



# COMMISSION NATIONALE D'EVALUATION

---

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'EVALUATION N°7

NOVEMBRE 2013

# **COMMISSION NATIONALE D'EVALUATION**

---

**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'EVALUATION N°7**

**NOVEMBRE 2013**



# S O M M A I R E

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS .....	1
PRÉAMBULE .....	5
ACTIVITÉS DE LA CNE2.....	7
Chapitre 1 – SÉPARATION-TRANSMUTATION .....	9
1.1 INTRODUCTION.....	9
1.2 SÉPARATION.....	10
1.3 TRANSMUTATION .....	11
1.4 INTÉRÊT D'UNE TRANSMUTATION DE L'AMÉRICIUM .....	15
1.5 SCÉNARIOS POUR LE DÉPLOIEMENT DE RNR-NA DANS LE PARC ÉLECTRONUCLÉAIRE FRANÇAIS.....	15
1.6 ALTERNATIVES AUX RNR-NA.....	16
1.7 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	18
Chapitre 2 – STOCKAGES DANS CIGÉO .....	21
2.1 CONNAISSANCES GÉOLOGIQUES SUR LA ZIRA.....	21
2.2 ÉTUDES EN LABORATOIRE SOUTERRAIN ET DE SURFACE.....	22
2.3 PROGRAMME DE RECHERCHES.....	22
2.4 CAPACITÉS DE SIMULATION NUMÉRIQUE.....	25
2.5 LA RÉALISATION DE LA PHASE D'ESQUISSE .....	26
2.6 REVUE DE PROJET .....	28
2.7 CONCEPT FINAL CIGÉO.....	29
2.8 FLÉXIBILITE NÉCESSAIRE DE CIGÉO.....	29
2.9 COUT DE CIGÉO .....	31
2.10 IMPACTS SOCIO-ÉCONOMIQUES DU PROJET CIGÉO.....	33
Chapitre 3 – LES DÉCHETS FAVL .....	35
Chapitre 4 – PANORAMA INTERNATIONAL 2007-2013 .....	37
4.1 DIFFÉRENTES OPTIONS DE GESTION DES DÉCHETS FA, MA ET HAVL .....	37
4.2 CADRE LÉGAL INTERNATIONAL .....	38
4.3 LABORATOIRES DE RECHERCHE OU SITES DE STOCKAGES SOUTERRAINS.....	38
4.4 SOURCES D'IRRADIATION À SPECTRE RAPIDE.....	38
4.5 PRINCIPALES INITIATIVES INTERNATIONALES SUR LES ADS .....	38
4.6 STOCKAGE GÉOLOGIQUE PROFOND .....	40
4.7 NOUVELLES FILIÈRES POUR LA SÉPARATION-TRANSMUTATION .....	41
4.8 ENSEIGNEMENT, FORMATION ET GESTION DES CONNAISSANCES .....	41
Annexe I – COMPOSITION DE LA COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION - NOVEMBRE 2013 .....	43
Annexe II – ORGANISMES AUDITIONNÉS PAR LA CNE2 .....	45
Annexe III – LISTE DES DOCUMENTS TRANSMIS À LA CNE2 2012-2013.....	47
Annexe IV – VOYAGE D'ÉTUDE EN CHINE ET CORÉE DU SUD DU 3 AU 14 NOVEMBRE 2012.....	49
Annexe V – AVIS DE LA CNE2 TRANSMIS LE 28 MARS 2013 À MADAME LA MINISTRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE .....	53
Annexe VI – CADRE LÉGAL INTERNATIONAL .....	61
Annexe VII – LABORATOIRE DE RECHERCHE OU SITE DE STOCKAGES SOUTERRAINS .....	65
Annexe VIII – SOURCES D'IRRADIATION À SPECTRE RAPIDE .....	71
Annexe IX – PRINCIPALES INITIATIVES INTERNATIONALES SUR LES ADS .....	73
Annexe X – STOCKAGE GÉOLOGIQUE PROFOND.....	75
Annexe XI – NOUVELLES FILIÈRES POUR LA SÉPARATION-TRANSMUTATION .....	81
Annexe XII – ENSEIGNEMENT, FORMATION ET GESTION DES CONNAISSANCES .....	89



## RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

Selon les dispositions de la loi de 2006, la gestion à long terme des déchets de haute activité et à vie longue (HAVL) comporte deux volets : le stockage géologique des déchets de haute et moyenne activité à vie longue du parc actuel et la séparation-transmutation des actinides qui seraient présents dans le combustible usé d'un parc futur.

### SÉPARATION ET TRANSMUTATION

La stratégie scientifique et technologique des acteurs de la Loi prépare bien l'avenir, en explorant les potentialités des réacteurs à neutrons rapides (RNR) ainsi que celles des réacteurs sous-critiques pilotés par accélérateur (ADS).

Le projet très innovant de démonstrateur technologique Astrid doit absolument être mené à terme pour permettre une évaluation complète des capacités des RNR sodium et notamment de leur sûreté. Quant aux RNR refroidis au gaz et aux réacteurs à sels fondus utilisant le thorium, ils ouvrent des perspectives intéressantes, mais seulement pour un avenir lointain ; il convient de poursuivre les études exploratoires engagées avec nos partenaires européens, dans l'espoir de lever les nombreux verrous scientifiques et techniques.

Les études de systèmes pilotés par accélérateur sont portées par le CNRS, associé au projet Myrrha du SCK-CEN belge ; elles doivent être poursuivies pour permettre, ultérieurement, la réalisation d'un système préindustriel.

1

Des avancées majeures ont été obtenues dans le domaine de la séparation au cours des dernières années. Elles ont porté sur la mise au point de procédés d'extraction de l'uranium et du plutonium du combustible usé pour les recycler, ainsi que sur la séparation sélective des actinides mineurs à des fins de transmutation éventuelle. Pour former des personnels de haut niveau capables de conduire les installations futures dans des conditions de sûreté optimales, il est essentiel que les études et recherches en séparation et en génie des procédés soient maintenues à un niveau d'excellence.

L'exploration des voies possibles de transmutation de l'américium, notamment pour en diminuer les coûts, doit encore faire l'objet de recherches scientifiques poussées.

Dans un contexte économique tendu, la Commission considère qu'une toute première priorité doit être donnée à la réalisation du démonstrateur industriel Astrid ainsi qu'à celle de l'atelier de fabrication de son combustible. Dans un second temps, un atelier de retraitement du combustible Mox irradié dans Astrid devra être mis en œuvre pour démontrer la capacité de ce réacteur à fonctionner avec le plutonium de son combustible usé et un simple ajout d'uranium appauvri. Ceci permettra de valider son fonctionnement en mode iso-générateur avec un niveau de sûreté au moins égal à celui alors atteint par les EPR. La transmutation industrielle de l'américium en mode hétérogène devra alors être testée. Pour permettre la réduction du stock final de plutonium, le fonctionnement d'Astrid en mode sous-générateur, avec le même niveau de sûreté, devra être impérativement démontré.



## STOCKAGE GÉOLOGIQUE CIGÉO

Plus de quinze années d'études du site de Meuse/Haute-Marne ont démontré les excellentes qualités de confinement de la couche d'argilite (COx) de plus de 130 m d'épaisseur située à 500 m de profondeur sur une extension suffisante pour y implanter le stockage des déchets du PIGD. On ne progressera plus notablement dans la connaissance des propriétés de cette zone avant un accès direct à l'argilite par les puits et les galeries qui devraient être creusées pour réaliser la tranche 1 de Cigéo. L'Andra devra donc définir un programme d'accompagnement scientifique et technique à mener pendant la réalisation des travaux de cette tranche.

Bénéficiant d'un cadre de recherche international, l'Andra a lancé un programme ambitieux d'étude des scellements et notamment des bétons qui confineront les noyaux d'argile gonflante au sein du massif. Compte tenu de la durée considérable d'un essai à l'échelle 1, réalisable seulement dans le stockage lui-même, la modélisation est essentielle. Elle a davantage progressé dans le domaine de la physicochimie que dans celui de l'hydromécanique. La question des scellements, chargés d'assurer une redondance de confinement de la radioactivité, ne pourra donc pas être traitée de manière complète dans le dossier de demande d'autorisation de création (DAC) de Cigéo en 2014. Ce n'est pas rédhibitoire à ce stade, à condition que l'Andra poursuive activement son programme de recherche en intégrant le retour d'expérience des autres pays.

Des progrès significatifs ont été réalisés en matière de modélisation des processus hydrauliques et de transport de solutés en présence ou non de gaz. L'Andra possède à présent des outils très performants pour comprendre et prévoir des phénomènes engendrés par les transferts de fluides au sein du COx. Ces modèles permettront d'évaluer les performances du stockage et d'affiner l'analyse de sûreté qui accompagnera la DAC.

2

Une revue de projet des esquisses Cigéo, avec la participation des producteurs de déchets, a été conduite début 2013. Elle a confirmé les choix de l'Andra, qui prennent en compte les exigences de sûreté, notamment en matière d'incendie ; elle a proposé aussi de porter à 500 m au lieu de 400 la longueur des alvéoles MAVL pour réduire les coûts. L'Andra doit maintenant préciser les pistes d'optimisation du projet Cigéo et les questions scientifiques et techniques à traiter pendant et après le creusement. Ce programme devra être accompagné d'un échéancier et être impérativement disponible avant le dépôt de la DAC. Cigéo devra avoir une flexibilité suffisante, pour prendre en charge la grande variété des déchets MAVL et s'adapter aux évolutions possibles de la politique énergétique. Des études poussées sont encore nécessaires pour prévoir le conditionnement et le mode de stockage de matériaux contenant des métaux pyrophoriques ou des produits organiques. Comme pour les bitumes, l'Andra et les producteurs devront constituer pour ces déchets un dossier complet de connaissances précisant les études sur leur comportement en conditions normales et incidentielles.

La Commission a recommandé à maintes reprises que, dans le respect des prérogatives de l'Andra, le projet bénéficie de l'expérience des producteurs tout au long de sa réalisation. Elle souligne que la revue de projet de début 2013 s'est achevée quelques jours seulement avant le lancement du Débat public. Ce mode de fonctionnement n'est pas satisfaisant. La Commission aime à penser qu'à l'avenir, la concertation souhaitable entre les parties prenantes sera conduite plus en amont de tout dépôt de dossier, notamment de celui de la DAC.



Le coût prévisible de Cigéo doit être arrêté fin 2013 par le Ministre, en s'appuyant sur les conclusions du groupe de travail présidé par la DGEC et auquel participent, avec l'Andra, les producteurs de déchets. Ce coût sera revu à la hausse par rapport aux estimations de 2005. Il est important que l'Andra fournit rapidement une évaluation fine du coût de la première tranche du projet. Il serait souhaitable de procéder à des comparaisons avec les méthodologies, les coûts et les modalités de financement retenus par les pays qui ont des projets de stockage, notamment la Belgique, la Finlande et la Suède.

