini-aiguilles de UAmO<sub>2</sub> à 15 % en Am avec des densités de pastilles de 92 et 87 % (de la densité théorique) et des porosités de 8 et 12 % ont été irradiées à 1000 et 120°C dans le HFR (2011-2012) à 300 JEPP. Les premiers examens non destructifs des échantillons (LECA/Cadarache) montrent une forte fragmentation des pastilles denses, des taux de fission de Am tels que calculés (50 %) et une bonne diffusion de He hors des oxydes (pas de gonflement, peu de He dissous).

Dans l'expérience Diamino, 6 mini-disques de UAmO<sub>2</sub> à 7, 14 et 15 % en Am avec des densités de pastilles de 97 et 85 % (de la densité théorique) et des porosités de 0,2, 1,6, 11 et 13 % ont été irradiés à 800°C dans Osiris (2011-2015) à 134 et 240 JEPP. Seuls quelques examens ont été réalisés qui confirment la fragmentation des disques d'oxydes denses.

Tous les examens des échantillons de Marios et Diamino devraient être terminés fin 2018.

S'agissant de l'expérience Marine, qui concerne le comportement d'oxyde UAmO<sub>2</sub> à 13 % en Am sous forme de pastille ou de sphérule, l'irradiation est terminée.

L'expérience AmBB-1 qui vise l'irradiation de mini-aiguilles d'oxyde UAmO<sub>2</sub> et de UAm métallique dans ATR est toujours en préparation. Le CEA doit préparer les échantillons d'oxyde avec l'Am extrait dans l'expérience ExAm.

Pour ces deux expériences le CEA envisage la poursuite des examens post-irradiation dans le cadre de collaborations internationales.

### *Expérience ExAm et suite*

Fin 2017 le CEA disposait de 8,3 g de AmO<sub>2</sub> à 15 % en Am (58,4 % de <sup>241</sup>Am et 40,9 % de <sup>243</sup>Am) obtenus par co-conversion d'oxalate U(IV)-Am(III) (calcination de l'oxalate sous azote à 750 °C). C'est l'aboutissement de l'expérience « ExAm intégrale » qui a commencé en 2010. Le procédé ExAm a été piloté pour obtenir de l'américium très pur (95,5 %) au détriment du facteur de récupération de Am et des facteurs de décontamination Am/Cm et Am/lanthanides.

Le CEA doit préparer maintenant entre 16 et 28 des pastilles d'oxydes d'Am (<sup>241</sup>Am ou Am du procédé ExAm) pour l'expérience AmBB-1. Ces pastilles, placées dans 4 aiguilles, seront

irradiées aux USA dans ATR à 800°C. Deux aiguilles contiendront de l'oxyde préparé par le procédé CRMP (Calcined Resin Microsphere Pelletizing).

Le Rex de ces années de R&D conclut à une trop grande complexité du procédé de séparation de l'américium. C'est la raison pour laquelle le CEA et 4 autres partenaires ont développé le procédé Euro-Exam, avec de nouveaux réactifs, dans le cadre du projet européen Saccsess. Le programme Geniors (GenIV Integrated Oxide fuels Reprocessing Strategies - 24 partenaires de 11 pays) lui a succédé début 2017 avec l'ambition de développer en 5 ans les procédés Euro-Ganex, I-Sanex et Euro-Exam, tous fondés sur les procédés du CEA.

### *RNR mode consommation de Pu*

Le CEA étudie les possibilités de consommation accrue de Pu à partir d'un cœur CFV iso-générateur en Pu de 1500 MWe. Un tel cœur est hétérogène à faible coefficient de vidange. C'est le cœur prévu pour Astrid. La démarche suivie est de type Capra. Elle consiste à diminuer la régénération de Pu. Il y a plusieurs possibilités en agissant sur le combustible (pas de U), l'assemblage (aiguilles inertes, modératrices ou absorbantes de neutrons) et le cœur (assemblages diluants ou absorbants) tout en conservant un faible effet de vidange, l'effet Doppler et la fraction de neutrons retardés. Le CEA opte pour l'approche la plus simple en introduisant des aiguilles modératrices ou un absorbeur de neutrons comme  $^{11}\text{B}_4\text{C}$  (MgO remplaçant  $\text{UO}_2$ ) dans les assemblages et des assemblages diluants dans le cœur (en acier). Cela change essentiellement les longueurs de cycles. La consommation de Pu pourrait atteindre 50 kg/TWhe.

## SCÉNARIOS DE DÉPLOIEMENT D'UN PARC DE RNR

Le CEA, Orano et EdF étudient depuis 2013 des scénarios industriels relatifs aux évolutions possibles du parc nucléaire ; la Commission en a rendu compte dans ses derniers rapports. L'approche consiste à développer des logiciels pour établir les bilans matières qualitatifs et quantitatifs des cycles ainsi que l'estimation de la nature et des quantités de déchets. Les résultats des calculs indiquent les modifications ou les réalisations d'installations du cycle qui seraient nécessaires pour mettre en œuvre les scénarios. Ces dernières sont ensuite confrontées aux réalités industrielles et économiques.

Le scénario central étudié jusqu'en 2015 concernait essentiellement l'utilisation de Pu et U issus des assemblages de combustibles usés  $\text{UOx}$  et  $\text{MOx}$  pour construire progressivement un parc de RNR à partir de 2040. Ce parc assurerait, vers la fin du siècle, une indépendance vis à vis de l'importation d'uranium naturel (palier D) en passant par la stabilisation de l'inventaire en Pu (palier C). Au palier D la transmutation de Am est possible si tous les RNR sont chargés en combustible  $\text{CCAm}$ . Dans cette vision la construction d'Astrid est achevée vers 2040. Les autres scénarios examinés portaient sur l'arrêt ou non du retraitement en REP et EPR, selon les hypothèses et la stratégie actuelle de monorecyclage.

Le CEA et les producteurs de déchets ont étudié depuis 2015 une variante du scénario central en considérant le réacteur Astrid comme un RNR de 600 MWe et le déploiement d'EPR éventuellement moxables à 30 %. Dans ce scénario deux RNR de 1 GWe seraient chargés en Pu issu de  $\text{MOx}$  REP vers 2080 et le palier D serait déployé au  $\text{XXII}^{\text{ème}}$  siècle. Dans cette variante Astrid n'est plus un démonstrateur du recyclage du Pu issu de  $\text{MOx}$  RNR et la transmutation de Am n'est pas envisagée. Les prévisions en terme de déchets à gérer jusqu'à la fin du siècle pour le scénario Astrid + 2 RNR et le scénario de monorecyclage en REP et EPR ne changent pas fondamentalement d'une option à l'autre : plus de déchets MAVL (20 %) et HAVL (10 à 40 % selon le conditionnement des PF et AM) avec des RNR.

La mise en œuvre des scénarios faisant appel aux RNR impliquerait d'importantes transformations/innovations dans les cycles des combustibles tant au niveau du retraitement que de la fabrication du  $\text{MOx}$  RNR (nouvelles usines). Le déploiement d'un parc de RNR de même puissance que le parc actuel n'est pas envisageable avant le prochain siècle.



## ANNEXE XV : LE MULTIRECYCLAGE EN REP

### ASSEMBLAGES CORAIL ET MIX

Le CEA, Orano et EdF ont repris les études sur la possibilité de multi-recycler U et Pu en REP et EPR, option qui avait été étudiée pour les REP du parc actuel avec des assemblages dits Corail (aiguilles de MOx- % Pu variable-U appauvri et aiguilles de UOx enrichi  $^{235}\text{U}$  fixé à 5 %) et Mix (aiguilles de MOx- % Pu fixé -U enrichi- $^{235}\text{U}$  variable), mais qui avait été abandonnée, avant la loi de 2006.

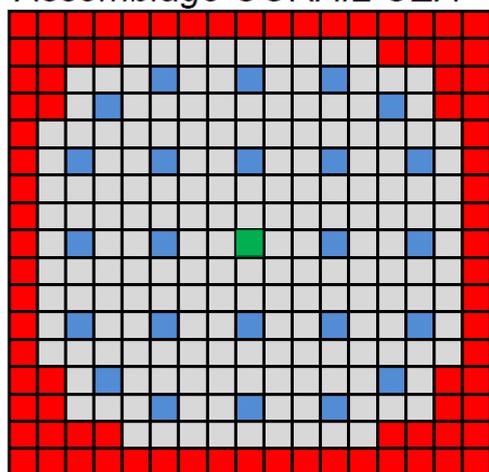
A cette époque on souhaitait augmenter le taux de combustion (TC) du combustible UOx jusque vers 70 GWj/t, consommer le plus possible de Pu et transmuter les actinides mineurs. Le multirecyclage du Pu en MOx (et de U en URE) apparaissait impossible pour des raisons opérationnelles multiples ayant essentiellement pour origine la mauvaise qualité isotopique du Pu du MOx REP usé après un monorecyclage. Il était difficile de compenser cette dégradation avec de l'uranium enrichi dans les assemblages Corail ou Mix pour exploiter les réacteurs en toute sûreté. Depuis EdF limite le TC des combustibles UOx et MOx à 45-50 GWj/t et le multirecyclage de Pu et U devient techniquement possible.

Les assemblages Corail sont des assemblages hétérogènes qui contiennent deux types de crayon : des crayons MOx et des crayons UOx. Les crayons MOx sont placés à la périphérie de l'assemblage et les crayons UOx au centre. La teneur en plutonium des crayons MOx est de l'ordre de 30 %.

Le combustible Mix est un combustible MOx homogène dont la teneur en plutonium peut aller de 8 à 12 %. Pour compenser la dégradation du vecteur isotopique du plutonium, il est nécessaire d'augmenter la teneur en  $^{235}\text{U}$  du combustible support lors de la fabrication du MOx. Les assemblages sont homogènes.

87

Assemblage CORAIL CEA



- 84 crayons MOx
- crayons UOx
- tubes guide
- REP : tube guide / EPR : crayon UOx

Le multirecyclage en mode Corail ou Mix impliquerait semble-t-il des investissements moins lourds que celui impliquant des RNR. Il s'agirait seulement de construire de nouvelles installations dans les usines actuelles. Il permettrait de poursuivre la stratégie française de recyclage des matières nucléaires et de ne pas envoyer le Pu aux déchets, tout en différant l'engagement dans la filière RNR.

## SCENARIOS

Le CEA, EdF, Orano ont développé plusieurs scénarios d'évolutions du parc actuel sur la base de la mise en œuvre de divers combustibles Corail et Mix à partir de 2045. Ces études répondent à l'article 12 de l'arrêté du 23 février 2107 associé au PNGMDR 2015-2018 (rapport fin 2017 porté par EdF). Ils mettent en jeu quelques REP, de nombreux EPR UOx et Corail ou Mix et quelques EPR URE. Dans ces scénarios la consommation d'uranium naturel est diminuée d'environ 10 % par rapport à celle nécessaire au parc actuel tandis que la production d'actinides mineurs s'accroît de quelques 30 %. L'encours de Pu peut être modulé pour le lancement de RNR. Dans tous les scénarios il faut des capacités de fabrication d'assemblages Corail, Mix et URE et de retraitement de combustible usé MOx et UOx, qui restent à créer.