Cigéo aura un fort impact socio-économique sur la région d'accueil. Les conséquences, positives et négatives, induites par la construction puis l'exploitation de Cigéo doivent être identifiées, analysées et prises en compte en concertation avec les populations.

## DIMENSION INTERNATIONALE

La plupart des pays utilisant l'énergie nucléaire disposent d'un centre de stockage opérationnel ou en construction pour les déchets de faible (FAVC) ou moyenne activité (MAVC) à vie courte. Pour les déchets de faible (FAVL) ou moyenne activité (MAVL) à vie longue peu de sites sont opérationnels, ou même en construction ; aux Etats-Unis, le WIPP (Waste Isolation Pilot Plant, creusé à ~600 m de profondeur dans le sel au Nouveau Mexique) est opérationnel depuis 1999 ; il reçoit des déchets transuraniens du programme militaire.

L'AIEA et l'Union européenne spécifient que le stockage géologique est la solution de référence pour garantir la sûreté à long terme de la gestion des déchets radioactifs HAVL et des combustibles usés dans les pays où ils sont considérés comme déchets. Trois options de base sont envisagées pour la gestion du combustible irradié.

3

- Le stockage géologique direct après un entreposage de refroidissement (Finlande, Suède, Canada, ...).
- Le recyclage complet ou partiel du combustible ; un retraitement permet d'extraire l'uranium et le plutonium; les déchets HAVL issus de ce retraitement et les combustibles non recyclés sont entreposés en attente de stockage géologique (France, Belgique). L'avenir du retraitement est fortement lié à la politique choisie pour gérer le plutonium.
- Un entreposage d'attente pour les pays qui n'ont pas encore de site identifié (Etats-Unis, Corée du Sud, Pays-Bas, ...).

Pour le stockage de déchets de haute activité à vie longue, plusieurs pays ont des programmes d'études et recherches conduits dans des laboratoires souterrains (Allemagne, Belgique, France, Suède, Suisse, ...). La Finlande, la France et la Suède sont les pays les plus avancés car le début de construction d'un stockage y est prévu dans 3 à 5 ans pour une mise en exploitation vers 2025/2030.







## PRÉAMBULE

La Commission reprend, intégralement, les avis qui avaient été présentés en préambule de son précédent rapport de novembre 2012, tels qu'ils sont rappelés ci-après. Ses avis ont été élaborés dans le respect de la Loi de 2006 et de la politique énergétique admise jusque là, qui préconisait notamment :

- la poursuite de la production électronucléaire,
- le retraitement de la totalité du combustible usé,
- la fabrication et l'utilisation du combustible Mox,
- la poursuite des recherches sur les réacteurs à neutrons rapides de IV<sup>ème</sup> génération.

Si certains de ces principes, qui avaient guidé sa réflexion, devaient être remis en cause, il en résulterait des conséquences importantes sur l'ensemble du cycle électronucléaire et, en particulier, sur le retraitement du combustible usé. La Commission aurait alors à reconsidérer ses conclusions en tenant compte de la nouvelle gestion des matières et des déchets, qui serait imposée par les nouveaux scénarios envisagés.

Comme elle l'avait fait en 2012, la Commission se juge en droit d'affirmer que :

- les verres et l'argile d'une couche géologique profonde sont des barrières efficaces de confinement des produits de fission et des actinides pour des centaines de milliers d'années. Cette durée suffit à abaisser leur nocivité à un niveau tel qu'elle ne pose plus de problème pour les populations vivant au-dessus du stockage ;
- le site géologique de Meuse/Haute-Marne a été retenu pour des études poussées, parce qu'une couche d'argile, de plus de 130 m d'épaisseur et à 500 m de profondeur, a révélé d'excellentes qualités de confinement : stabilité depuis 100 millions d'années au moins, circulation de l'eau très lente, capacité de rétention élevée des éléments ;
- la conception de l'ouvrage à planter - puits, galeries, alvéoles, ventilation, scellements - et la mise au point des méthodes et procédures nécessaires à sa sûreté, en exploitation et après sa fermeture définitive, sont en cours d'étude. Elles sont assez avancées pour engager la phase industrielle conformément à la loi. C'est un travail de réalisation concrète, avec toutes les étapes de développement, d'innovation et d'ingénierie nécessaires. Il doit être suivi avec soin. L'examen en 2015 de la demande de création du stockage constituera un jalon important de ce suivi ;
- le plutonium issu du cycle du combustible est une substance dangereuse, mais il peut aussi devenir une ressource précieuse, s'il est utilisé dans des réacteurs à neutrons rapides. Ceux-ci présentent l'avantage supplémentaire de consommer de l'uranium appauvri, actuellement sans emploi ; ainsi seraient épargnées les charges lourdes de la mine et de l'enrichissement. De plus, ils pourraient éventuellement servir à transmuter des actinides mineurs en isotopes à vie plus courte. Les recherches et les réalisations consacrées à la filière à neutrons rapides en garantissent déjà la faisabilité scientifique et technique. Pour en tester la validité industrielle et économique, un réacteur expérimental et son cycle associé - fabrication et retraitement du combustible - sont indispensables. Sa réalisation, dans le respect de la loi de 2006, préserve l'éventail des choix énergétiques ; elle permet de renforcer l'expertise française dans le nucléaire civil et d'assurer la place de la France et de l'Europe dans la compétition planétaire.



## ACTIVITÉS DE LA CNE2

La période de novembre 2012 à octobre 2013 est la 6<sup>ème</sup> année de plein exercice de la CNE2 ; elle fait l'objet du présent rapport n° 7. Depuis la publication de son précédent rapport en décembre 2012, la Commission a présenté son rapport n° 6 à différentes instances : l'Opecst, les départements ministériels et une délégation de la Commission s'est rendue à Bar le Duc les 4 & 5 avril 2013, pour présenter son rapport aux membres du Clis de Meuse/Haute-Marne.

\* \* \*

La Commission (cf. annexe I) a suivi la même méthode de travail que les années précédentes. Elle a procédé à 14 auditions (cf. annexe II), dont 5 d'une pleine journée et 7 demi-journées, chacune à Paris et 2 sur le site du laboratoire de Meuse/Haute-Marne à Bure/Saudron, ainsi qu'à un certain nombre de réunions complémentaires. Les membres de la Commission, tous bénévoles, ont entendu 92 personnes de l'Andra et du CEA, mais également des institutions universitaires et organismes industriels, français et étrangers. A ces auditions, qui rassemblaient en moyenne une cinquantaine de personnes, assistaient également des représentants de l'Autorité de sûreté nucléaire, d'Areva, d'EDF, de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire et de l'Administration centrale.

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

La Commission s'est rendue en Chine et Corée du Sud du 3 au 14 novembre 2013, elle a visité le site de stockage de Beishan, le CEFR, et le LILW Disposal Center (cf. annexe IV). 7

Cette année, la Commission a rencontré la CNS/ESK<sup>1</sup> et visité le laboratoire du Mont-Terri en Suisse.

\* \* \*

Le présent rapport est organisé selon les deux volets d'E&R complémentaires de la gestion des matières et déchets radioactifs : la séparation-transmutation dans le chapitre 1 et l'entreposage et le stockage des déchets de haute activité à vie longue (HAVL) et de moyenne activité à vie longue (MAVL) dans le chapitre 2. La gestion des déchets de faible activité à vie longue (FAVL) est abordée dans le chapitre 3.

Conformément à sa mission, la Commission poursuit son observation du panorama international. Les principaux éléments sont reportés dans le chapitre 4.

\* \* \*

Enfin, dans la perspective du débat public, Mme Delphine Batho, Ministre de l'environnement, du développement durable et de l'énergie a envoyé le 3 décembre 2012 une lettre de mission au Président de la Commission nationale d'évaluation afin que celle-ci évalue l'état d'avancement des recherches, examine et formule un avis sur les dossiers concernant la séparation-transmutation, l'entreposage des déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue (HAVL-MAVL), l'esquisse Cigéo ainsi que la réversibilité. Le 25 mars 2013, la Commission a transmis à Madame la Ministre de l'environnement, du développement durable et de l'énergie les avis suivants :

- Avis de la Commission sur les propositions de l'Andra : la réversibilité

---

<sup>1</sup> Eidgenössische Kommission für nukleare Sicherheit/Commission fédérale de sécurité nucléaire.

- Avis de la Commission sur les propositions de l'Andra : l'entreposage des déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue (HAVL-MAVL)
- Avis de la Commission sur les propositions de l'Andra : l'esquisse Cigéo

Ces avis figurent en annexe V du présent rapport et ont été rendus publics, ils peuvent également être consultés sur le site web de la Commission nationale d'évaluation, [www.cne2.fr](http://www.cne2.fr).

\* \* \*

# Chapitre 1

## SÉPARATION-TRANSMUTATION

### 1.1 INTRODUCTION

#### 1.1.1 Etat des lieux et perspectives

La France a choisi de traiter le combustible nucléaire usé, ce qui conduit à séparer de l'uranium et du plutonium les produits de fission associés et les actinides mineurs. Produits de fission et actinides sont aujourd'hui vitrifiés, puis conditionnés à des fins de stockage géologique. Le plutonium est recyclé pour fabriquer du combustible Mox utilisé dans les REP 900 MWe. Vingt deux réacteurs REP sur les cinquante huit que comporte le parc nucléaire français utilisent du Mox. L'uranium, quant à lui, est utilisé dans les combustibles dits Ure fabriqués à partir de l'Uranium de Retraitement Enrichi. Actuellement, les combustibles Mox et Ure usés ne sont pas retraités, mais entreposés. La décision de les retraitrer est subordonnée à celle du déploiement de réacteurs à neutrons rapides (RNR). En effet, en raison de la modification de la composition isotopique du plutonium Moxé lors de son passage en réacteur, il est impossible en pratique d'envisager son recyclage en réacteur à eau pressurisée. En revanche, ce plutonium associé à de l'uranium appauvri pourrait servir de combustible pour des réacteurs à neutrons rapides. La possibilité de le retraitrer une fois usé dans un RNR permettrait, en théorie, de le recycler indéfiniment dans ce type de réacteur. Cette propriété justifie les études et recherches sur les RNR de 4<sup>ème</sup> génération dans le monde. En France, le CEA, associé à Areva, à EDF et à d'autres industriels, porte le projet du démonstrateur industriel appelé Astrid, destiné à s'assurer que l'on peut construire et exploiter un RNR satisfaisant à des normes de sûreté supérieures ou égales à celles des réacteurs de 3<sup>ème</sup> génération actuelle et susceptible de recycler son propre plutonium à des coûts compétitifs.