Ces scénarios de multi-recyclage ont pour principaux objectifs un recyclage rapide de la totalité des combustibles usés MOx des réacteurs à eau, puis la stabilisation de l'inventaire en plutonium ainsi que de l'ensemble des stocks de combustibles usés.

En outre, un scénario MIX incluant des gestions en uranium de retraitement enrichi (URE) a également été construit,

Quelle que soit l'évolution du parc pour un multirecyclage de Pu et U en RNR ou en EPR il faut préserver le fonctionnement des usines de retraitement et de fabrication de combustible actuelles avant de les faire évoluer, si possible, pour traiter de nouveaux combustibles élaborés à partir de qualités diverses de Pu et de U. De même il faut faire évoluer les procédés et les technologies de recyclage de Pu et U. A cet égard le CEA conduit depuis 2016 un programme portant sur les opérations du cycle : désassemblage des aiguilles, séparation oxyde-gaine (découpe laser, voloxydation), dissolution des oxydes (en continu), séparation U/Pu en un seul cycle sans réducteur (monoamides dissymétriques), synthèse d'oxyde mixte (syncristallisation U(VI) et Pu(IV), codénitration), fabrication des pastilles (granulation, pâte), conditionnement en ligne des déchets (fusion décontaminante des coques, incorporation des fines, nouveaux verres), contrôles en continu.

## ANNEXE XVI : DÉCHETS DE FAIBLE ET TRÈS FAIBLE ACTIVITÉ (TFA, FAVL ET TENORM)

### GÉNÉRALITÉS

La Commission a fait un point des études sur ces déchets dans son rapport n°11 de 2017 (page 41 et annexe XIV page 99). Les études concernant les FAVL et TFA sont conduites, depuis 2016, par l'Andra et les producteurs de déchets (CEA, EdF et Orano) dans le cadre des arrêtés du décret 2017-23 du 23 février 2017 faisant suite aux demandes du PNGMDR (2016-2018). Elles s'appuient évidemment sur tous les résultats obtenus antérieurement que la Commission a évalués. Plusieurs articles de cet arrêté fixent les échéances pour la remise à l'ASN de nombreux dossiers intermédiaires préparant deux livrables importants. Pour 2020 l'ASN attend un schéma industriel global de gestion des TFA et pour 2021 le DOS d'un avant projet de stockage des FAVL. Pour l'instant les FAVL déjà produits sont en entreposage et les TFA vont au Cires. Le changement de statut des déchets Tenorm est imminent. Il répondra à la directive européenne (2013/BSS/Euratom). Ceux qui sont stockés le sont dans des installations conventionnelles habilitées « non nucléaires » (ISDD) sur autorisation au vu de leur impact radiologique faible (1mSV/an).

Pour répondre aux demandes du PNGMDR et à la directive de la Commission européenne, l'Andra et les producteurs de déchets ont entamé une large réflexion visant à mettre en place une nouvelle gestion de tous les déchets de faible et très faible activité, dont la Commission avait souligné, en 2016, le manque de cohérence. L'Andra a récemment coordonné (février 2018) un Workshop de l'AIEA consacré à ce sujet. L'IRSN est aussi impliqué dans cette réflexion. Elle porte, aussi bien sur les aspects scientifiques et techniques des stockages que sur les aspects sociétaux. En effet il s'agit de déchets renfermant des radionucléides à vie longue, certes peu actifs au regard des MAVL (environ 4 ordres de grandeur), mais la sûreté des stockages doit être assurée sur de très longues périodes (millénaires) en déployant beaucoup moins de moyens que pour les MAVL.

La Commission évalue la progression des études. Dans ce qui suit elle traite des résultats acquis depuis le rapport n° 11.

### FAVL

L'Andra poursuit la caractérisation du site de Vendevre-Soulaine en vue d'y stocker les FAVL, environ 250 000 m<sup>3</sup> de déchets (radifères : 60 000 m<sup>3</sup>, bitumes : 42 000m<sup>3</sup>, Malvési II : 55 000 m<sup>3</sup>, empilement graphite : 66 000 m<sup>3</sup>, chemises graphites : 9 500 m<sup>3</sup>, Norm : 7 000 m<sup>3</sup>, Divers : 3 000 m<sup>3</sup>) et d'y ouvrir un second centre de stockage des déchets TFA. Elle évalue les capacités du site à accueillir, isoler et à confiner les radionucléides selon deux concepts de stockage à faible profondeur, sous couverture remaniée et sous couverture intacte. Les exigences de sûreté recherchées pour les stockages des différents déchets dépendent du temps en raison des différentes périodes de décroissance radioactive et de leur activité initiale actuelles. Par exemple entre 1 000 et 10 000 ans l'activité spécifiques des graphites et bitumes (autour de 10<sup>4</sup> Bq/g) reste supérieure à celle des uranifères (10<sup>3</sup> Bq/g) et des radifères (10<sup>2</sup> à 10 Bq/g). Mais ces différences sont à mettre en regard des incertitudes sur les performances des stockages qui augmentent avec le temps (érosion de surface, hydrogéologie, ...) et la pertinence des scénarios pour le calcul des doses à partir de l'arrivée des radionucléides aux exutoires. Il faut donc évaluer au mieux la dangerosité des déchets incluant les toxiques chimiques en fonction du temps et c'est le problème auquel l'Andra et l'IRSN se confrontent.

## TENORM

Les Norm et Tenorm renferment des radionucléides des familles de l'uranium ou de la famille du thorium et du 40K. Leur nouvelle gestion se fera par rapport à une valeur d'exemption (VE) qui est de 1 Bq/g pour les radionucléides des familles de l'uranium et pour les radionucléides de la famille du thorium et de 10 Bq/g pour le 40K.

A partir de juillet 2018 tout Norm et Tenorm dont l'activité est inférieure à la VE appropriée seront stockés dans des installations (ISDD, ISDND, ISDI selon la nature physicochimique) sans contrôle radiologique. Ceux dont les activités en U et Th sont comprises entre la VE et 20 VE ou entre la VE et 2 VE pour l'activité en 40K seront stockés dans des installations mettant en jeu un contrôle radiologique : ISDND, ISDD équipées pour un contrôle ou Cires. Tout Norm et Tenorm dont l'activité est supérieure à 20 VE ou 2 VE selon le cas (soit 20Bq/g) sera stocké au Cires, comme les TFA provenant des INB. Cela implique pour les exploitants des industries qui produisent des Tenorm (répertoriées) de les caractériser avant de les diriger vers un stockage. De plus seuls les Norm ou Tenorm d'activité inférieure à 1Bq/g seront valorisables sans restriction, contrairement aux autres qui ne le seront que sur dérogation ministérielle. En pratique les Tenorm sont peu valorisés en France.

Tous les pays produisant des Tenorm en grande quantité ont leur propres réglementation et pratiques de gestion. Le seul point commun est la mise en dépôt des déchets dans des centres surveillés mais les limites massiques d'exemption varient beaucoup. L'AIEA tente de définir quel serait un optimum de gestion des « Norm et résidus Norm et encourage d'abord leur utilisation et leur recyclage.

## TFA

90

La pratique de stockage des TFA au Cires montre que l'activité des déchets (notamment métalliques et gravats) basée sur les déclarations des producteurs est supérieure à celle mesurée par l'Andra (par sondage) et que 70 % des TFA stockés depuis 2003 ont une activité spécifique très inférieure à 1 Bq/g. Mais comme la radioactivité de ces derniers déchets n'est pas forcément naturelle la réglementation interdit un autre mode de stockage. Dans beaucoup de pays où il existe un seuil de libération ils auraient pu être déclassés. L'exploitation du Cires sans déclasser peut se poursuivre jusque vers 2030, date de saturation à 900 000 m<sup>3</sup>.

De nouvelles voies sont explorées pour la gestion des TFA (rapport CNE n° 11). Un groupe de travail du Comité de recherches du Conseil scientifique de l'IRSN étudie les aspects coûts et éthiques de filières complémentaires à celles en place, aspects qui sont aussi importants que les aspects mesure et contrôle de la radioactivité des déchets. En effet le recyclage, la création de centres dédiés autres que le Cires ou la libération de certains TFA demandent de comprendre où sont les problèmes. Les conclusions de ce GT sont pour l'IRSN/ASN mais les avis de ces organismes sont attendus par tous les producteurs. Le HCTISN examine la pertinence d'un seuil de libération et dans le débat public à venir sur la gestion des TFA cette question sera soulevée.

La France pratique une gestion des TFA conforme aux recommandations de l'AIEA (guide GSG 1 édité en 2009) mais elle est quasiment le seul pays qui ne pratique pas la libération de ces déchets dans le domaine conventionnel, libération qui fait aussi l'objet de guide de sûreté. L'AIEA recommande pour ces déchets une gestion en surface/subsurface par mise en tranchées. L'examen des pratiques de différents pays montre que cette option est quasiment la règle commune.

## VALORISATION DES TFA

La valorisation des lots de métaux et des gravats de bétons est à l'étude depuis quelques années (article 24 et 28 de l'arrêté du 23 février 2017). Les échéances importantes sont pour 2018. Il s'agit du rapport de Orano et EdF sur les possibilités d'une filière fondée sur la fusion des GV des REP et des diffuseurs de GB1 et de celui de l'Andra sur une filière de valorisation des gravats.

Depuis l'an dernier les études portent surtout sur les aspects économiques des valorisations potentielles. Les aspects techniques ne sont pas rédhibitoires.



## ANNEXE XVII : ENTREPOSAGES ET DECHETS

### ENTREPOSAGES

Orano (New Areva) et le CEA ont présenté à la Commission l'état et les besoins en entreposage pour leurs déchets MAVL HAVL avant envoi à Cigéo conformément à l'article 53 de l'arrêté PNGMDR 2017 (application du décret 2017-23 du 23 février 2017). Cette demande vise à évaluer la sensibilité des besoins d'entreposage à un décalage de la mise en service de Cigéo. Les inventaires des colis de déchets entreposés à ce jour et qu'il est prévu d'entreposer jusqu'en 2040 ne diffèrent pas de ceux donnés dans le rapport n° 10 de la Commission. Les entrepôts d'Orano sont à la Hague, ceux du CEA à Marcoule et à Cadarache. Les cadences de leur remplissage selon les hypothèses du scénario de production des déchets sont connues (PIGD Version E de 2016, première livraison de colis en 2030, exploitation industrielle en 2035)

Pour Orano les installations d'entreposage existantes ou planifiées pour les colis HA permettent de couvrir le besoin au moins jusqu'en 2030. Au-delà, leur extension sera nécessaire jusqu'au départ des premiers colis de verre vers 2075. Les capacités d'entreposage des colis de déchets MAVL sont sensibles à l'ouverture de Cigéo. Certaines installations sont suffisantes pour accepter un retard des expéditions jusqu'en 2040, d'autres devront être étendues pour franchir 2030. Il n'y a pas de problème technique pour les extensions tous les entreposages étant modulaires. Les entreposages de la Hague sont dans de nombreuses installations des INB116 (UP3), 117 (UP2800) et 118 (STE3)

La situation pour le CEA est similaire. Les besoins futurs d'extension pour les 20 prochaines années en cas du décalage de la date de mise en service de Cigéo sont maîtrisables. Les entreposages récents sont aussi de conception modulaire. A terme il n'existera comme entreposages que quelques entreposages : Cedra à Cadarache (colis MAVL faiblement irradiant), EIP à Marcoule (colis bitume MAVL, FAVL), SEV à Marcoule (colis verre HA), Diadem à Marcoule (colis MAVL irradiants).

Beaucoup de colis de déchets HA et MAVL entreposés à la Hague ou à Marcoule appartiennent à EdF. Le seul entrepôt de colis géré par EdF est Iceda au Bugey destiné à des colis de déchets MAVL, FAMA-VC et FAVL activés provenant de la déconstruction des réacteurs de première et deuxième génération (UNGG, Brennilis, Chooz-A, Superphénix de Crey-Maleville) ainsi que de l'exploitation du parc nucléaire actuel. Iceda assurera aussi le conditionnement des déchets en colis C1PG. Iceda a la capacité nécessaire pour accueillir tous les colis de déchets activés qu'il est envisagé de produire selon le scénario actuel d'exploitation des centrales (environ 5 000 colis). Aucun colis ne sera envoyé à Cigéo dans les 20 prochaines années. Un décalage de la mise en service de Cigéo serait sans impact sur les capacités de conditionnement d'Iceda.

Le tritium est produit à l'état atomique par de nombreux mécanismes dans les réacteurs électronucléaires du parc (fission ternaire, réactions nucléaires sur les isotopes de bore et de lithium des barres de contrôle et de l'eau). La production augmente avec la puissance du réacteur. Il diffuse à travers tous les matériaux. On le retrouve dans tous les déchets du nucléaire civil essentiellement sous forme de HT et HTO gazeux ou liquide et a fortiori dans les déchets du nucléaire militaire qui produit et utilise le tritium en grande quantité. Tous les colis dits tritiés relâchent du tritium. Le tritium est modérément radiotoxique. Son impact dosimétrique est le plus élevé à l'état gazeux. Aussi tous les efforts sont faits pour diriger le tritium dans l'eau tritiée.

Mis à part les déchets tritiés de l'installation ITER attendus à l'horizon 2030, l'essentiel des déchets tritiés produits en France sont des déchets d'exploitation et de démantèlement des installations liées aux applications militaires du CEA (98 %). Les typologies de déchets sont nombreuses. Les colis de déchets tritiés sont classés en six grandes catégories en fonction des radionucléides qu'ils contiennent, de l'activité en tritium et du taux de dégazage en tritium. Ils sont tous dirigés vers Valduc. Seuls les colis de déchets tritiés les plus actifs (10000 GBq/fût) et les plus émetteurs de tritium (55,5 MBq/colis/jour) sont traités thermiquement par fusion ou étuvage à

la vapeur d'eau pour récupérer le tritium (gaz HT ou eau tritiée HTO), puis les résidus (lingots de fusion, matière organique étuvée) sont conditionnés en colis compatibles avec un entreposage. L'eau tritiée est entreposée liquide ou absorbée dans une résine. Elle peut aussi provenir de la détritiation d'atmosphères de boîtes à gants.

Depuis 2008 toutes les catégories de colis sont entreposées à Valduc dans des bâtiments dédiés à chaque catégorie, bâtiments extensibles selon les besoins (planning prévu dès 2022). Ils doivent rejoindre in fine le CSA après décroissance du tritium. Le rejet en tritium (HTO) des entreposages est actuellement de l'ordre de 1g/an en tritium. Les déchets de Iter seront entreposés sur place.

## ASSAINISSEMENT & DEMANTELEMENT

La commission a abordé ce vaste sujet dans ses précédents rapports. Les programmes d'A&D et de RCD sont soutenus par des actions de R&D qui sont développées par le CEA et les industriels selon 7 thématiques : caractérisation des installations et des déchets non conditionnés ou des anciens colis, caractérisation des sols, développement d'outils pour travail en milieu radioactifs comme la prise d'échantillons et la reprise des déchets en vrac, décontamination d'installation ou de pièces, traitement des effluents en grande quantité, conditionnement des déchets ultimes et méthodologies de gestion de projets. Les efforts de R&D portent sur des méthodes de caractérisation non destructive des installations ou matériaux et sur les traitements thermiques de déchets organiques/inorganiques avec développement de prototypes (procédés In-Can et Pivic).

La stratégie de conditionnement des déchets entreposés en vrac pour en faire des colis primaires est de s'appuyer sur le conteneur et la matrice ou le matériau de blocage afin de rendre le colis le plus inerte possible, tant en exploitation du stockage qu'après sa fermeture. Les procédés de traitement préalable des déchets imposent parfois des contraintes technologiques par exemple par traitement thermique et chaque fois des contraintes financières. Cela oriente la R&D soit vers le conditionnement soit vers le conteneur. Ainsi Orano développe un conteneur universel « tout en un » qui servirait tant au transport qu'au stockage des déchets.

94

Les actions de A&D et de RCD concernent tous les pays nucléaires. Le projet européen INSIDER (insider-h2020.eu) a démarré en juin 2017, pour une durée de 4 ans (18 partenaires européens). Il a pour objectif de proposer une méthodologie de caractérisation des matériaux de démantèlement, d'évaluation des performances des méthodes de mesure et d'évaluation des coûts financiers et radiologiques. La gestion des matériaux très faiblement radioactifs devrait en bénéficier.

La Commission examine ici le déroulement des programmes de A&D et RCD et leur évolution dus à des infléchissements ou modifications, dictés par des considérations scientifiques et techniques, la maîtrise des coûts, des délais et la recherche d'optima économiques en respectant les contraintes de sûreté du nucléaire.

### CEA

#### a) Magnésiens

Les déchets magnésiens font l'objet d'opérations planifiées de RCD depuis 2010. Il s'agit de 1620 tonnes de déchets métalliques (morceaux de Mg à 0,5 % de Mn, de à 1,5 % de Zr, traces de U métal) entreposés à sec dans des fosses à Marcoule (70 % MAVL, 30 % FMAVC). Les premiers qui seront repris et conditionnés sont ceux de catégorie FMA-VC dont les caractéristiques physico-chimiques et radiologiques ont été établies en 2016-2017. Le Mg est altéré en surface avec formation d'hydroxyde de magnésium :  $Mg(OH)_2$ . Le risque d'inflammation des déchets à la reprise est écarté s'il est fait sous air humide. Le CEA a retenu pour la matrice de blocage des déchets un liant hydraulique alumino-silicaté sodique dopé au fluorure de sodium (NaF) dénommé « géopolymère ». Il répond aux critères rhéologiques de coulée et, une fois solide, aux critères mécaniques qui sont recherchés pour une mise en œuvre à l'échelle industrielle. Il minimise la production d'hydrogène, ne subit pas de modification minéralogique ni

microstructurale jusqu'à 10 MGy. Seul le sodium est lixiviable par des eaux cimentaires. La production de H<sub>2</sub> provient de réactions entre les déchets et l'eau. La R&D en cours est dans la continuité du programme de R&D (mécanisme production de H<sub>2</sub> et optimisation de la teneur en NaF qui l'inhibe). Les essais de mise en œuvre à échelle 1 porte sur le conditionnement des FAVL (déchets en vrac mis en conteneur béton et bloqués, environ 600 kg de Mg) ou MAVL (futs compactés et blocage des galettes, environ 150 kg de Mg).

### **b) Réacteurs UNGG**

Les réacteurs G1 G2 et G3 sont au niveau de démantèlement AIEA-2 depuis des décennies. Les dispositions prises assurent le confinement des blocs réacteurs. Ces réacteurs ont fonctionné 12 ans (G1, puissance 46 MWth) et environ 25 ans (G2 et G3, puissance 250 MWth) pendant lesquels le graphite des empilements (respectivement 1200 et 1300 t) et les matériaux des structures des blocs réacteurs (bétons, aciers) ont été activés. Avant de poursuivre leur démantèlement le CEA continue le programme de l'inventaire radiologique des matériaux encore en place. Pour ce qui concerne le graphite il s'appuie sur la confrontation entre des calculs d'activation neutronique tenant compte de l'origine du graphite (impuretés activables différentes) et des modélisations 3D des flux historiques de neutrons et des analyses radiochimiques réalisées sur des carottes prélevées dans les modérateurs et réflecteurs (G1 et G2). Les activités de tritium, de <sup>14</sup>C et de <sup>36</sup>Cl sont évaluées/re-évaluées (ainsi que celles d'autres radionucléides, <sup>60</sup>Co, <sup>55</sup>Fe, <sup>63</sup>Ni, <sup>93</sup>Mo, <sup>94</sup>Nb, <sup>41</sup>Ca, <sup>10</sup>Be).

Ces actions de R&D permettent de développer des méthodes sophistiquées de caractérisation et d'activité du graphite, qui pourront être appliquées aux autres matériaux des réacteurs de Marcoule et pour le démantèlement de tous les réacteurs UNGG.

## *Orano*

### **a) Silo HAO et silo du SOD (déchets coques, embouts, fines)**

Les déchets du silo HAO et des curseurs du SOD sont repris simultanément, lavés et triés par décantation. Les coques et embouts et quelques autres débris métalliques (environ 1600 tonnes) seront envoyés vers l'Atelier de Compactage des Coques après caractérisation radiologique où elles seront mises en colis CSD-C selon une nouvelle spécification de production en cours d'examen. Les fines de cisailage et de dissolution (contenant majoritairement des radionucléides émetteurs alpha) et les résines seront cimentées sur place (ciment CEM III/C, taux d'incorporation des déchets de 11 %) pour constituer les colis primaires CFR HAO. La fabrication du colis est acquise. Ce conditionnement enrobe très bien les déchets mais de ce fait conduit à une production d'hydrogène par radiolyse estimée aujourd'hui à 120 litres/an/colis. Orano examine ce problème. Orano prévoit de déposer un dossier de demande d'accord de conditionnement au premier trimestre 2018.

### **b) Silos STE2 (boues de coprécipitation)**

Après quelques années de R&D sur un conditionnement alternatif à l'enrobage des boues dans du bitume, Orano a proposé un conditionnement de ces déchets en colis C5 (boues déshydratées pastillées bloquées par du sable dans un conteneur CSD. Or il est apparu de sérieuses difficultés de fabrication du colis au niveau du séchage. Le colis C5 a donc été abandonné. Orano s'oriente vers un changement de stratégie. L'objectif immédiat est la vidange des silos. Orano produit à STE3 80 colis bitume/an.

### **c) Silos 115 et 130 (déchets graphites et magnésiens)**

Les déchets dits UNGG se trouvant dans ces silos contiennent principalement des déchets graphite (92 %), des déchets d'alliages magnésium MgMn et MgZr (7,5 %) et d'uranium métallique (0,25 %), tous en morceaux. Les déchets magnésiens seront traités pour dissoudre le Mg et oxyder l'uranium, éléments réactifs vis à vis de l'oxygène et de l'eau. Les résidus inertes des traitements seront cimentés comme les déchets graphite. Les procédés sont en développement. Ces déchets relèvent de la filière FAVL. Comme il n'existe pas de spécifications

d'acceptation en stockage les déchets du silo 130 seront mis dans des fûts ECE en attente de conditionnement, qui aura lieu dans le même temps que celle des déchets du silo 115.