9

#### 1.1.2 Réacteurs à neutrons rapides : diverses modalités de mise en œuvre

La France disposera à l'horizon 2040 de plus de 450 000 tonnes d'uranium appauvri (Uap) et de retraitement (Ure), provenant des usines d'enrichissement ou de retraitement de matières (uranium et plutonium). Ces matières pourront servir au déploiement d'une série de RNR, qui viendraient compléter ou remplacer des REP du parc actuel. Un parc RNR de 60 GWe (puissance équivalente au parc électronucléaire actuel) consommerait en régime stationnaire moins de 50 tonnes d'Uap/an ce qui garantirait à la France une indépendance d'approvisionnement pour des siècles, l'importation d'uranium naturel et l'enrichissement en 235U n'étant dès lors plus nécessaires.

Le combustible Mox usé contient environ 6 % de plutonium (1 % dans le combustible UOX usé). Ainsi, chaque année 7 tonnes de plutonium sont produites et s'ajoutent au stock déjà accumulé (environ 300 tonnes en 2013). De ce fait, en 2030 le retraitement des Mox et UOX entreposés permettrait de disposer du plutonium nécessaire au déploiement de plusieurs RNR de 1 500 MWe.

Un des scénarios envisagés par le CEA, en association avec EDF et Areva, prévoit la mise en œuvre d'un RNR refroidi au sodium (RNR-Na) tous les quatre ans environ, une fois que le démonstrateur industriel Astrid aura permis de valider la filière. Un tel déploiement permettrait de stabiliser l'inventaire des Mox entreposés. Dans un second temps, la mise en œuvre de RNR pourrait permettre de réaliser la transmutation de certains actinides mineurs en éléments de durée de vie plus courte. En accord avec la Loi de 2006, le CEA a engagé des études et recherches pour la mise en œuvre industrielle de la séparation et de la transmutation. Le développement du démonstrateur industriel Astrid s'inscrit dans cette démarche. L'étude des ADS (Accelerator Driven System), alternative à l'utilisation de RNR pour la transmutation des actinides mineurs est menée dans un cadre européen avec le projet Myrrha. Par ailleurs, la France est engagée dans le projet européen de RNR refroidi au gaz "Allegro". De plus, le CNRS mène des études sur les réacteurs à sels fondus, en privilégiant les spectres neutroniques rapides et pouvant utiliser un combustible à base de thorium.

*La Commission considère que la stratégie scientifique et technologique des acteurs de la Loi prépare bien les décisions à venir, notamment en explorant les voies potentielles dans le domaine des RNR. L'avis que la Commission a remis au Gouvernement sur la séparation-transmutation figure en annexe du présent document.*

## 1.2 SÉPARATION

Le CEA et Areva maîtrisent parfaitement le procédé de retraitement du combustible UOX usé issu des REP du parc électronucléaire. Les développements de la séparation au cours de ces dernières années ont porté sur la mise au point de procédés pour la co-extraction de l'uranium et du plutonium des combustibles UOX usés et des Mox usés en vue de leur recyclage, et sur la séparation sélective des actinides mineurs à des fins de transmutation éventuelle. Les avancées concernent de nouvelles molécules extractantes testées sur des solutions réelles de combustible usé dans l'installation Atalante du CEA. Les molécules sélectionnées satisfont aux exigences d'une mise en œuvre industrielle (notamment : résistance à la radiolyse, solubilité, sélectivité).

10

Plusieurs approches ont été développées, de façon à répondre aux diverses options possibles pour la transmutation des actinides :

- le procédé SANEX, qui sépare l'américium associé au curium en aval du procédé PUREX séparant uranium et plutonium ;
- le procédé EXAm, qui permet d'isoler l'américium en aval du procédé PUREX ;
- le procédé GANEX, qui peut séparer le plutonium associé aux actinides mineurs, mais aussi l'uranium et les produits de fission.

*La Commission recommande de maintenir à un niveau d'excellence les recherches et développements dans le domaine de la séparation et du génie des procédés. Plus particulièrement, l'accent devra être mis sur la chimie et la chimie physique des solutions et des matériaux contenant des actinides. De plus, si les effluents issus des opérations de séparation sont maintenant bien caractérisés, le traitement et le conditionnement des déchets générés doit encore faire l'objet d'études et de recherches. La Commission demande que des études et recherches soient menées sur l'élaboration de matrices stables pour le stockage de l'iode.*

*Ce programme de chimie et de chimie physique des radionucléides, en particulier des actinides, est indispensable au succès du projet Astrid et ne pourra être conduit à terme qu'en maintenant un personnel de haut niveau, apte à innover et à conduire les développements des parcs actuel et futur dans des conditions de sûreté optimales.*

## 1.3 TRANSMUTATION

### 1.3.1 Gestion des matières et outils

En vue d'exploiter au mieux les ressources énergétiques de l'uranium appauvri et du plutonium (obtenu après traitement des combustibles Mox usés), la France développe des études et recherches sur les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na) et les réacteurs à neutrons rapides refroidis au gaz (RNR-G), en portant principalement l'effort, aujourd'hui, sur les RNR-Na. Ce choix, confirmé par le Gouvernement en 2005, est justifié par :

- la capacité des RNR à combiner la production d'électricité et le multi-recyclage du plutonium ; celui-ci, associé à l'238U (composant essentiel de l'uranium appauvri) dans un combustible spécifique, permet de valoriser le potentiel énergétique de l'uranium, qui deviendrait ainsi la première des ressources énergétiques fossiles dont la France disposerait en abondance ;
- l'expérience acquise dans le monde et, plus particulièrement en France, avec la réalisation et l'exploitation des réacteurs Phénix et Superphénix ;
- la potentialité des RNR à transmuter industriellement tout ou partie des actinides mineurs.

### 1.3.2 Astrid (Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration)

11

Le projet Astrid vise à démontrer la possibilité technique et industrielle de produire de l'électricité avec un RNR-Na fonctionnant avec un combustible 238U-Pu et garantissant un niveau de sûreté équivalent, voire supérieur, à celui de l'EPR.

Le projet est mené au sein d'amples collaborations :

- au plan International, dans le cadre du Forum Génération IV, où la France est associée à l'Union européenne, au Japon, à la Russie, aux Etats-Unis, à la Corée du Sud et à la Chine pour le développement de RNR-Na ;
- au niveau national, le projet Astrid est mené par le CEA en association avec Areva, EDF, Alstom, Bouygues, Comex...

Le réacteur Astrid est conçu pour avoir une puissance de 600 MWe, correspondant, pour la sûreté, à des dimensions de cœur qui permettent une extrapolation ultérieure à des réacteurs de 1 500 MWe. L'utilisation du sodium comme fluide caloporteur est justifiée par :

- son inertie thermique, qui maintient un excellent comportement du réacteur en cas de perte de source froide ;
- son point d'ébullition élevé, qui assure une différence de 300 °C entre la température en conditions opératoires et la température d'ébullition de Na ;
- sa faible corrosivité en comparaison de celle du plomb qui, associé au bismuth, est utilisé comme caloporteur dans certains RNR.

Par contre, la très grande réactivité du sodium avec l'eau et l'air et les risques accrus de réaction en cas de vidange du sodium exigent des aménagements et des innovations pour atteindre le niveau de sûreté visé. Par ailleurs, une puissance de 600 MWe correspond à la capacité de production électrique qui permettrait, Astrid étant couplé au réseau, de couvrir les frais de fonctionnement de ce réacteur grâce à la vente d'électricité.

### a) Les innovations d'Astrid

Le CEA, en association avec ses partenaires, propose une série d'innovations visant à pallier les inconvénients connus des RNR-Na, dont l'augmentation significative de la réactivité en cas de disparition du sodium dans des cœurs de dimension importante. C'est notamment :

- la conception d'un cœur de référence dit CFV (cœur à faible effet de vidange), pour éviter tout emballage de la réaction en cas de vidange locale du sodium ; les innovations consistent en une réduction de la proportion volumique du sodium dans le cœur et en l'ajout d'une cavité remplie de sodium au dessus du faisceau d'aiguilles (plenum sodium) ;
- une géométrie hétérogène du cœur, du fait de la présence d'une plaque fertile en oxyde d'uranium appauvri à mi-hauteur et d'une différenciation des zones fissiles internes et externes (cœur en creuset) ;
  - ✓ Ces deux premières innovations permettent de prévenir l'augmentation de réactivité provoquée par une vidange de sodium, en amplifiant significativement la fuite des neutrons hors des zones fissiles du cœur. Ces avancées, qui promettent un comportement favorable du cœur en cas de perte de refroidissement, doivent être encore validées au plan international. Un programme franco-américain de vérification et simulation indépendantes est en cours de réalisation. Un programme franco-russe (Genesis) de physique neutronique, utilisant les maquettes critiques BFS (Russie) et MASURCA (Cadarache), est prévu.
- l'évacuation de la puissance résiduelle du combustible en cas d'arrêt de la réaction en chaîne (barres de contrôle descendues) nécessite un refroidissement continu du cœur. Le projet Astrid prévoit des systèmes optimisant la convection naturelle au sein du circuit primaire, avec des échangeurs au plus près de la source de chaleur pour assurer un refroidissement même en cas de rupture d'alimentation électrique des pompes ;
- la mise au point d'un système de refroidissement Na-Na-gaz (système de référence) utilisant de l'azote sous pression (18 MPa) à la température opératoire de 300 à 500 °C pour alimenter des turbines à gaz serait une innovation majeure du point de vue de la sûreté ; alternativement, un circuit tertiaire gaz, ajouté aux circuits sodium primaire et secondaire pour convertir la chaleur en vapeur d'eau (Na-Na-gaz-eau), permettrait également d'éviter tout contact eau-sodium accidentel ;
- des E&R sont également en cours pour définir l'architecture d'un récupérateur de corium, de manière à en maintenir la sous-criticité et le refroidissement à long terme et à limiter les interactions corium-récupérateur ;
- des avancées significatives ont été réalisées pour l'inspection en service grâce au retour d'expérience de Phénix.

*La Commission apprécie favorablement l'effort d'amélioration de la sûreté dont bénéficierait Astrid en comparaison des RNR actuels. Elle recommande de poursuivre sur cette voie, en approfondissant les techniques d'inspection et de réparation en présence de sodium liquide. Les collaborations internationales (Etats-Unis d'Amérique et Russie) jouent un rôle majeur, notamment en donnant accès à des capacités d'irradiation. La Commission demande donc que lui soient présentés les résultats du programme international de validation de la physique neutronique et des éléments constitutifs du cœur d'Astrid.*

### **b) Les matériaux**

Le choix de l'oxyde mixte (U-Pu)O<sub>2</sub> comme combustible de référence pour le cœur d'Astrid repose sur un retour d'expérience de plus de quarante ans recueilli grâce aux expériences réalisées avec Rapsodie, Phénix et Superphénix. Les installations techniques permettant la production de ce combustible sont maîtrisées industriellement (Usine Melox). Il reste à démontrer la faisabilité industrielle de la production de Mox à 25 % de Pu.