#### **d) Conditionnement des colonnes d'élution et des capsules de titanate de strontium de l'atelier ELAN IIB**

L'atelier Elan IIB (mise au point et utilisation d'un échangeur minéral fixant sélectivement le césium-137 en milieu nitrique) est en démantèlement. Les déchets sont constitués par quatre colonnes d'échangeur (MAVL) et quinze capsules de titanate de strontium (HA) qui seront conditionnés pour stockage.

#### *EdF*

EdF a en charge le démantèlement des 6 réacteurs de sa filière électronucléaire UNGG : Chinon A1 (70 MWe, 1963-1973), Chinon A2 (210 MWe, 1965-1985), Chinon A3 (365 MWe, 1966-1990), Bugey 1 (540 MWe, 1972-1994), Saint-Laurent A1 (390 MWe, 1969-1990) et Saint-Laurent A 2 (465 MWe, 1971-1992). Ces réacteurs alimentés avec de l'uranium naturel métallique sont d'une technologie complexe, très différente de celle des REP. Le cœur cylindrique du réacteur Chinon A2 enfermé dans un caisson de 10 cm d'épaisseur est environ 3 fois plus haut que celui d'un REP 900 MWe (31 m) et son diamètre (25 m) 5 fois plus grand. L'empilement en graphite (25 000 briques, 2 200 t) et le caisson (2 229 t) sont au total 10 fois plus lourd (4 500 t) que la cuve d'un REP. Les générateurs de vapeur CO<sub>2</sub>/vapeur d'eau sont aussi plus importants que ceux d'un REP (eau/vapeur d'eau). Sur les 50 réacteurs de cette technologie qui sont à l'arrêt, seuls 2 ont été démantelés (Fort St Vrain aux USA, 320 MWe et Windscale en Angleterre, 33 MWe).

La stratégie de EdF a été de commencer par le démantèlement de Chinon A2 comme tête de série et de mettre en configuration sécurisée des 5 autres réacteurs, par exemple pour une trentaine d'années pour Chinon A1 et A3. Pour ces 2 réacteurs il s'agit essentiellement d'ici 2035 du démantèlement des échangeurs de chaleur. Dans les 20 ans à venir EdF démantèlera tous les locaux nucléaires accolés aux caissons de Chinon A1 et A3 (notamment les échangeurs).

96

Les travaux de démantèlement déjà réalisés sur Chinon A2 ont quasiment permis d'atteindre le niveau AIEA-2. Sur la dalle du réacteur, se trouvaient les 2 machines de chargement (450 tonnes chacune) qui permettaient de renouveler le combustible en marche. Un pont tournant leur permettait de s'accoster sur les différents puits de chargement du combustible. Leur démantèlement a généré 1 500 t de déchets TFA (ferrailles, béton). Il reste avant de passer à la phase essentielle du démantèlement à remblayer le cuvelage de la salle des machines. Après remblaiement (volume de 7 500 m<sup>3</sup>), la surface réaménagée sera mise à disposition pour continuer.

Le démantèlement du caisson de Chinon A2 (2030-2055) sous air sera précédé par la construction d'un démonstrateur industriel pour tester les outillages et le scénario (2019- 2030). Le démantèlement des 5 caissons des autres réacteurs est programmé pour après 2060. EdF prévoit environ 25 ans pour démanteler un caisson, passant par des travaux préalables (35 mois), l'ouverture par le haut du caisson en béton (43 mois), la mise en place d'une plateforme de démantèlement (37 mois), l'ouverture de la protection biologique) (24 mois) et depuis la plateforme le retrait des structures métalliques supérieures (35 mois), l'empilement graphite (85 mois) et des structures métalliques inférieures (27 mois). L'ouverture du caisson est prévue en 2032.

Ce démonstrateur industriel comprendra des maquettes à l'échelle 1 de parties représentatives du caisson, des simulateurs physiques permettant de tester les outils télé-opérés et des simulations numériques. Il pourrait constituer une plate-forme ouverte à tout organisme ou entreprise concerné par le démantèlement de réacteurs graphite. Plusieurs industriels français et étrangers ont d'ores et déjà manifesté leur intérêt pour ce projet

Le démantèlement du caisson du réacteur de Chinon A2 constituera un chantier hors-norme, en raison : du volume de matériaux à déconstruire, de l'état de l'empilement graphite (mal connu), de la radioactivité qui exige des opérations téléopérées et de l'accès difficile aux parties à démanteler successivement.

L'évacuation des empilements de graphite de Chinon A2 (15 GBq en  $^{36}\text{Cl}$ ) est prévue vers le CSA en 2045. En effet la capacité restante en  $^{36}\text{Cl}$  du CSA où sont déjà stockés les chemises graphite de Bugey 1 (20 GBq) est de 300 GBq (en cas de non acceptation au CSA EDF construira une installation d'entreposage). EDF va aussi construire une installation d'entreposage (vers 2023) sur le site de Saint-Laurent pour les chemises actuellement entreposées dans les silos puis un entreposage à partir de 2024 pour un début du retrait du graphite à partir de 2028. L'évacuation du graphite des 5 autres caissons et des chemises de Saint-Laurent A vers un stockage FAVL est prévue au-delà de 2070.

La fin de la caractérisation des graphites dans les 6 caissons UNGG est pour fin 2019.

EDF a abandonné la R&D active sur le traitement thermique du graphite. En effet après une R&D importante sur les empilements de Bugey 1, allant du laboratoire à des essais pilotes, le taux de décontamination en  $^{14}\text{C}$  reste limité à 30 % (avec perte de masse à 5 %) celui du  $^{36}\text{Cl}$  est peu significatif et difficilement à évaluer. Les opérations de décontamination conduisent à une production importante de rejets gazeux de  $^{14}\text{C}$  et  $^3\text{H}$  rendant réductrice la perspective d'une installation à l'échelle industrielle. De plus il y a de sérieuses difficultés pour conditionner des déchets secondaires, notamment de l'eau tritiée.

EDF reste actif à l'international dans le cadre du projet GRA-PA de l'AIEA. Les essais réalisés à l'international n'ont pas démontré à ce jour la faisabilité industrielle du traitement du graphite.

EDF a exploité de 1963 à 2015 sur le site de Chinon l'Atelier d'examen des Matériaux Irradiés provenant de toutes ses centrales (AMI). Les activités de l'AMI ont été transférées vers un nouveau laboratoire construit sur le site de Chinon : le LIDEC. EDF prépare la mise à l'arrêt définitif de l'AMI (arrêté attendu cette année) en évacuant les déchets d'exploitation présents dans le bâtiment principal et les zones d'entreposage de déchets. Il s'agit d'un travail d'ampleur, à réaliser avec les outils télécommandés en place. Les prévisions de déchets sont les suivantes : 30 000 t, 80 % de déchets conventionnels (métaux recyclables et gravats en remblais), 19 % de déchets TFA (Cires), 1 % de déchets FMAVC (CSA) et 0,02 % de déchets en attente d'agrément (entreposage sur le site en conteneurs blindés avant de définir la filière de référence. Le démantèlement est planifié sur 10 ans).

## CLASSIFICATION AIEA

La France a adopté le classement en trois niveaux de démantèlement proposé par l'AIEA :

- le niveau 1 consiste à enlever les matières nucléaires, à les envoyer soit vers le retraitement soit vers les centres de stockage, puis à fermer hermétiquement le bâtiment tout en continuant cependant à contrôler la radioactivité à l'intérieur et dans l'environnement ;
- au niveau 2, on procède à la libération partielle de l'installation en enlevant tous les matériels facilement démontables et en réduisant la zone confinée au minimum ;
- le niveau 3 correspond à la libération totale et inconditionnelle du site, qui doit redevenir utilisable sans restriction, les anglophones parlant à ce propos de la théorie du *green field* : "le retour à la prairie".



## ANNEXE XVIII : PRECONISATIONS ET PRATIQUES SUR LA LIBÉRATION DES DÉCHETS

Dans tous les pays utilisant l'énergie nucléaire, les modalités de gestion des déchets radioactifs sont loin d'être uniformes. La directive Européenne 2011/70/EURATOM établit un cadre réglementaire pour une gestion sûre et responsable des déchets nucléaires et des combustibles usés dans l'Union Européenne. La production de déchets nucléaires doit être maintenue à un niveau aussi bas que faire se peut.

### AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE - AIEA

L'AIEA publie des normes de sûreté constituant un ensemble de documents non contraignants qui représentent la référence internationale en matière de sûreté nucléaire et de radioprotection. Le guide RS-G-1.7 traite de l'application des concepts d'exclusion, exemption et libération. Une distinction est faite entre radionucléides d'origine naturelle ou artificielle. Pour une liste exhaustive d'isotopes, des valeurs de concentration en activité massique (Bq/g) indiquent des seuils indicatifs d'exemption. D'autres indiquent le seuil acceptable pour l'activité totale du volume considéré. Même si l'activité massique est inférieure au seuil d'exemption, comme pour certaines matières naturellement radioactives (Norm) contenant de l'uranium ou du thorium, la matière deviendra une matière régulée si l'activité totale dépasse le seuil correspondant. Le guide prévoit cependant une approche graduée quant à l'utilisation des seuils. Le régulateur peut décider d'autoriser l'exemption à des valeurs plus élevées, par exemple d'un facteur 10, dans le cadre d'optimisations d'un risque potentiel.

Les valeurs ont été déterminées en tenant compte d'une augmentation, au cas par cas, d'une dose efficace individuelle limitée à 10 µSv/an.

Les normes de l'AIEA ne s'appliquent ni à l'alimentation, ni aux eaux potables, ni à l'exposition au radon ou au <sup>40</sup>K dans le corps, ni aux transports. D'autres règlements, comme ceux de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), de l'Organisation des Nations unies pour l'agriculture et l'alimentation (FAO) ou de l'Agence de l'énergie nucléaire (AEN-OCDE) régissent partiellement ces matières.

### CE-EURATOM

La Directive 2013/59/EURATOM fixe les normes de base relatives à la protection sanitaire contre les dangers résultant de l'exposition du public ou des travailleurs aux rayonnements ionisants. Elle se base en grande partie sur les travaux de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) et des recommandations de l'AIEA, OMS, FAO et AEN.

La directive ne s'applique pas à l'exposition à un niveau naturel de rayonnement de personnes du public ou de travailleurs autres que les membres d'équipages aériens ou spatiaux.

La directive définit les "seuils d'exemption et de libération" non contraignants comme des valeurs fixées par l'autorité compétente ou dans la législation nationale, et exprimées en termes d'activité massique, auxquelles ou en dessous desquelles des matières provenant de pratiques soumises à notification ou à autorisation peuvent être dispensées de se conformer aux exigences de la présente directive.

Les seuils d'exemption et de libération spécifiées dans la directive sont identiques, et les mêmes que ceux préconisés par l'AIEA. Comme ils ne sont pas contraignants, ils peuvent être différents d'un pays à l'autre ce qui induit un manque d'harmonisation européenne.

## PRATIQUES NATIONALES

Cette annexe décrit les points saillants de l'état des diverses réglementations qui sont appliquées.

### a) Allemagne

L'Allemagne considère trois classes de gestion de déchets et pratique l'entreposage de décroissance pour les isotopes de très courte durée de vie (comme ceux utilisés en médecine nucléaire) :

- la libération pour les très faibles activités ;
- un stockage géologique, prévu à Konrad, pour les déchets qui ne génèrent pas de chaleur (FA et MA) ;
- un stockage géologique, dont la nature et la localisation reste à déterminer, pour les déchets qui génèrent de la chaleur (HA).

Quand un risque de contamination ou d'activation des déchets existe, la réglementation sur la libération des déchets radioactifs s'applique. Celle-ci prévoit 9 niveaux de libération qui font la distinction entre la libération inconditionnelle et la libération pour un usage spécifique. Pour ces libérations conditionnelles, les niveaux de libération sont fonction de l'activité massique (Bq/g) ou surfacique (Bq/cm<sup>2</sup>).

Si les critères de libération sont respectés et si la procédure a bien été suivie, une libération peut être accordée par le Bundesamt für Strahlenschutz (BFS).

Aucune régulation n'existe pour la libération d'un site, mais quand tous les éléments présents sur le site sont libérés (sols, bâtiments,...), la licence nucléaire est terminée et le site devient automatiquement non-nucléaire.

100

### b) Belgique

La Belgique a trois classes de gestion et pratique l'entreposage de décroissance pour les isotopes de très courte durée de vie :

- le stockage en surface des FAVC et MAVC, « catégorie A », destinés à un stockage en surface, actuellement en construction ;
- le stockage des FAVL et MAVL, « catégorie B » qui ne génèrent pas de chaleur et destinés à un stockage futur en couche géologique ;
- le stockage des HA, « catégorie C », destinés à un stockage futur en couche géologique.

Des niveaux de seuils de libération (Bq/g) pour les déchets radioactifs solides sont fixés par la réglementation autorisant ainsi leur recyclage, leur réutilisation ou leur gestion comme des déchets classiques (incinération, mise en décharge). Des écarts à ces niveaux de libération peuvent être autorisés par l'Agence fédérale de contrôle nucléaire (AFCN) à condition que l'opérateur démontre que le critère de protection radiologique est satisfait (dose individuelle inférieure à 10 µSv/an ; dose collective inférieure à 1 homme.Sv/an) et optimisée.

### c) Canada

Un des principes fondamentaux de l'AIEA, repris par le guide P-290 du CNS « Gestion des déchets radioactifs », est que le détenteur d'une licence d'exploitation doit minimiser autant qu'il se peut la quantité de déchets générés. Cette obligation implique le développement de programmes de gestion des déchets qui aident à la réduction de leur volume et qui nécessitent une gestion sur le long terme.

Les détenteurs de licences d'exploitation sont tenus d'effectuer des recherches sur les technologies susceptibles de réduire ce volume et de les appliquer lorsqu'elles sont disponibles.

#### **d) Espagne**

L'Espagne a cinq classes de gestion ainsi que l'entreposage de décroissance pour les isotopes de très courte durée de vie.

Un stockage en surface des TFA et FAVC est opérationnel à El Cabril.

Pour les déchets FAVL, HAVL et HA, un entreposage centralisé (ATC) est prévu. Il a été approuvé par le conseil des ministres le 30 décembre 2011 et est en construction à Villar de Cañas (Cuenca) à 200 km au sud-est de Madrid. Ce projet prend beaucoup de retard du fait de problèmes dans la procédure d'octroi de la licence d'exploitation. La solution intermédiaire consiste en la construction de plusieurs sites d'entreposage temporaire sur les sites de centrales nucléaires (aujourd'hui 3 sites sont en cours de construction). La solution finale sera un stockage géologique profond dont le site n'est pas défini à ce jour.

En Espagne la libération des déchets est gérée par le décret ETU/1185/2017 du 21 novembre 2017 sur la libération des matériaux résiduels produits par les installations nucléaires. Cette réglementation transpose partiellement les seuils prévus par la Directive Européenne 2013/59/Euratom. Les seuils de libération sont définis dans l'annexe 1 de ce décret.

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

La libération de déchets radioactifs n'est pas autorisée aux Etats-Unis. La minimisation des volumes de déchets est une obligation légale.

Les agences fédérales comme le DOE (Department of Energy) sont assujetties aux programmes de minimisations des déchets et de prévention des pollutions édictés par l'Executive Order 12780, et des agences fédérales en charge de l'environnement de la pollution et de la prévention des risques.

Le DOE doit ainsi réduire ses rejets et le volume de déchets que ses activités génèrent et qui nécessitent un traitement, un entreposage et un stockage.

La réglementation de la NRC demande aux détenteurs de licences d'exploitation de réduire la production des déchets radioactifs à un niveau aussi faible que possible. Le coût et la disponibilité des stockages de déchets radioactifs aux Etats-Unis constituent un levier jugé suffisamment incitatif pour que les producteurs de déchets appliquent sérieusement cette recommandation.

#### **f) Finlande**

Les règles générales de libération (basées sur des activités volumiques) et les libérations conditionnelles des déchets nucléaires sont indiquées dans le guide YVL 8.2. Pour les petits producteurs de déchets les niveaux d'exemption pour les déchets liquides et solides sont définis dans le guide ST 6.2.

#### **g) Royaume-Uni**

Le Royaume-Uni considère cinq classes de déchets radioactifs :

- déchets de très basse activité, stockés en décharge conventionnelle ;
- FA en stockage de surface à Drigg ;
- FA non destinés à Drigg ;
- MA destinés à un stockage géologique futur ;
- HA destinés à un stockage géologique futur.

L'Uranium et le Plutonium ne sont pas considérés comme des déchets.

Le décret sur l'exemption des substances de faible activité est le cadre général dans lequel les demandes d'exemption et d'exception des déchets radioactifs sont traitées. Ces demandes se

font en accord avec le règlement environnemental de 2010 (Pays de Galles et Angleterre) et la loi sur les substances radioactives de 1993 (Ecosse et Irlande du Nord) pour les substances qui satisfont au décret d'exemption.

Un processus de revue et de simplification administrative est en cours pour faciliter l'usage du décret d'exemption tout en assurant un bon niveau de protection humaine et environnementale.

Les matières de très basse activité (<0,4Bq/g), sont automatiquement libérées et donc non considérées comme déchets radioactifs. L'exemption d'un certain nombre d'éléments est prévue pour des activités entre 0,4 et 11 Bq/g. D'autres matériaux peuvent être libérés ou exempts au cas par cas.

La libération d'un site est accordée quand il n'y a plus de danger pour la santé :

- < 20 µSv sans efforts de décontaminations supplémentaires ;
- < 300 µSv si tous les efforts ont été faits, des restrictions quant à l'usage futur peuvent s'appliquer ;
- < 1 mSV est la limite absolue d'acceptation.

#### **h) Italie**

D'après le guide technique n°26 sur la gestion des déchets radioactifs, toutes les mesures doivent être prises pour réduire la production de déchets en masse, en volume et en activité. Les traitements permettant la réduction du volume et le stockage doivent être envisagés. Il est aussi demandé que toutes les opérations de la filière soient optimisées, afin de réduire le volume global de déchets.

Un critère général est appliqué en Italie pour la libération inconditionnelle des déchets. Un déchet radioactif peut être libéré de façon inconditionnelle si le radionucléide concerné vérifie deux critères :

- L'activité doit être inférieure à 1 Bq/g,
- La demi-vie doit être inférieure à 75 jours.

Si ces deux conditions ne sont pas respectées, une autorisation spécifique de libération, de réutilisation ou recyclage est nécessaire. L'autorisation peut être accordée si :

- La dose effective est inférieure à 10 µSv/an,
- la dose collective est inférieure à 1 homme.Sv/an ou l'analyse démontre que l'exemption est la solution optimale,
- l'activité doit être inférieure au seuil fixé par la loi italienne de 1 Bq/g.

#### **i) Pays Bas**

Aux Pays-Bas les seuils de libération sont rigoureusement égaux aux seuils d'exemption. Les niveaux d'exemption sont ceux proposés par Euratom à l'exception du <sup>226</sup>Ra, du <sup>228</sup>Ra et du <sup>60</sup>Co. Pour ces radionucléides, le seuil d'exemption aux Pays-Bas est fixé à 1 Bq/g alors que l'Euratom propose 10 Bq/g.

#### **j) Suède**

La libération des déchets radioactifs est une des composantes de la gestion des déchets. Les matériaux peuvent être libérés pour un usage libre ou pour être mis en décharge dans des sites conventionnels. Par exemple en 2004 approximativement 600 t ont été libérés et stockés dans des décharges municipales et 500 t de métal fondu avec une activité inférieure à 0,5 Bq/g ont été libérées et recyclées.

En dehors du combustible usé, la Suède a trois sortes de déchets :

- **TTFA**

La libération des TTFA est autorisée en Suède et est régulée par l'Autorité de Sûreté Radiologique (SSM) selon des critères détaillés, spécifiés dans les règlements de libération pour matériaux potentiellement contaminés (par exemple: 1 Bq/g pour le <sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr et <sup>36</sup>Cl ; 0.1 Bq/g pour le <sup>239</sup>Pu...).

Une autre option pour les TTFA, également régulée par SSM, s'ils ne peuvent pas être libérés, est le stockage dans une décharge sur certains sites nucléaires.

- **FAVC et MAVC**

Le stockage, SFR, se fait dans la roche cristalline à environ 100 m de profondeur à Forsmark. SFR est en opération depuis 1988. Une demande pour une extension de SFR a été présentée aux autorités par SKB en 2014.

- **FAVL et MAVL**

Les prévisions des volumes totaux de FAVL et MAVL en Suède donnent environ 30 000 m<sup>3</sup>, principalement composés de déchets historiques et de déchets résultant du démantèlement de réacteurs. Ces déchets sont en entreposage mais un stockage spécifique, SFL, similaire au stockage SFR, est prévu. Le site et la profondeur de ce stockage SFL ne sont pas décidés pour l'instant. La mise en opération est prévue vers 2040.

#### **k) Suisse**

Le seuil de libération d'un déchet radioactif est déduit de la dose que les radionucléides qu'il contient peuvent induire par ingestion, inhalation ou contact. Pour autoriser une libération cette dose doit être inférieure à 10 µSv. Les facteurs de dose choisis sont tabulés dans une ordonnance sur la protection radiologique et sont conformes aux préconisations de l'AIEA (IAEA Safety Series 115). Les matériaux ainsi libérés sont soit recyclés soit traités comme des déchets conventionnels.



## ANNEXE XIX : AVIS DE L'AUTORITÉ DE SÛRETÉ SUÉDOISE

La Commission reproduit ci-après le communiqué de presse de l'autorité de sûreté suédoise disponible sur son site web.

<https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/en/press/news/2018/swedish-radiation-safety-authority-issues-pronouncement-on-final-disposal/>

### SWEDISH RADIATION SAFETY AUTHORITY ISSUES PRONOUNCEMENT ON FINAL DISPOSAL

23 Jan 2018

The Swedish Radiation Safety Authority, SSM, has undertaken a regulatory review of the Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company's (SKB) licence applications for final disposal of spent nuclear fuel. The review found that SKB has the potential to meet the requirements of the Act on Nuclear Activities concerning safe final disposal. Today, the Authority (SSM) has submitted its formal findings to the Swedish Government.

SSM recommends approval of SKB's licence applications under the Act on Nuclear Activities for permission to construct a repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Östhammar Municipality, as well as an encapsulation facility in Oskarshamn Municipality. Östhammar Municipality is located on the east coast of central Sweden. Oskarshamn Municipality is located on the south-east coast.