S'agissant des matériaux de gainage et du tube hexagonal, le choix se porte dans un premier temps sur un acier austénitique, dont le retour d'expérience de Phénix a montré l'excellente tenue en conditions d'exploitation. Les E&R, essentiellement fondées sur l'analyse de nuances irradiées de cet acier, sont en cours et devraient permettre la production et la qualification du premier cœur d'Astrid dans les délais prévus par la Loi. Un important programme d'E&R concerne les aciers ODS de type martensitique ou ferritique. En effet, le matériau retenu doit avoir un taux de gonflement très faible sous irradiation pour satisfaire aux exigences d'un réseau de combustible très serré et à taux de combustion élevés (>150 MWj/t). Les E&R concernent aussi des matériaux SiC-SiC et des matériaux à base de vanadium, qui autoriseraient des températures de fonctionnement du réacteur très élevées.

*De tels matériaux, aptes à fonctionner à haute température, permettraient un rendement plus élevé et une amélioration notable de la sûreté. La Commission recommande que les industries en mesure de fabriquer les composants en utilisant des ODS ou des SiC-SiC soient identifiées au plus tôt et impliquées durablement dans la réalisation du projet.*

### **c) Mise en œuvre d'Astrid**

L'avant-projet détaillé (APD) devait initialement être présenté en 2017, et, s'il était suivi d'une décision de construction, celle-ci aurait débuté en 2018 pour un achèvement vers 2023. Aujourd'hui, le CEA a présenté un calendrier révisé à la demande du Gouvernement ; ceci conduit à un APD en 2019 et une divergence possible en 2026. Cinq cents personnes, pour moitié CEA et pour moitié personnels des industries françaises et étrangères, contribuent aujourd'hui au projet.

Astrid doit bénéficier d'une grande flexibilité, car il doit, à la fois, préfigurer un réacteur électronucléaire industriel (sûreté et modes d'exploitation) et accueillir des expérimentations sur des combustibles innovants et sur la transmutation d'actinides mineurs.

Les installations devront aussi démontrer qu'après avoir fonctionné avec un cœur dont le plutonium sera issu du retraitement de Mox, Astrid sera capable de réutiliser son propre Pu pour fabriquer un nouveau combustible. Un programme complet demande donc d'ajouter au réacteur :

- un atelier de fabrication du combustible UPuO<sub>2</sub> (AFC) ;
- un atelier de traitement du combustible usé (ATC) permettant le recyclage de l'uranium et du plutonium.

*La Commission recommande que les E&R se poursuivent et que le planning intègre la construction des installations AFC et ATC. Il faut en particulier, utilisant l'expérience acquise avec le réacteur Phénix, dimensionner et concevoir la protection radiologique du personnel au cours des diverses opérations.*

### 1.3.3 La transmutation des actinides mineurs

Dans un second temps, la transmutation des actinides dans un RNR pourrait être testée selon deux modes :

- homogène, en incorporant dans le combustible les actinides mineurs mêlés au plutonium issus de GANEX ;
- hétérogène, en plaçant des couvertures chargées contenant les actinides en périphérie du cœur ; deux types de couvertures peuvent être envisagés :
  - ✓ CCAM, pour couvertures chargées en actinides mineurs : elles contiennent l'américium et le curium obtenus par le procédé SANEX ;
  - ✓ CCAm, pour couvertures chargées en américain obtenu grâce au procédé EXAm.

La transmutation en mode homogène exige la présence d'actinides mineurs à des teneurs significatives dans le combustible, ce qui peut avoir un effet négatif sur la sûreté. Le retraitement d'un tel combustible nécessitera des études spécifiques sur la criticité et la radioprotection.

*La Commission rejoint le CEA dans les choix qui lui ont été présentés pour la transmutation des actinides et considère que les E&R doivent porter en priorité sur la transmutation hétérogène du seul américain, en couvertures chargées (CCAm).*

14

Alors qu'une transmutation homogène exigerait de nombreuses percées technologiques (cœur contenant U, Pu et Am), le choix de couvertures chargées permet une progressivité dans la mise en œuvre de la transmutation dans Astrid. En effet, les CCAm ne seront déployées qu'après le démarrage du réacteur et la validation de tous les paramètres de fonctionnement et de sûreté. Ce choix permet aussi de séparer la fabrication du combustible (uranium et plutonium) de celle des couvertures (américium et uranium) et évite la présence d'actinides dans toutes les étapes du cycle du combustible.

*La Commission souligne que la présence d'américium dans les couvertures chargées nécessitera des mesures spécifiques de radioprotection pour les personnels et pour les installations.*

Le programme E&R du CEA concernant les couvertures chargées en américain comporte plusieurs étapes importantes :

- l'acquisition de toutes les données physiques permettant la définition de la géométrie des couvertures, de leur teneur en américain et de leur positionnement pour assurer le degré de sûreté exigé pour la mise en œuvre du réacteur ;
- l'expérience intégrale en laboratoire du procédé EXAm, pour le tester, depuis la dissolution du combustible jusqu'à la production de la solution contenant l'américium, et gérer l'ensemble des flux et effluents ;
- la mise en œuvre du procédé EXAm à grande échelle ;
- la synthèse des pastilles d'UAmO<sub>2</sub> au niveau du laboratoire pour des études amont d'irradiation ;
- la synthèse à grande échelle de pastilles d'UAmO<sub>2</sub>.

## **1.4 TRANSMUTATION**

*La Commission rappelle que la transmutation des actinides ne concerne pas les déchets HAVL produits ou à produire par le parc de réacteurs actuel. Ces déchets sont vitrifiés de manière irréversible. Après conditionnement, ils sont destinés à un stockage géologique profond. Les études réalisées par l'Andra ont montré que les actinides présents dans ces colis migrent si lentement dans l'argile qu'ils ne peuvent pas contribuer à une radioactivité détectable à l'exutoire.*

Dans l'hypothèse à l'échéance 2040-2050 d'un parc comprenant des RNR, les actinides pourraient être séparés avant la vitrification, ce qui permettrait de diminuer l'emprise des alvéoles de stockage des déchets HAVL et diminuerait sensiblement la radio-toxicité potentielle mais entraînerait des difficultés supplémentaires en termes de radioprotection dans les installations du cycle nucléaire. A ce jour, les E&R dédiées envisagent la transmutation du seul amérium, l'intérêt de la transmutation du curium restant à démontrer.

L'intérêt de la transmutation de l'amérium tient à sa contribution importante à l'émission de chaleur par les colis vitrifiés. Les études ont montré que l'extraction de l'amérium des déchets HAVL permettrait de réduire d'un facteur 7 l'emprise des alvéoles dédiés, ce qui, pour l'inventaire actuel, entraînerait à une réduction d'un facteur 3 pour l'ensemble du stockage. Cette extraction, cependant, ne permettrait de faire l'économie ni de l'entreposage des colis vitrifiés pendant les 120 ans nécessaires à la décroissance des produits de fission, ni d'un stockage géologique des déchets HAVL résiduels.

Au plan économique, il faudra mettre en balance ce gain de place en regard de l'augmentation significative du coût de production de l'électricité. Selon les estimations du CEA, elle serait de 5 à 9 % si la transmutation était effectuée en RNR et d'environ 25 % si elle faisait appel aux ADS.

15

Il est difficile aujourd'hui de faire un bilan définitif des avantages et inconvénients de la mise en œuvre de la transmutation. Même limitée au seul amérium, elle réduirait significativement la radiotoxicité des déchets stockés mais, pour un stockage dans une couche d'argilite, qui retient durablement les actinides, cet avantage vaut principalement dans des scénarios particuliers tels que celui de l'intrusion humaine.

*Toutefois des percées scientifiques et techniques pourraient modifier profondément la conception de la transmutation. La Commission recommande donc fortement la poursuite des recherches, demandées par les lois de 1991 et 2006. Elle estime que ces recherches constituent un objectif important du programme Astrid.*

## **1.5 SCÉNARIOS POUR LE DÉPLOIEMENT DE RNR-NA DANS LE PARC ÉLECTRONUCLÉAIRE FRANÇAIS**

Dans l'hypothèse d'une divergence d'Astrid à l'horizon 2026, on peut considérer que ce démonstrateur technologique aura atteint son objectif industriel vers 2040 et qu'une première série de RNR-Na pourrait alors être introduite dans le parc électronucléaire. Cette mise en service de quelques RNR au rythme d'un tous les 4 ans permettrait d'acquérir l'expérience du fonctionnement industriel de ce type de réacteur, de maintenir et de renforcer l'expertise en matière de mise en œuvre et de sûreté des RNR, de stabiliser le stock de plutonium et de minimiser l'accumulation de  $^{241}\text{Am}$  issu du  $^{241}\text{Pu}$  lors de l'entreposage.

La flexibilité des RNR-Na permet une gestion efficace des matières, puisque ces réacteurs peuvent fonctionner en :

- mode iso-générateur : le réacteur produit autant de matière fissile qu'il en consomme et seul un apport d'uranium est nécessaire pour reconstituer un nouveau cœur ;
- mode surgénérateur : le réacteur produit plus de plutonium qu'il n'en consomme, permettant ainsi de démarrer de nouveaux RNR ;
- mode sous-générateur : le réacteur consomme plus de plutonium qu'il n'en produit.

Dans le cadre d'une transition énergétique et d'une sortie programmée du nucléaire, les RNR fonctionnant en mode sous-générateur consommeraient du plutonium tout en produisant de l'énergie électrique. Les calculs théoriques et les premiers résultats expérimentaux montrent que l'inventaire plutonium pourrait être réduit des deux tiers en 60 ans.

Les modes iso- et surgénérateurs de fonctionnement d'un RNR ont fait l'objet d'études avec les réacteurs Phénix et Superphénix. S'agissant du mode sous-générateur, le CEA a testé, dans le réacteur Phénix, un cœur sous-générateur de type CAPRA (Consommation Accrue de Plutonium dans les Rapides).