"The Swedish Radiation Safety Authority assesses that SKB has the potential to ensure safe management and final disposal of spent nuclear fuel so that human health and the environment are protected against harmful effects of radiation," says Ansi Gerhardsson, head of section at SSM.

SSM considers that SKB, though its licence applications, has demonstrated that the facilities and associated safety analysis reports, or SARs, can be developed in accordance with the established procedure for a step-wise permitting process under the Act on Nuclear Activities. SKB is assessed as having the potential and capability to produce updated SARs covering construction, operation, and long-term nuclear safety and radiation protection, which will need to be scrutinised and approved by SSM in future steps if licences are granted by the Swedish Government.

"There are a number of prerequisites for SSM's recommendation to approve the licence applications, such as the continued development of SARs and management systems for these facilities in accordance with the step-wise permitting process under the Act on Nuclear Activities. This means that SKB, at several stages of an ongoing process, must submit further information and analysis to be examined and approved by SSM before the company is allowed to move on to the next step of the process," says Ms Gerhardsson.

The Authority's recommendation for licence approval applies to the specific sites, as well as to the quantities and types of spent nuclear fuel that are specified in the licence applications. SSM's favourable judgment further presupposes that SKB, in the design, construction and operation of these facilities, continues to take into account matters of significance for radiation safety and development needs identified by SSM in its scrutiny of the licence applications.

The Authority has also proposed certain conditions to be attached to Government licences for SKB's facilities. These conditions require that the facilities should be constructed, taken into possession and operated as specified in the applications, as well as that SKB should produce SARs for examination and approval by the Swedish Radiation Safety Authority prior to construction commencing, before beginning test operation, and before a facility starts routine operation.



## ANNEXE XX : AVIS DE LA COUR ENVIRONNEMENTALE

La Commission reproduit ci-après le résumé de l'avis de la Cour environnementale suédoise tel qu'il a été traduit en anglais par l'ONG MKG (<http://www.mkg.se/en>). L'avis de la Cour est disponible en suédois sur leur site ([www.nackatingsratt.domstol.se/Om-tingsratten/Mark--och-miljodomstolen/](http://www.nackatingsratt.domstol.se/Om-tingsratten/Mark--och-miljodomstolen/)).

### OPINION OF THE ENVIRONMENTAL AND ENVIRONMENTAL COURT

The undertaking is permissible if:

- 1) Svensk Kärnbränslehantering AB [SKB] produces evidence that the repository in the long term will meet the requirements of the Environmental Code, despite remaining uncertainties regarding how the protective capability of the canister may be affected by
  - a. corrosion due to reactions in oxygen-free water
  - b. pit corrosion due to reaction with sulphide, including the contribution of the sauna effect to pit corrosion
  - c. stress corrosion due to reaction with sulphide, including the contribution of the sauna effect to stress corrosion
  - d. hydrogen embrittlement
  - e. radioactive radiation impact on pit corrosion, stress corrosion and hydrogen embrittlement.
- 2) the long-term responsibility for the the final repository according to the Environmental Code has been clearly assigned.

Before permission is given, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company [SKB] must also provide a comprehensive report of the plant's surface operations and indicate the siting of two possible ventilation towers.

The government should consider whether a legislative amendment is needed regarding the time limit for water management. The government should also consider giving the Radiation Safety Authority the right to plead cases under Chapter 22, Section 6 of the Environmental Code, and an opportunity to apply for re-evaluations under Chapter 24, Section 7 of the Environmental Code.



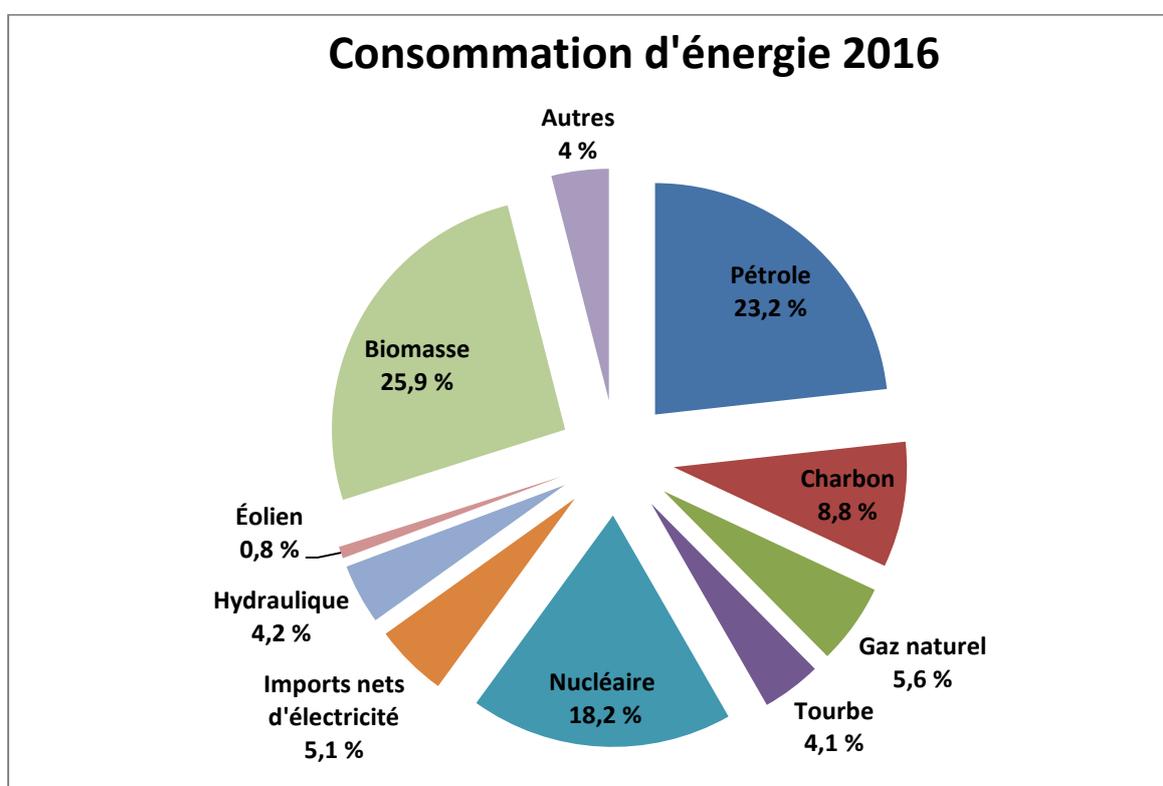
## ANNEXE XXI : MISSION D'ETUDE EN SUEDE ET EN FINLANDE

Cette annexe présente un état des lieux et les perspectives des systèmes énergétiques en Finlande et en Suède.

### FINLANDE

#### *Mix énergétique*

En dépit de sa faible population (5,5 millions d'habitants), la Finlande a des besoins énergétiques relativement importants. Cela est dû à la rudesse de son climat (pays situé entre le 60<sup>ème</sup> et le 70<sup>ème</sup> parallèle) et à ses industries énergivores : bois, papier, métallurgie, chimie, qui représentent la moitié de sa consommation énergétique.



*Mix énergétique de la Finlande en 2016. Consommation totale : 1 351 PJ. (Source : Statistics Finland)*

La Finlande est un pays pauvre en ressources naturelles. L'intégralité des combustibles fossiles (charbon, gaz, pétrole) est importée, de même que le combustible nucléaire et une partie de l'électricité. Au final, en excluant le nucléaire, seule 39 % de l'énergie consommée en Finlande est produite à partir de ressources indigènes au pays. La majorité des importations de pétrole, de charbon, et l'intégralité de celles de gaz naturel sont en provenance de Russie.

Les énergies renouvelables représentaient 35 % de la consommation d'énergie totale du pays en 2015. La tourbe, bien que classée par la Finlande comme « lentement renouvelable », a un rythme d'extraction bien supérieur à celui de sa reconstitution et son utilisation n'est pas reconnue comme renouvelable par les institutions internationales. La Finlande est suspendue à la décision par l'Union Européenne d'avaliser ou non le caractère renouvelable de la biomasse solide (bois-énergie), qui constitue un pilier de la politique énergétique finlandaise mais suscite la controverse dans d'autres pays européens.

Le réseau gazier finlandais est à l'heure actuelle uniquement relié à la Russie. Plusieurs projets sont en cours pour s'affranchir du monopole russe. D'une part, le gazoduc Balticconnector entre la Finlande et l'Estonie, devant relier la Finlande au réseau gazier européen « continental », est enfin en voie de se réaliser après avoir obtenu à la mi-juillet 2016 un financement européen couvrant 75 % de son coût estimé à 250 M€. Il doit être achevé en 2020. D'autre part, plusieurs terminaux GNL (Gaz Naturel Liquéfié transporté par navire) sont en construction le long de la côte finlandaise, dont l'un, à Hamina dans le sud-est de la Finlande, sera relié au réseau national.

La Finlande a de longue date développé des réseaux de chaleur et de refroidissement dans les agglomérations urbaines et les sites industriels, récupérant la chaleur résiduelle des centrales thermiques pour pourvoir aux besoins en chauffage de ses habitants et en vapeur de ses industries. Les centrales de cogénération (CHP) fournissaient en 2013 45 % de la consommation d'énergie du pays.

Les objectifs climatiques pour 2020 de la Finlande dans le cadre de l'Union Européenne sont ambitieux et globalement supérieurs à la moyenne :

	Union Européenne	Finlande
<b>Réduction des gaz à effet de serre<sup>2</sup></b>	-20 %	niveau UE
dans le cadre du système d'échange d'émissions (ETS) <sup>3</sup>	-21 %	niveau UE
hors système d'échange d'émissions (non-ETS) <sup>2</sup>	-10 %	-16 %
<b>Part d'énergies renouvelables dans la consommation brute d'énergie finale</b>	20 %	38 %
part de biocarburants dans le secteur des transports	10 %	20 %
<b>Amélioration de l'efficacité énergétique<sup>4</sup></b>	+20 %	niveau UE

Figure 1 – Objectifs énergie & climat 2020 de la Finlande et de l'UE.

La dernière stratégie Énergie & Climat de la Finlande date de 2013 et comprend plusieurs objectifs à l'horizon 2020 :

- Limitation de la consommation d'énergie finale à 310 TWh ;
- -9 % de consommation de chaleur ;
- -20 % de consommation de pétrole ;
- Atteinte d'une production d'origine éolienne de 6 TWh en 2020 et 9 TWh en 2025 ;
- -33 % de consommation de tourbe d'ici 2025 ;
- Élimination du charbon du mix énergétique en 2025 ;
- Développer le rôle de la biomasse forestière ;
- 10 % de biogaz dans la consommation gazière nationale d'ici 2025.

### Mix électrique

La consommation d'électricité en Finlande s'élève en 2016 à 85,1 TWh. La part de sources renouvelables dans ce mix se chiffre à 36 %. Divers combustibles confondus, les centrales à cogénération de chaleur et d'électricité fournissent 25 % de cette électricité.

L'industrie compte pour 47 % des besoins en électricité du pays, dont la moitié pour l'industrie forestière.

<sup>2</sup> Année de référence : 1990.

<sup>3</sup> Année de référence : 2005.

<sup>4</sup> Par rapport au scénario de référence tel qu'estimé en 2007.