*Cette expérience de la sous-génération et de la consommation de plutonium doit être approfondie, car elle est primordiale pour une gestion maîtrisée du plutonium. Le programme de recherche en cours, utilisant Masurca et des dispositifs d'irradiation disponibles en France ou à l'étranger, doit être soutenu très activement. Une fois qu'Astrid aura démontré sa capacité à fonctionner en mode iso-générateur, la Commission recommande que ce RNR soit utilisé pour tester le fonctionnement en mode sous-générateur à l'échelle industrielle.*

16

## 1.6 ALTERNATIVES AUX RNR-NA

### 1.6.1 Pour la production d'électricité et pour la transmutation des actinides mineurs

#### a) RNR à caloporeur gaz : ALLEGRO

Le développement de ce projet repose sur la collaboration scientifique et technique de quatre pays européens : Hongrie, Slovaquie, République tchèque et Pologne. Sa mise œuvre, au sein du Forum Génération IV, prévoit la création d'un centre d'excellence qui doit accueillir le prototype. Un soutien par les fonds de cohésion européens sera demandé pour la période 2014-2020.

Ce projet Allegro nécessitera de lever de nombreux verrous technologiques. La Commission prévoit de suivre son déroulement et examinera avec attention les premiers acquis dans son prochain rapport.

## b) Réacteurs à sels fondus (RSF)

### ♦ Le concept

L'utilisation de combustible liquide (sels fondus) serait une percée majeure dans la conception des réacteurs. En effet, un tel réacteur, dit homogène, présente des propriétés de sûreté intrinsèques grâce au coefficient de dilatation du liquide-combustible. Ce liquide, en cas d'élévation de la température, se dilate et quitte le cœur, assurant ainsi une baisse de la réactivité neutronique. La gestion du combustible est potentiellement simplifiée par rapport à celle d'un combustible solide, puisque toutes les opérations seraient réalisées en continu par simple transfert de fluide entre le cœur, l'unité de retraitement et les zones de vidange. Contrairement aux réacteurs à combustibles solides, ces opérations ne nécessiteraient pas un arrêt du réacteur.

Une expérience de conduite des RSF a été acquise notamment aux Etats-Unis avec le réacteur industriel de puissance MSBR (Molten Salt Breeder Reactor). Compte tenu du retour d'expérience sur le MSBR, le CNRS a proposé, en 2006, un nouveau concept : le MSFR (Molten Salt Fast Reactor) qui a été retenu par le Forum Génération IV en 2008. Aujourd'hui des pays comme l'Inde et le Brésil s'intéressent à cette filière.

Les avantages potentiels du MSFR sont :

- un spectre neutronique rapide et donc une utilisation optimale de la capacité énergétique du combustible à base de thorium ;
- La transmutation possible des actinides ;
- un retraitement en continu *in situ* du combustible, qui, limité à ~ 0,1% du volume total/jour, n'affecterait ni la stabilité ni le fonctionnement du réacteur.

Les caractéristiques du MSFR en projet seraient :

17

- un combustible liquide de référence constitué par un mélange 75,5 mole %  $7\text{LiF}^7$  – 22,5 mole %  $\text{ThF}_4$ , une partie du thorium pouvant être remplacée par  $^{235}\text{U}$ , U appauvri, Pu et actinides mineurs ;
- une géométrie permettant un spectre neutronique rapide associé à une puissance élevée grâce à la stabilité des sels fluorés ;
- une absence de barres de contrôle compensée par un dispositif de vidange, actif ou passif.

### ♦ Les difficultés à surmonter et les verrous à lever

Les E&R concernant les sels fondus n'ont pas été très actives au cours des dernières décennies, si bien que l'expertise et la compétence requises pour la mise en œuvre d'un projet MSFR sont actuellement limitées. Parmi les défis à relever, on soulignera :

- la mise au point de matériaux résistant à la corrosion en milieu de sels fondus à une température de 700°C ;
- l'absence de gaine, qui constitue la première barrière dans un réacteur classique, exige une approche totalement nouvelle de la sûreté ;
- l'impact sur la sûreté du couplage entre le réacteur et le dispositif de traitement du combustible ;
- la démonstration de l'efficacité du traitement des déchets et du fonctionnement des échangeurs thermiques sur le très long terme ;
- la maîtrise de la corrosion et de l'érosion ;
- la mise en place d'une filière industrielle pour les déchets.

*La Commission souligne la nécessité d'acquérir une expertise nationale sur le cycle du thorium. Elle encourage le CNRS à réunir une communauté de compétence et d'expertise, en sels fondus et en matériaux, appliquée à un projet industriel de mise au point d'un prototype dans la seconde moitié du 21<sup>ème</sup> siècle.*

## 1.6.2 Pour la transmutation des actinides mineurs : les ADS (Accelerator Driven Systems)

En France, les études de systèmes pilotés par accélérateur sont portées par le CNRS qui est associé au projet Myrrha du SCK-CEN belge. Myrrha est un ADS sous-critique de 100 MWth à spectre de neutrons rapides, refroidi au plomb-bismuth. Le réacteur d'essai Guinevere, conçu dans le cadre du projet Myrrha, a été inauguré sur le site du SCK-CEN en 2010. Ce réacteur de faible puissance, piloté par accélérateur, peut fonctionner en mode critique et en mode sous-critique. De nombreux développements de composants - accélérateur, cible de spallation, combustible - devront être testés et validés à l'aide de Myrrha pour pouvoir atteindre un système préindustriel.

Les ADS permettront la transmutation des actinides mineurs, mais ils ne peuvent pas réaliser celle du plutonium dans les quantités nécessaires. Dans les scénarios européens de développement des ADS, celle-ci reste confiée à des RNR.

*La Commission a analysé les ADS dans son rapport précédent. Elle suivra avec intérêt ce projet, qui est entré dans la phase de l'ingénierie détaillée d'avant-projet.*

## 1.7 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

*Le programme d'études sur la séparation et la transmutation des actinides aborde les problèmes essentiels de maîtrise, de sûreté et de devenir dans un contexte de production électrique par des RNR. Il prépare un projet de démonstrateur technologique conformément à la Loi tout en laissant ouvertes des options scientifiques innovantes.*

*La Commission recommande la poursuite du projet Astrid ; il doit absolument être mené à terme, pour permettre une évaluation complète des potentialités des RNR sodium.*

*La Commission estime que les RNR gaz et sels fondus ouvrent des perspectives intéressantes pour un avenir lointain ; il convient donc de poursuivre les études exploratoires engagées avec nos partenaires européens.*

*Si la transmutation des actinides mineurs était retenue, la Commission serait d'avis que les solutions envisagées par les ADS soient prises en compte et comparées à celles des RNR.*

*La séparation-transmutation de l'américium et le fonctionnement en mode sous-générateur des réacteurs RNR présentant des avantages substantiels, la Commission tient à ce qu'ils fassent toujours l'objet de recherches actives.*

*La Commission souhaite, enfin, que le bilan complet des déchets produits par la filière RNR continue à être affiné.*

*Dans un contexte économique tendu, la Commission considère qu'une toute première priorité doit être donnée à la réalisation du démonstrateur industriel Astrid ainsi qu'à celle de l'atelier de fabrication du combustible.*

*Dans un second temps, un atelier de retraitement du combustible Mox usé dans Astrid devra être mis en œuvre pour tester la possibilité d'alimenter ce RNR à partir du Pu qu'il a lui-même produit et d'uranium appauvri disponible.*

*Lorsque le fonctionnement du RNR Astrid en mode iso-générateur aura été validé à l'échelle industrielle, la transmutation hétérogène de l'américium à l'échelle industrielle devra être démontrée. La Commission demande au CEA de mener une veille active concernant les avancées scientifiques qui pourraient ouvrir des voies nouvelles de transmutation. Elle lui demande également de développer des études et recherches sur le fonctionnement d'Astrid en mode sous-générateur et de proposer un schéma de gestion des actinides (U, Pu, Actinides Mineurs) dans l'hypothèse d'un arrêt programmé d'un parc électronucléaire incluant des RNR.*

*Les premières expérimentations industrielles de transmutation et de sous-génération dans Astrid ne pourront être effectuées au mieux que dans 20 ans. La Commission souhaite connaître les grandes lignes, les jalons et les moyens du programme scientifique de préparation de ces expérimentations.*



## Chapitre 2

### STOCKAGES DANS CIGÉO

Pour l'élaboration de son rapport 2013, la Commission a pris en compte les éléments qui lui ont été communiqués à partir de décembre 2012 sur les conclusions de la phase d'esquisse menée par l'Andra avec l'appui de son maître d'œuvre systèmes Gaiya. Elle a également été informée des débats entre l'Andra et les producteurs de déchets qui ont eu lieu à propos de l'esquisse, lors de la revue de projet organisée de novembre 2012 à février 2013. Le 21 mai 2013, l'Andra a présenté une analyse et une justification de ses choix. Par ailleurs, la Commission s'est exprimée à la demande de la Ministre de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie sur le projet d'esquisse de l'Andra. Cet avis a été rendu public et joint au dossier documentaire du Débat public prévu par la loi en préalable au dépôt de la Demande d'Autorisation de Construction (DAC). Dans le présent rapport, la Commission mentionne également les progrès récents sur l'évaluation des coûts du stockage et évoque l'impact socio-économique du projet Cigéo.

#### 2.1 CONNAISSANCES GÉOLOGIQUES SUR LA ZIRA

L'Andra a mis en œuvre les meilleures techniques éprouvées pour la reconnaissance approfondie de la Zira à partir de la surface du sol. L'Andra estime que la sismique 3D haute résolution a confirmé que les discontinuités identifiables à la base du Callovo-Oxfordien (COx) ne se propageaient pas dans le COx. Ces hétérogénéités ont été interprétées comme ayant une origine sédimentaire (faciès récifaux) ou une origine structurale précoce antérieure au dépôt du COx, des dissolutions dans le Trias salifère ayant pu entraîner des déformations dans les niveaux sus-jacents aujourd'hui scellés par le COx.

21

Aucune des données issues de ces reconnaissances ne suggère la présence d'anomalies géologiques d'amplitude supérieure au seuil de résolution de la sismique (rejets supérieurs à quelques mètres) qui auraient pu altérer l'homogénéité du COx et son aptitude à confiner les déchets sur le long terme.

La principale incertitude porte sur la géométrie précise de l'enveloppe du COx à son toit et résulte de la grande hétérogénéité des vitesses sismiques dans les formations de couverture qui sont de fait mal connues. Il n'est donc pas exclu que la couche d'argile dédiée au stockage présente des ondulations de quelques mètres d'amplitude et de grandes longueurs d'onde. Il suffira d'en tenir compte dans l'architecture générale de l'ouvrage pour assurer les épaisseurs requises d'argile au-dessus et en-dessous des zones de stockage.

*La Commission estime que l'on ne progressera plus notablement dans la connaissance des propriétés de la Zira avant un accès direct au COx par les puits et galeries de la tranche 1 de Cigéo. Ce creusement sera l'occasion de confirmer le modèle géologique pour la Zira.*

*La Commission recommande que l'Andra définisse le programme d'accompagnement scientifique et technique prévu pendant la réalisation des travaux de la tranche 1. Ce programme visera à préciser, pour la Zira, les valeurs des paramètres du COx. L'Andra devra définir les moyens mis en œuvre pour identifier au cours du creusement les éventuelles hétérogénéités géologiques. Elle devra également indiquer la stratégie qu'elle envisage d'adopter pour prendre en compte les nouveaux résultats qui pourraient apparaître.*

## 2.2 ÉTUDES EN LABORATOIRE SOUTERRAIN ET DE SURFACE

Les études innovantes qui ont été présentées à la Commission concernent les scellements auxquels elle avait accordé une grande importance dans ses rapports précédents.

En effet, trois barrières successives s'interposent entre les radionucléides et la biosphère : les colis de stockage, les barrières ouvragees et la barrière géologique constituée par les roches du sous-sol. Dans le projet Cigéo, les barrières ouvragees comportent des bouchons d'argile gonflante de 3 mètres de long placés dans les inserts des alvéoles HAVL et des scellements, beaucoup plus longs, placés entre deux massifs d'appui en béton dans les galeries d'accès, puits et descenderies. Ces derniers sont disposés de telle sorte qu'un radionucléide doive franchir plusieurs bouchons pour sortir de la couche d'argilite.

Pour limiter les flux d'eau à travers les scellements, l'Andra vise une perméabilité du noyau d'argile inférieure<sup>2</sup> à  $10^{-18} \text{ m}^2$ . De plus, l'argile constitue le noyau des scellements retient durablement certains des radionucléides en solution dans l'eau, notamment les actinides, comme le fait le milieu géologique naturel environnant, constitué par de l'argilite.

Il est vraisemblable que la perméabilité globale du bouchon fera jouer un rôle important à l'interface noyau-argilite, à l'EDZ et aux parties du revêtement laissées en place. La Commission observe que les coupures hydrauliques envisagées dans le Dossier 2005, qui visaient à réduire ce rôle, ne semblent plus figurer que comme une option.

## 2.3 PROGRAMME DE RECHERCHES

Un programme de recherches dans ce domaine peut s'appuyer sur le retour d'expérience des nombreux pays qui ont choisi des solutions techniques analogues pour la réalisation des barrières ouvragees. L'Andra a judicieusement tiré parti de cette dynamique internationale de recherche collaborative, en particulier à travers les programmes européens.

La difficulté d'un tel programme tient à plusieurs facteurs :

- Comme pour tous les scellements d'ouvrages souterrains présentant des objectifs élevés d'efficacité, des prototypes à échelle réduite peuvent utilement contribuer à la conception. Toutefois, la conviction ne pourra être complètement emportée que par des essais à échelle 1 réalisés dans les conditions réelles or il s'agit d'ouvrages de trop grandes dimensions pour être placés dans le laboratoire souterrain. De plus, dans le cas des bouchons de bentonite envisagés, mis en place à l'état sec, l'hydratation et le gonflement naturel, nécessaires pour qu'ils puissent jouer efficacement leur rôle dans le stockage, sont des processus très longs, étalés sur des centaines d'années.
- La mise en place de l'argile gonflante pose des problèmes technologiques délicats car il faut obtenir à l'échelle de l'ouvrage entier une densité sèche élevée, garante de fortes pressions de gonflement après hydratation. Il faut donc laisser des jeux aussi faibles que possible au sein du noyau argileux et au contact avec les parois des galeries, alors que, après la dépose au moins partielle des revêtements, les galeries comporteront sans doute des hors-profil qui rendront plus difficile une mise en place compacte.
- Le béton destiné aux massifs d'appui, dont le rôle est de confiner le noyau après son gonflement, doit être acheminé vers les galeries depuis la surface; sa prise s'accompagne d'un épisode transitoire thermomécanique (échauffement-refroidissement-fissuration) qui ne doit pas diminuer ses performances ultérieures.

<sup>2</sup>  $10^{-18} \text{ m}^2$  correspond à un débit d'eau de 150 litres/an à travers un bouchon de 50 m de long dans une galerie de section 50 m<sup>2</sup> et un écart de pression de 5 MPa entre les deux extrémités des scellements

Ainsi, si le programme de recherches doit s'attacher au choix des matériaux (béton et argile gonflante) et à l'analyse de performance à très long terme, il doit aussi démontrer la faisabilité industrielle de leur mise en place dans les conditions du fond.

### 2.3.1 Essais en cours ou en préparation

L'essai dit FSS (Full Scale Sealing) s'intègre dans le programme européen Dopas. Il utilise, dans un atelier de surface, une maquette horizontale de diamètre 7,6 m comportant un noyau d'argile gonflante long de 13,5 m placé entre deux massifs de béton bas-pH de 5 m de long, respectivement coulés et projetés. L'essai, qui ne comportera pas d'hydratation ni donc de vérification de l'efficacité de la barrière, est nettement orienté vers la faisabilité industrielle : réalisation d'une densité sèche moyenne élevée en présence d'anomalies hors-profil des parois, mise en place de grands volumes de béton bas pH dans des conditions volontairement proches de celles du fond, avec une instrumentation qui permette de vérifier que les objectifs sont atteints, notamment en termes de densité moyenne. Le protocole expérimental est affiné au fur et à mesure ; le démantèlement de cette maquette, à la fin de 2015, constituera une phase de mesure particulièrement importante.

L'essai FSS est complété par un essai de resaturation à l'échelle métrique (Rem) qui commencera à la fin de 2013 et fournira un ordre de grandeur des durées de resaturation.

L'essai dit NSC, réalisé dans une galerie borgne du laboratoire souterrain (scellement de diamètre 4,6 m, longueur 5 m) utilise des briques d'argile sous la forme de parallélépipèdes de 0,3 x 0,2 x 0,1 m<sup>3</sup> empilés. Il comporte une hydratation forcée et vise à évaluer les performances de la barrière, et notamment la perméabilité globale (noyau d'argile plus interface plus EDZ plus béton laissé en place) de l'ouvrage, mais seuls des résultats partiels seront disponibles d'ici fin 2014.

### 2.3.2 Matériaux de scellement

23

Le CEA a examiné pour l'Andra la nature, la mise en forme et la mise en œuvre de l'argile gonflante pour les essais envisagés. Pour l'essai NSC, le matériau retenu est un mélange de bentonite du Wyoming et de sable quartzeux. La présence de ce dernier illustre la difficulté de mise au point d'un mélange idéal qui doit gonfler – pour assurer un contact intime avec les parois de galeries –, mais pas trop – pour éviter des déplacements longitudinaux et des efforts trop importants sur les massifs d'appui ; et qui doit présenter une perméabilité faible dans son état final, tout en permettant dans la phase initiale une hydratation plus rapide. Pour l'essai FSS, l'argile gonflante prendra la forme de pellets (pastilles de 32 mm de diamètre) complétés par de la poudre sèche ou des concassés de pellets.

Le béton est largement utilisé dans le stockage, comme matrice de confinement de certains colis, pour le soutènement des galeries et pour les massifs d'appui des scellements. Sa composition minéralogique et son pH élevé en font un matériau nettement exogène au sein du massif d'argilite avec lequel il est en contact, ce dernier étant caractérisé par une forte pression partielle de CO<sub>2</sub>, la présence de chlorure et une teneur élevée en sulfates. Le comportement à long terme des interfaces béton-argilite-noyau doit donc être évalué soigneusement.

En prenant en compte les recherches internationales, l'Andra s'est attachée à formuler des bétons soumis à des contraintes multiples (pompables, présentant un bas pH, une faible chaleur d'hydratation, une faible teneur en alcalins libres, ...) ; et dont les composants devront satisfaire un ensemble de propriétés dictées par les conditions de stockage.

*La Commission constate l'importance du travail de recherches mené par l'Andra pour les matériaux de scellement. Celui-ci a conduit à des bétons innovants, adaptés à un ensemble complexe de contraintes, et dont les propriétés à long terme, en cours d'études, doivent faire l'objet d'un effort de caractérisation de longue haleine.*

### **2.3.3 Modélisation du comportement des scellements**

La modélisation du comportement des scellements se heurte à des difficultés particulières. L'équilibre hydromécanique du noyau ne sera atteint qu'après un millier d'années au moins, de sorte que l'extrapolation à long terme des évolutions des matériaux jouera un rôle important. Les conditions de fonctionnement (présence ou non d'hydrogène sous pression, nature du chargement hydraulique) et le comportement des matériaux (béton bas pH de création récente, mélange bentonite-sable), des assemblages en grand volume de ces matériaux et de leurs interfaces (entre eux et avec le massif) comportent encore des incertitudes comme il est normal pour tout procédé innovant.

Les connaissances ont néanmoins suffisamment avancé pour que l'Andra effectue une calibration de modèles de calcul. Ses calculs sur 100 000 ans mettent en évidence, en comparaison d'un béton classique, une augmentation de la porosité des bétons et une réduction de l'extension de la dégradation à partir de l'interface, dans le béton comme dans l'argile.

*La Commission observe qu'un effort important de modélisation du comportement chimique et de ses conséquences physiques a commencé. Elle souhaite que les aspects mécaniques et hydriques qui sont encore décrits en termes généraux, lui soient plus complètement présentés.*

*Plus généralement, la Commission avait constaté, dans ses rapports précédents, que la question des scellements ne pourrait pas être abordée de manière complète dans le dossier 2014. Plusieurs arguments ont conduit la Commission à estimer que ce délai n'était pas rédhibitoire. D'une part, dans son principe, l'utilisation des argiles gonflantes a été retenue par presque tous les pays concernés, ce qui atteste de sa crédibilité et permet de bénéficier d'un large retour d'expérience. D'autre part, la barrière ouvrage assure une redondance, puisque les études de sûreté conduites à ce jour montrent qu'en cas de défaillance généralisée des scellements, la diffusion par la barrière géologique resterait le mode de transfert privilégié des radionucléides. Enfin, la question de la mise en place des scellements se posera principalement lors de la fermeture du stockage, dans plus d'un siècle, de sorte que des résultats expérimentaux complets ne sont pas encore indispensables au stade actuel.*

*La Commission examinera avec attention comment la DAC répond aux questions qui subsistent sur les scellements. En tout état de cause, cette question restera en partie ouverte. Elle recommande fortement que l'attention récente portée à la qualité des scellements reste soutenue. L'essai FSS ne pourra établir qu'une faisabilité technologique, tandis que l'essai NSC apportera des enseignements très précieux, mais ne constituera qu'un premier élément d'une démonstration de plus longue haleine en situation de stockage, à laquelle une grande priorité devra être accordée. Une attention soutenue devra être apportée aux interfaces entre l'argile gonflante, le béton et le Cox.*

## 2.4 CAPACITÉS DE SIMULATION NUMÉRIQUE

Depuis la publication de son dossier 2005, l'Andra a fait un effort considérable en matière de simulation numérique. La stratégie générale repose sur un partenariat avec le milieu académique pour la recherche amont et avec des sociétés de services et d'ingénierie pour les développements et certaines études, l'Andra gardant la responsabilité de la conceptualisation physique des systèmes et du choix des modèles. L'Andra réalise en propre les simulations dans les domaines phénoménologiques qui sont au cœur de ses enjeux, tels que l'hydraulique et le transport de solutés, le transport diphasique eau-gaz et le transport réactif. Elle confie pour l'essentiel à l'extérieur les simulations thermiques, mécaniques et aérauliques en prenant garde de conserver en interne le niveau d'expertise permettant d'en maîtriser l'interprétation des résultats.