La Finlande est de très longue date déficitaire en électricité avec 22 % de l'électricité consommée importée en 2016.

Il est estimé que la consommation électrique du pays montera à 88 TWh en 2020 et 92 TWh en 2030. Aux vues des projections actuelles (installations de nouvelles capacités, notamment nucléaires, développement des énergies renouvelables), la Finlande s'approcherait alors de l'autosuffisance électrique.

Si le déficit de capacité électrique de la Finlande (environ 2 GW en moyenne) pourra être compensé, la Finlande fait néanmoins face à un réel problème d'approvisionnement lors de ses pics de consommation. Un nouveau record absolu de consommation électrique a été atteint en janvier 2016, à 15,1 GW. Si le réseau n'a pas été mis à mal cette année, de nombreux observateurs expriment cependant leur inquiétude face à la fermeture de capacités de production thermique sur le sol national et aux limites des interconnexions électriques du pays avec ses voisins. Surtout, ces pics de consommation correspondent aux périodes de grand froid l'hiver où la production des nouvelles capacités électriques (éolienne et solaire) est au plus bas, engendrant un véritable déséquilibre sur le réseau d'ici à l'entrée en service d'OL3.

### *Marché de l'électricité & réseau nordique*

La Finlande est pleinement intégrée au marché nordique de l'électricité Nord Pool sur lequel elle constitue une zone de prix. Les interconnexions avec ses voisins sont fortes (2,7 GW avec la Suède, 1 GW avec l'Estonie) mais cependant encore insuffisantes : la connexion avec la Suède est souvent saturée et donne lieu à un tarif plus élevé de l'électricité dans la zone Finlande que sur le prix spot Nordpool.

La Finlande dispose également d'une connexion (>1 GW) avec la Russie. En 2016, 81,7 % de l'électricité importée en Finlande l'a été depuis le réseau nordique et 18,3 % depuis la Russie, dont l'électricité a bénéficié d'un regain de compétitivité suite à la chute du rouble et à la baisse de la demande en Russie.

Comme dans de nombreuses autres régions d'Europe, le prix de l'électricité est à un niveau historiquement bas. Le prix spot Nordpool a été en moyenne de 21 €/MWh en 2015, son niveau le plus bas depuis 2000. En Finlande le prix moyen était à 30 €/MWh, en baisse de 18 % par rapport à 2014. L'année 2016 a cependant connu une légère embellie des prix avec une moyenne de 27 €/MWh.

La faiblesse des prix est ressentie également en Finlande où elle a donné lieu à la fermeture de nombreuses capacités de production au cours des dernières années (>2 GW depuis 2013). Il s'agissait essentiellement de centrales thermiques et à condensation qui n'étaient utilisées que lors des pics de consommation et dont l'érosion des prix de l'électricité et/ou leur non-sélection comme capacité de réserve a rendu l'exploitation non rentable. L'opérateur du réseau électrique finlandais, Fingrid, dispose de 1,35 GW de capacités de réserve et il n'est pas prévu à ce jour d'étendre les contrats de capacité.

### *Le nucléaire, partie intégrante de la culture énergétique finlandaise*

Avec 4 réacteurs en exploitation, 1 en construction et 1 en projet, la Finlande a une longue tradition nucléaire entamée dès les années 1970. Dans le sillage du voisin suédois, la Finlande ouvrit ses premiers réacteurs entre 1977 et 1982.

Site de la centrale	Commune	Opérateur	Réacteur	Type	Puissance nette (MWe)	Entrée en service	Fin d'opération
Hästholmen	Loviisa	Fortum	LO1	REP <sup>5</sup>	488	1977	2027
			LO2	REP	488	1981	2030
Olkiluoto	Eurajoki	TVO	OL1	REB <sup>6</sup>	880	1979	2039
			OL2	REB	880	1982	2042
			OL3	REP	1 600	2018	2078
Hanhikivi	Pyhäjoki	Fennovoima	HA1	REP	1 200	2025	2084

*Aperçu des différents projets nucléaires finlandais.*

15 ans après l'accident nucléaire de Tchernobyl en 1986, la Finlande a été le premier pays occidental à se relancer dans un projet nucléaire d'envergure en démarrant les travaux d'un troisième réacteur à Olkiluoto. En 2010, le gouvernement finlandais a donné son autorisation de principe à la réalisation de deux nouveaux réacteurs. Si TVO, en difficulté financière notamment en raison des déboires d'OL3, n'a pas donné suite pour le potentiel réacteur OL4, Fennovoima a en revanche remis sa demande de Permis de Construire en juin 2015 pour HA1 (réacteur ROSATOM). Actuellement en cours d'examen par les autorités, elle pourrait déboucher sur la délivrance du permis de construire en 2019.

Le projet FH1 est le premier de troisième génération en Europe occidentale et ainsi hautement stratégique pour Rosatom. De nombreuses entreprises françaises sont intéressées par ce projet. En juillet 2016, Alstom-GE et RAOS Project ont signé à Moscou le contrat pour la fourniture du groupe turbo-alternateur de la centrale (qui sera fabriqué à Belfort). En juin 2017, ce sont les entreprises Rolls-Royce (dont les activités nucléaires sont situées en Isère) et Schneider Electric qui ont été choisies respectivement pour les études et la livraison des systèmes de contrôle-commande du projet Fennovoima Hanhikivi 1. Ce projet a fait l'objet d'une présentation détaillée aux industriels français en marge du forum Oulu Nuclear en mai 2017.

Le nucléaire bénéficie d'une opinion publique plutôt favorable dans le pays qui comprend son importance pour atteindre l'indépendance énergétique.

D'une manière générale, la compétence de la filière nucléaire finlandaise est particulièrement reconnue à l'international. Les centrales finlandaises présentent parmi les meilleurs résultats au monde : depuis leur entrée en service au début des années 1980, leur taux de disponibilité s'est maintenu quasi systématiquement au-dessus des 90 %, et souvent au-dessus de 95 % à Olkiluoto<sup>7</sup>, à comparer à une moyenne mondiale de l'ordre de 75 %<sup>8</sup>. Fin octobre 2015, TVO a annoncé avoir battu son record de production d'électricité avec plus de 14 TWh sur l'année 2014 pour un taux de disponibilité de plus de 96 %.

Les opérateurs finlandais attachent une importance particulière au maintien de leurs installations dans un état optimal et ont ainsi été capables d'augmenter la puissance de leurs réacteurs<sup>7</sup>. De fait, les réacteurs d'Olkiluoto, par à-coups successifs, ont progressivement gagné un tiers de puissance supplémentaire. À Loviisa également, les réacteurs produisent aujourd'hui 9 % d'électricité de plus que lors de leur entrée en service.

De plus, l'autorité de sûreté finlandaise, STUK, jouit également d'une excellente réputation. Elle exporte désormais son savoir-faire et conseille les autorités de sûreté saoudienne et turque dans leur développement.

<sup>5</sup> Réacteur à Eau Pressurisée

<sup>6</sup> Réacteur à Eau Bouillante

<sup>7</sup> Source : Ministère finlandais de l'Économie et de l'Emploi. [Nuclear Energy in Finland](#), 2011.

<sup>8</sup> Source : Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives. [Les centrales nucléaires dans le monde](#), 2015.

## *Le projet OL3*

L'EPR finlandais, dont le contrat a été signé en 2003 entre l'exploitant finlandais TVO et le consortium Areva-Siemens, est en construction depuis 2005. La date de mise en service est actuellement prévue fin 2018, soit avec 9 ans de retard sur le planning initial.

La dernière version du planning du chantier date de septembre 2014 et compte un léger retard de deux mois. Areva, TVO et l'autorité de sûreté STUK s'accordent à dire que les relations de travail sur site sont efficaces, ce qui se traduit par plusieurs plateaux communs aux équipes de TVO et d'Areva.

La construction proprement dite de la centrale touche à sa fin et les travaux actuellement menés sont majoritairement de finition. Ainsi, TVO a signalé l'achèvement de la réception du combustible le 9 février 2018. Débutés en décembre 2017, les tests à chaud sont encore en cours et devraient être terminés à la fin du premier semestre 2018. Enfin, l'acceptation de la documentation générale de la centrale par l'autorité de sûreté (le STUK) est prévue pour le deuxième semestre 2018.

Le 11 mars 2018, la signature d'un accord entre les acteurs principaux du projet AREVA, SIEMENS et TVO a été annoncé par TVO dans un communiqué de presse. Cet accord met fin à toutes les procédures judiciaires engagées entre les trois entreprises, notamment le lourd contentieux de plusieurs milliards d'euros arbitré par la Chambre de Commerce Internationale. Cet accord prévoit un paiement en deux étapes de 450 millions d'euros du consortium à TVO ainsi que la possibilité d'un versement supplémentaire pouvant monter jusqu'à 400 millions d'euros en cas de nouveau retard dans le projet. En cas de respect du calendrier, un montant de 150 millions d'euros pourra être versé au consortium AREVA-SIEMENS.

## *Les opérateurs nucléaires*

### **a) Fortum**

Fortum est le plus grand groupe énergétique finlandais, détenu pour moitié par l'État (50,76 %). Il opère la centrale de Loviisa et est également actionnaire de TVO (25 %) et de Fennovoima (6,6 %). Il possède en outre une participation minoritaire (45,5 %) dans la centrale nucléaire d'Oskarshamn en Suède. Outre le nucléaire, Fortum est très investi dans la production d'énergies décarbonées. À noter qu'en 2009 Fortum avait soumis au gouvernement un projet de nouveau réacteur à Loviisa (LO3), cogénérateur nucléaire d'électricité et de chaleur (la cogénération électrique & thermique est par ailleurs largement développée en Finlande mais n'a encore jamais été appliquée à une centrale nucléaire). Cependant, au contraire de TVO et de Fennovoima, il n'a pas obtenu d'autorisation de principe.

### **b) TVO**

TVO est un consortium d'entreprises finlandaises fonctionnant suivant le principe Mankala qui veut que les entreprises actionnaires se partagent l'électricité produite à prix coûtant et au prorata de leur participation dans l'investissement. Il est mené par le groupe PVO (et à travers lui par l'entreprise papetière UPM) et compte en son sein Fortum (25 %) ainsi que plusieurs régies locales d'énergie.

### **c) Fennovoima**

Le consortium Fennovoima est formé en 2007 autour du projet de construire une centrale nucléaire dans le nord de la Finlande. Il regroupe plusieurs entreprises finlandaises dont le métallurgiste Outokumpu (dont les installations basées à Tornio à la frontière suédoise sont particulièrement électro-intensives) et de nombreuses régies locales d'énergie. Le groupe nucléaire russe d'État, Rosatom, retenu pour construire la centrale, est actionnaire de Fennovoima à hauteur de 34 % via sa filiale export Rosatom Overseas. Fortum s'est également joint au projet, prenant une part de 6,6 %.

#### d) STUK.

Ce sont les autorités de sûreté finlandaises, elles sont connues par la population et inspirent une grande confiance. STUK aimerait que la France se lance dans la construction du stockage géologique profond car il craint de se sentir isolé et de voir *in fine* la population s'interroger sur l'intérêt des sites de stockage si la Finlande est seule à faire ce choix. Les autorités de sûreté, en Finlande comme en Suède, définissent les critères de sécurité à observer à partir des recommandations de l'AIEA (International Atomic Energy Agency). Elles les appliquent sans chercher à aller au-delà, les jugeant suffisants. Il est reconnu que le risque zéro n'existe pas.