Pour ses travaux en interne, l'Andra a sélectionné les meilleurs codes de calcul disponibles sur le marché en se réservant la possibilité de faire réaliser par les concepteurs les évolutions qu'elle jugerait nécessaires. Des boîtes à outils de simulation numérique sont ainsi disponibles pour chacune des trois thématiques privilégiées de l'Andra évoquées ci-dessus. Chaque boîte à outils est composée d'un code de référence auquel est intégré progressivement l'ensemble des développements spécifiques nécessaires, de codes vérificateurs et d'un code académique sur lequel sont testés les développements en cours.

Concernant la mise en œuvre pratique des moyens de simulation, l'Andra a abandonné la plate-forme Alliances développée pour le dossier 2005, au profit d'une nouvelle plate-forme, Cassandra (Codes Appliqués à la Simulation des Stockages de l'Andra) plus ergonomique. L'objectif est de posséder une interface unique pour piloter tous les codes numériques. Ceci autorise une facilité de couplage des codes pour la simulation des phénomènes multiphysiques ainsi qu'une intercomparaison aisée, en minimisant les risques d'erreur humaine dans leur pilotage.

*La Commission rappelle à l'Andra qu'une externalisation des compétences en simulation numérique risque d'être préjudiciable à long terme. Il convient donc de maintenir une capacité interne d'intervention sur les trois niveaux de codes, de référence, de qualification et académique.*

25

Cette capacité de simulation a été mise à profit lors des évaluations comparées des solutions de la phase d'esquisse. Tous les composants ouvrages (alvéoles, galeries, puits, scellements) du stockage ont pu être pris en compte dans le détail de leur architecture au cours d'une même simulation qui intègre une description hydrogéologique réaliste du CO<sub>2</sub>. Ces calculs ont permis de quantifier dans les différents cas d'esquisse les transferts d'iode 129 au sein du stockage ; ils ont exigé des maillages de plus de 12 millions d'éléments afin de pouvoir distinguer les solutions entre elles, ce qui représente un saut technologique numérique considérable par rapport à la situation de 2005.

Les progrès ont également concerné la simulation de la migration diphasique multi-composants des gaz qui est à présent traitée intégralement depuis les colis générateurs de gaz jusqu'aux ouvrages de liaison surface-fond. Ici encore, le progrès est considérable dans les méthodes d'analyse des situations de stockage.

L'effort a aussi porté sur la modélisation des processus couplés chimie-transport qui est désormais parfaitement maîtrisée, permettant des simulations 2D et 3D d'interactions chimiques à composantes multiples telles qu'elles peuvent se manifester aux interfaces béton-argile par exemple, en respectant des échelles de temps réalistes, représentatives de la durée du confinement des radionucléides.

Ces travaux de simulation ont été rendus possibles grâce à des travaux de recherche en partenariat, l'Andra jouant soit un rôle de prescripteur de recherche, soit un rôle d'acteur. Ainsi, la collaboration avec l'Inria a porté essentiellement sur les techniques de maillage adaptatif et les méthodes numériques à haute performance permettant de traiter les systèmes couplés. Des questions se plaçant plus en amont, visant notamment à quantifier les incertitudes se propageant dans les simulations, sont prises en compte au sein du GNR Momas sans toutefois avoir encore fourni de réponses opérationnelles sur des cas de simulation réalistes. Plusieurs projets européens (Pamina pour l'analyse de performance et de sûreté, Forge pour les transferts de gaz) ont été mis à profit pour la réalisation d'exercices d'intercomparaison de codes.

*La Commission constate avec satisfaction que les progrès ont été importants et rapides en matière de modélisation des processus hydrauliques et de transport de solutés sur les plans multi-échelles et multi-physiques. L'Andra possède à présent des outils très performants pour comprendre et prévoir des phénomènes engendrés par les transferts de fluides au sein du COx en prenant en compte les détails de l'architecture du stockage. Ceci permet, entre autre, de rechercher et de justifier des voies d'optimisation pour améliorer les performances du stockage.*

Un travail utile resterait à accomplir en associant les progrès récents, qui paraissent concerner plutôt les champs proches et moyens, aux avancées réalisées en 2012 sur le plan de la modélisation hydrogéologique régionale. En effet, le modèle régional construit par l'Université de Neuchâtel est fondé sur une base collective de connaissances très importante relative à la géologie et l'hydrogéologie du Bassin Parisien, complétée par les résultats propres de l'Andra. Il fournit de ce fait une compréhension scientifique quantifiée et validée de l'hydrogéologie locale et régionale, parce qu'il rassemble dans un outil unique de simulation un modèle de la totalité du Bassin parisien et un modèle de secteur prenant en compte l'ensemble des données acquises sur la zone de transposition. Cet outil permet de visualiser jusqu'à leurs exutoires en surface les voies de transfert de radionucléides qui auraient diffusé au travers du COx vers les aquifères sus ou sous-jacents. Il offre également la possibilité d'évaluer les durées de parcours d'une substance en solution dans l'eau le long de ces voies de transfert.

*La Commission recommande à l'Andra de valoriser l'ensemble des évolutions et améliorations apportées au modèle hydrogéologique à toutes les échelles lors de la réalisation de l'analyse de sûreté qui sera fournie dans la DAC. Cette analyse de sûreté devra s'affiner au fur et à mesure que des informations nouvelles apparaîtront lors du creusement de la tranche 1 de Cigéo.*

## 2.5 LA RÉALISATION DE LA PHASE D'ESQUISSE

En sa qualité de maître d'ouvrage, l'Andra avait défini en 2011 les exigences applicables au projet Cigéo. Ces exigences ont figuré au cahier des charges du maître d'œuvre systèmes choisi pour la réalisation de l'esquisse. Après une première revue de projet en mai 2011 au cours de laquelle ont pu être confrontés les points de vue de l'Andra et des producteurs, la maîtrise d'œuvre a été confiée en janvier 2012 au groupement Gaiya (Technip/Ingerop) après dépouillement d'un appel d'offre européen.

L'objet de l'étude d'esquisse était de :

- préciser les contraintes techniques et environnementales du projet ;
- vérifier sa faisabilité technique ;
- présenter des solutions techniques assorties d'un planning de réalisation et d'une estimation des coûts.

En décembre 2012, l'Andra a présenté trois solutions d'ensemble développées par Gaiya pour les installations souterraines. Celles-ci prenaient en compte le stockage des colis de déchets selon les hypothèses définies par les producteurs dans le programme industriel de gestion des déchets (PIGD). Dans ce cadre, les colis MAVL, qui présentent une grande diversité, devraient être stockés à partir de 2025. En revanche, les colis HA fortement exothermiques mais de types plus homogènes ne seraient stockés qu'à partir de 2075.

Les trois solutions retenues satisfont aux exigences du cahier des charges. Leur architecture générale varie peu et comprend dans chaque cas des zones de stockage séparées pour les déchets MAVL, les déchets HA0 et les déchets HA, pouvant toutes être insérées dans la Zira. Les solutions dites 1 et 3 permettent une utilisation plus importante du tunnelier que la solution 2 qui privilégie la machine à attaque ponctuelle, de sorte que cette dernière solution présente une emprise surfacique plus compacte que les deux autres.

L'Andra s'est livrée à une analyse comparative des solutions en examinant :

- la sûreté en exploitation ;
- l'analyse phénoménologique des situations de stockage ;
- les performances de sûreté à long terme après fermeture.

Concernant la sûreté en exploitation, l'Andra conclut qu'il n'existe pas de différences significatives entre les trois solutions concernant l'exposition des personnels aux rayonnements ionisants, la possibilité d'évacuer les gaz de radiolyse et les risques inhérents à la manutention des colis. S'agissant du risque incendie et de celui lié à la coactivité entre zones de travaux et zones d'exploitation, la solution 2 se montre moins performante.

27

L'analyse phénoménologique des trois solutions a été conduite en termes de comportement thermique du stockage et de mécanismes transitoires concernant l'hydraulique et les gaz après fermeture. Les causes de variabilité sont essentiellement liées à la géométrie du COx sur l'emprise de la Zira (pendage, épaisseur), les propriétés physiques de la roche y restant identiques. La solution 2, plus compacte, donne lieu à des températures plus élevées de quelques degrés dans le COx 500 ans après la mise en service. Elle conduit aussi à une température plus élevée d'une quinzaine de degrés dans le retour d'air de ventilation des quartiers HA au bout de 100 ans d'exploitation. Le comportement thermo-hydraulique de l'eau et des gaz après scellement apparaît similaire avec toutefois une pression de gaz un peu plus forte (de 0,5 MPa) pour la solution 2, du fait d'un régime thermique plus marqué.

La sûreté à long terme est examinée par l'Andra en tenant compte des performances des composantes ouvrageées et de la position des zones de stockage dans la Zira vis-à-vis du gradient hydraulique dans le COx et des directions d'écoulement dans les aquifères situés au dessus et en dessous du COx. Les conclusions sont fondées sur le transport de l'iode (<sup>129</sup>I), radionucléide apparu lors des études antérieures comme le plus pénalisant; elles sont globalement identiques pour les trois solutions avec une légère différence pour la solution 2 pour laquelle les relâchements d'iode sont plus tardifs.

Une analyse multicritères conduit l'Andra à retenir la solution 1 pour les installations souterraines en arguant qu'elle est la plus favorable sur le plan des réponses aux questions industrielles, en particulier pour ce qui concerne l'organisation de la co-activité. Elle comprend :

- une liaison surface-fond assurée par deux descenderies creusées au tunnelier et par cinq puits ;

- des zones MAVL et HA dont les galeries d'accès sont creusées au tunnelier et une zone HA0 creusée à la machine à attaque ponctuelle (MAP) ;
- un procédé de transfert des hottes contenant les colis par funiculaire en descenderie, puis par rail jusqu'aux zones de stockage.

L'Andra a également présenté trois solutions pour les architectures en surface, se distinguant essentiellement par le caractère plus ou moins enterré des installations et par les implantations respectives de la zone d'activité travaux et de la zone d'activité stockage. L'analyse des risques associés et l'optimisation de l'utilisation de l'espace oriente vers un choix comportant une activité travaux centrée autour des puits et une activité stockage implantée sur la zone descenderie dans des ouvrages semi-enterrés. Ces dispositions apparaissent comme les plus favorables vis-à-vis des agressions externes comme les chutes d'aéronefs et les aléas climatiques (la protection contre les inondations étant bien assurée).