#### e) VTT.

Ce centre de recherche, impliqué dans le nucléaire, travaille avec les universités voisines. Il est aujourd'hui entré dans la transition énergétique. Ses thèmes sont la bioéconomie, l'économie bas carbone, un environnement propre, la digitalisation, systèmes de production efficaces, santé et bien-être. Le nucléaire est compris dans l'item économie bas carbone. Ce centre comprend environ 2500 personnes.

### *Stockage des déchets*

Le stockage des déchets radioactifs de faible et moyenne activité s'effectue dans des installations localisées auprès des centrales et gérées par les exploitants eux-mêmes. Les déchets sont placés en fûts dans des silos en béton enfouis à une profondeur d'entre 50 et 110 mètres.

En ce qui concerne les combustibles usés, la législation finlandaise (Nuclear Energy Act) interdit leur importation ou exportation. La Finlande ne pratiquant pas le retraitement, les combustibles irradiés sur le sol finlandais ont donc vocation à être traités tels des déchets nucléaires et sont destinés au stockage définitif direct. En revanche, concernant le réacteur de recherche Triga qu'opérait le VTT jusqu'en 2015 un accord a été passé avec les États-Unis pour leur retourner le combustible usé.

114

Pour gérer le stockage des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue, les deux opérateurs nucléaires finlandais historiques, TVO et Fortum, ont choisi de s'associer dans une co-entreprise, Posiva, qu'ils détiennent à hauteur de leurs besoins respectifs de stockage (60 % et 40 %). Après 20 ans de R&D, le site de stockage en couche géologique profonde développé par Posiva, sur le site d'Olkiluoto, est le premier au monde à recevoir son permis de construire, en novembre 2015. Les travaux ont débuté fin 2016 pour une entrée en service prévue à l'horizon 2024.

La solution retenue par Posiva est l'enfouissement, c'est-à-dire le stockage irréversible des déchets. Le projet comprend une usine d'encapsulation, installée en surface, qui placera les combustibles usés dans de grands conteneurs en cuivre. Ces capsules seront ensuite descendues dans des galeries creusées à une profondeur de 400 à 500 mètres dans le granite finlandais. Elles seront stockées dans des cavités puis scellées de bentonite pour assurer leur étanchéité.

Le projet finlandais d'enfouissement des combustibles usés est relativement similaire à son homologue suédois, une grande partie de la R&D ayant d'ailleurs été menée en collaboration avec l'institution suédoise en charge de la gestion des déchets radioactifs, Svensk Kärnbränslehantering (SKB).

Le site sera en activité pendant 100 ans, soit la durée d'exploitation des réacteurs actuels (60 ans), plus le temps de refroidissement des déchets de haute activité (dans les piscines attenantes aux centrales), plus le démantèlement de l'usine d'encapsulation dont il est également prévu que les déchets soient enfouis dans le site de Posiva.

L'avenir du combustible usé de la centrale de Fennovoima en projet à Hanhikivi reste ouvert. En effet, le site d'enfouissement de Posiva a été conçu dès le départ pour n'accueillir que les déchets émanant des centrales de TVO et de Fortum. En juin 2016, un accord a été trouvé pour

que Posiva conseille Fennovoima dans le choix de son propre site d'enfouissement, permettant à cette dernière de satisfaire une des conditions imposée dans l'autorisation de principe pour la construction de la centrale. D'un point de vue géologique, la majeure partie de la Finlande, qui repose sur du granite, pourrait convenir pour recevoir un tel site. Cependant, le Ministère de l'Économie et de l'Emploi continue d'espérer que les deux entreprises parviennent à un accord pour une solution nationale unique d'enfouissement du combustible usé et n'exclut pas de les contraindre à coopérer.

## *Recherche*

Dans le domaine de la recherche (nucléaire et non-nucléaire) le VTT et son homologue français le CEA ont noué, de longue date, de très bonnes relations et une collaboration étroite. Les deux entités sont très présentes dans les programmes européens de recherche.

Pour l'avenir, le CEA et le VTT envisage de poursuivre leurs échanges, dans le domaine du nucléaire (notamment dans le domaine du démantèlement) et d'approfondir leurs relations dans les domaines de la sécurité et des nanotechnologies.

## **SUEDE**

### *Un accord historique de long terme sur le mix électrique*

Le 10 juin, le gouvernement a conclu un accord historique avec trois partis d'opposition sur la question du maintien du parc nucléaire suédois (10 réacteurs actuellement, assurant 41 % de la production électrique) très sensible au niveau politique depuis le référendum des années 1980. Dans un contexte de prix de l'électricité historiquement bas et d'une fermeture possible des 10 réacteurs d'ici 2020 pour cause de rentabilité (voir ND 2016-421177), les cinq partis se sont accordés pour supprimer la taxe sur l'effet thermique des centrales d'ici 2 ans (avec une première baisse dès 2017), ce qui pourrait permettre aux 6 réacteurs les plus récents de fonctionner jusqu'à l'horizon 2040.

L'accord prévoit également que la redevance pour le fonds de gestion de démantèlement du parc (*Kärnavfallsfonden*) soit revue à la baisse en prenant en compte une durée d'exploitation des réacteurs plus longue. Les règles de placement du fonds seront aussi revues à partir de 2018 pour permettre de meilleurs rendements. L'accord précise toutefois que la responsabilité civile des opérateurs sera augmentée de 0,3 à 1,2 Md€ par réacteur, ce qui se traduira par une légère hausse des coûts d'assurance. Dans l'ensemble, ces décisions devraient renforcer la rentabilité des réacteurs.

L'accord maintient, par ailleurs, les dispositions de la loi de juin 2010 concernant la possibilité de construire de nouveaux réacteurs en remplacement des existants (dans la limite de 10 nouveaux réacteurs, sans plafonnement de puissance, ni subventions directes ou indirectes de l'État lors de la construction). La décision de construction de nouveaux réacteurs appartient aux 3 opérateurs (l'énergéticien public Vattenfall, l'allemand E.ON et le finlandais Fortum), mais ceux-ci ne souhaitent pas actuellement investir au regard des perspectives de prix bas de l'électricité sur la bourse Nord Pool sur le moyen terme, et en l'absence de mesures de soutien public.

Si l'accord n'impose pas de date de fermeture du parc nucléaire (évitant ainsi le sujet de compensations financières pour les opérateurs), il inclut toutefois un objectif de production électrique 100 % EnR en 2040. Afin d'atteindre cette cible, le marché des certificats d'électricité verte sera prolongé après 2020 et créera 18 TWh de nouvelle électricité EnR entre 2020 et 2030 (soit environ 1/3 de la production nucléaire actuelle). L'éolien maritime sera particulièrement soutenu : la redevance de raccordement au réseau de transport d'électricité des parcs offshore sera supprimée.

S'agissant de l'hydroélectricité (43 % de la production électrique actuelle), la capacité installée ne devrait augmenter qu'au travers de la modernisation des centrales existantes. Par ailleurs, la taxe foncière sur les barrages hydroélectriques sera réduite progressivement de 82 % sur une

période de 4 ans afin de s'aligner sur le taux des autres centrales électriques. Les pertes fiscales liées à cette baisse et à la suppression de taxe sur l'effet thermique des centrales nucléaires sont de l'ordre d'1 Md€/an. Elles seront partiellement compensées par une hausse de la taxe sur l'électricité de l'ordre de 4,5 €/MWh (hors industrie).

### *Aucun nouveau réacteur nucléaire en Suède et un maintien des prix bas de l'électricité.*

En décidant de prolonger le dispositif de soutien à l'électricité EnR sur la période 2020-2030, cet accord met fin indirectement aux projets de nouveaux réacteurs en Suède. En effet, comme souligné dans la ND 2016-270073, le marché des certificats verts génère une surcapacité sur le marché électrique suédois, ce qui, à son tour, entretient des prix bas sur la bourse Nord Pool et rend la Suède exportatrice depuis plusieurs années (nouveau record franchi en 2015 avec 23 TWh exportés, équivalent à 40 % de sa production nucléaire). La décision de prolonger le marché des certificats après 2020 est notamment à l'origine du départ des Libéraux (parti le plus pro-nucléaire de l'Alliance de centre droit) de la Commission transpartisane de l'énergie (voir ND 2016-421177).

Sous ces conditions (prix de vente sur les marchés à termes de l'ordre de 23 €/MWh, coût élevé des nouveaux réacteurs, pas de subventions directes ou indirectes de l'État), la construction de nouveaux réacteurs apparaît très peu probable.

Pourtant pro-nucléaire, l'industrie suédoise a applaudi les perspectives de maintien des prix bas de l'électricité qui renforceront sa compétitivité. Elle s'est, par ailleurs, félicitée de la décision des cinq partis de l'exonérer de la hausse générale de la taxe sur l'électricité. Les électro-intensifs suédois devraient, en outre, rester exemptés de l'obligation d'achat de certificats verts d'électricité EnR pour des raisons de compétitivité, bien qu'ils bénéficient indirectement de l'impact négatif sur les prix provoqué par la prolongation du marché des certificats verts post 2020. Enfin, l'accord prévoit d'introduire un nouveau programme d'efficacité énergétique pour l'industrie lourde, inspiré par le programme PFE (pour mémoire, mis en cause par l'UE au titre des aides d'État, supprimé en 2012).

### *Les opérateurs nucléaires*

#### **a) SKB.**

SKB est une compagnie fondée par les propriétaires des réacteurs nucléaires en Suède. Elle gère l'entreposage et le stockage des déchets nucléaires qui sont de leur ressort. Cette compagnie a développé le concept de stockage en profondeur des déchets nucléaires de forte activité et l'a étudié via le laboratoire souterrain d'Äspö (démarré en 1986, 460 m de profondeur). SKB a également mis en place le procédé de scellement des canisters.

#### **b) SSM.**

Ce sont les autorités de sûreté en Suède.

#### **c) SNC.**

Ce Conseil national de Suède (à peu près équivalent à la CNE) comprend 11 membres avec des expertises diverses, dont 6 femmes et 5 hommes. Il produit un rapport par an qui fait l'état des lieux sur la gestion des déchets nucléaires. Le SNC organise des séminaires avec les différents acteurs de la filière et le gouvernement, ainsi que d'autres plus ouverts auxquels participent les habitants des communes.

Pas d'équivalent du CEA en Suède. La recherche est faite par les universités.

# COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION

## Membres de la Commission Nationale d'Évaluation :

Jean-Claude DUPLESSY

Anna CRETI

Frank DECONINCK

Pierre DEMEULENAERE

Robert GUILLAUMONT

Vincent LAGNEAU

Maurice LAURENT

Emmanuel LEDOUX\*

Mickaële LE RAVALEC

Maurice LEROY

José-Luis MARTINEZ

Gilles PIJAUDIER-CABOT

Claes THEGERSTRÖM

## Secrétaire général & Conseiller scientifique :

Stanislas POMMERET

## Président honoraire :

Bernard TISSOT

## Secrétariat administratif :

Véronique ADA-FAUCHEUX

Florence LEDOUX

# COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION

---

Président : **Jean-Claude DUPLESSY**

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

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

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

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

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

ISSN : 2257-5758