*A la demande de la Ministre de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, la Commission s'est exprimée sur les propositions de l'Andra dans un avis remis le 25 mars 2013. Ses conclusions sont que le choix de l'Andra prend en compte les exigences de sûreté, tant sur le long terme que le court terme, de sorte qu'il n'y a pas de raisons scientifiques ou techniques de surseoir à la poursuite du processus d'élaboration de la DAC.*

## 2.6 REVUE DE PROJET

La Direction Générale de l'Energie et du Climat du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie a organisé, de novembre 2012 à février 2013, une revue de projet à fin d'esquisse du projet Cigéo. Le rapport de cette revue estimait qu'il n'était pas possible, en l'état, de passer à la phase d'avant-projet sommaire. Il demandait de traiter au fond plusieurs choix techniques de conception, jugés comme déterminants pour la suite du projet.

28

La Commission a été invitée à assister le 21 mai 2013 à une réunion de restitution au cours de laquelle l'Andra a présenté une analyse des diverses variantes et une justification de celles qu'elle avait retenues, à savoir :

- le transport des colis dans la descenderie par funiculaire ;
- le doublement, lorsque cela est possible, des galeries de liaison et d'accès, suivant une conception dite "bitube" ;
- l'option de la hotte comme seconde barrière de confinement pour le transport au fond de la plus grande partie des déchets MAVL.

Leur examen a conduit à confirmer les choix de l'Andra, supérieurs du point de vue de la sécurité, notamment en matière d'incendie. Par ailleurs, les coûts impliqués ne présentent pas de différence réellement significative.

L'Andra a également proposé une modification de l'architecture du stockage des colis MAVL, en allongeant les alvéoles de 400 à 500 m et en réduisant leur nombre en proportion, avec des avantages en termes de coût.

*La Commission estime que les conséquences de cette dernière évolution devront être analysées, notamment du point de vue de la mise en œuvre de la réversibilité ainsi que des questions posées par le co-stockage.*

*Plus généralement, dans son rapport n° 5, la Commission avait recommandé que les producteurs soient associés aux discussions tout au long de la réalisation du projet industriel et leur contribution mise à profit, à travers un processus qui restait à mettre en place et dans lequel l'Andra devait conserver toutes ses prérogatives de maître d'ouvrage, conformément à la Loi.*

*La Commission observe que la réunion de restitution du 21 mai 2013 visait à statuer sur des choix structurants pour le projet industriel Cigéo alors que son esquisse avait déjà été présentée au Gouvernement, et ce quelques jours seulement avant le lancement d'un débat destiné à recueillir les observations du public. Il lui semble que ce mode de fonctionnement n'est pas satisfaisant. A l'avenir, la concertation souhaitable avec les producteurs, menée dans le respect des prérogatives des diverses parties prenantes, devrait être conduite suffisamment en amont de tout dépôt de dossier, notamment celui de la demande d'autorisation de création du stockage prévu à la fin de 2014.*

## **2.7 CONCEPT FINAL CIGÉO**

Le concept Cigéo proposé initialement par l'Andra, adapté en tenant compte d'éléments issus de la revue de projet, apparaît à présent industriellement crédible. L'esquisse est à ce stade globalement conforme aux règles visant à assurer la sûreté du stockage dans le respect du principe Alara<sup>3</sup>. Des voies d'optimisation sont identifiées et devront être explorées par l'Andra. Un échéancier de réalisation des travaux de la tranche 1 du stockage est proposé.

*A la suite de la revue de projet et du Débat public, la Commission estime que l'Andra doit maintenant présenter une version actualisée du projet Cigéo. Elle devra préciser les voies d'optimisation du concept retenu et les questions scientifiques et techniques devant être traitées, pendant et après les travaux de creusement. Elle devra être accompagnée d'un échéancier qui doit être impérativement disponible avant la remise de la DAC prévue fin 2014.*

29

## **2.8 FLEXIBILITÉ NÉCESSAIRE DE CIGÉO**

Aux yeux de la Commission, un certain nombre de questions dont les réponses pourraient évoluer avec le temps exigent une flexibilité du concept Cigéo dès la réalisation de la tranche 1.

### **2.8.1 Connaissance des déchets MAVL**

L'état des connaissances sur les déchets MAVL est en cours d'approfondissement et l'Andra a établi, à la demande de la Commission, un tableau de bord qui permet d'avoir une vision globale de ceux-ci. Ce tableau distingue cinq catégories :

- Les déchets MAVL vitrifiés (975 m<sup>3</sup>) ;

<sup>3</sup> As low as reasonably achievable

- Les coques et embouts (11.130 m<sup>3</sup>) et déchets de démantèlements (10.356 m<sup>3</sup>) ;
- Les déchets contenant des métaux pyrophoriques (2157 m<sup>3</sup>) ;
- Les déchets contenant de la matière organique (20.793 m<sup>3</sup>) et enrobés bitume (13.598 m<sup>3</sup>) ;
- Les déchets divers (7996 m<sup>3</sup>).

Les métaux pyrophoriques comme le sodium, l'aluminium et le magnésium ont la propriété de pouvoir s'enflammer spontanément à l'air. Alors que l'aluminium et dans une moindre mesure le magnésium peuvent former des couches d'oxydation qui les protègent d'un contact direct avec l'air, le sodium "brûle" en totalité. Le stockage de matériaux contenant des métaux pyrophoriques doit donc faire l'objet d'une attention particulière et d'études avancées sur les réactions qu'ils sont susceptibles de générer. Compte tenu de la très forte réactivité du sodium avec l'eau, sa présence dans Cigéo doit être aussi limitée que possible ; les déchets sodés sont déjà traités de façon à être partiellement décontaminés de leur sodium, mais il reste à vérifier que cette décontamination est suffisante pour assurer la sûreté à long terme du stockage. Pour les autres métaux pyrophoriques comme l'aluminium et le magnésium, l'Andra et les producteurs devront s'attacher à démontrer que ces déchets se présentent sous forme massive (absence de poudres très explosives), protégés par une couche isolante les rendant passifs, et qu'aucun phénomène physicochimique n'est susceptible de provoquer leur inflammation.

La Commission a insisté dans son rapport n°6 sur les enrobés bitumeux, mais ceux-ci ne sont pas les seuls déchets organiques. De façon générale, ces déchets dégagent de l'hydrogène et d'autres gaz comme des alcanes et de l'acide chlorhydrique. Par ailleurs la radiolyse de la matière organique est susceptible de produire des espèces chimiques complexes, favorisant la mobilité des matières radioactives.

*Pour les déchets MAVL vitrifiés, l'état de connaissance est globalement satisfaisant et les programmes en cours permettront encore de lever certaines incertitudes.*

*De même, l'Andra et les producteurs ont acquis un très bon niveau de connaissance sur le conditionnement des coques et embouts. Il convient néanmoins de préciser leur contenu en matière fissile et d'en vérifier la très faible mobilité en condition de stockage, afin de garantir l'absence de risque de criticité. Pour les déchets issus du démantèlement, les études peuvent être envisagées sur un moyen/long terme.*

*La Commission rappelle sa demande d'étude complémentaire sur les bitumes qui doit lui être remise d'ici à la fin de 2014.*

*Elle recommande de compléter le dossier de connaissances sur les déchets pyrophoriques et les déchets organiques. Elle souhaite disposer d'études sur leur comportement en conditions de stockage normales et incidentelles, notamment en cas d'incendie.*

*Les déchets classés divers par le PIGD doivent faire rapidement l'objet d'études poussées pour définir leur modalité finale de stockage.*

## 2.8.2 Optimisation du stockage et compatibilité chimique

L'Andra envisage un allongement des alvéoles HA et MAVL. Contrairement aux déchets HA qui sont homogènes du point de vue de la conception et de la dimension des colis et présentent donc tous des caractéristiques très proches, les déchets MAVL sont très divers et présentent une grande variabilité de volume de colis et de composition chimique au sein d'une même famille. Ainsi le rallongement des alvéoles HA ne posera pas de problèmes de compatibilité chimique alors que le rallongement des alvéoles MAVL risque de conduire à un co-stockage de différentes familles et sous-familles de déchets. Il convient donc d'étudier la compatibilité entre ces différentes familles afin de s'assurer que le co-stockage de leurs colis n'induira pas de risques supplémentaires.

Les co-stockages devront être testés dans les conditions les plus pénalisantes avec des équivalents chimiques non-radioactifs, afin de vérifier expérimentalement qu'ils n'entraînent pas des risques additionnels. De ce point de vue, la démarche proposée par les producteurs pour valider la possibilité du stockage des bitumes doit être appliquée à tout co-stockage.

*La Commission souhaite que lui soient présentés le dossier de connaissance des familles de déchets que l'Andra envisage de co-stocker et les études sur leur compatibilité chimique dans les conditions normales et incidentielles.*

*La Commission souhaite disposer au plus vite d'un plan de charge des alvéoles MAVL indiquant les familles de déchets prévues par alvéole, les co-stockages envisagés et les études justifiant ceux-ci.*

## 2.8.3 Le cas des combustibles usés (CU)

En l'état actuel, les CU, en dehors des CU0, ne sont pas des déchets ultimes destinés au stockage profond parce qu'ils ont vocation à être retraités ; ils ne doivent pas figurer dans l'inventaire soumis à la DAC. Des évolutions de la politique énergétique pourraient modifier ce choix. Les scénarios sont multiples et dépendent de décisions qui seront prises : ne pas vitrifier tous les déchets HA du PIGD, disposer des déchets des REP sans attendre les RNR, .... L'Andra a envisagé cette éventualité en introduisant dans la conception de Cigéo des infrastructures (descenderies, galeries d'accès, carrefours de galeries) capables d'assurer le transfert de colis CU. Une analyse de sûreté du stockage des CU a été présentée dans le dossier 2005. Les incertitudes actuelles sur la stratégie énergétique nationale incitent à la flexibilité. Cigéo ne doit pas s'identifier à un programme rigide qui empêcherait d'adapter le stockage à de nouvelles orientations.

*La Commission estime que l'Andra devrait préciser quels sont les éléments scientifiques et technologiques qu'il faudrait développer pour adapter Cigéo au stockage des CU dans divers scénarios en vue d'une nouvelle analyse de sûreté, préalable à une nouvelle DAC.*

## 2.9 COÛT DE CIGÉO

Les études portant sur le projet Cigéo sont financées par une taxe "recherche" (taxe sur les Installations Nucléaires de Base). Il est prévu de maintenir ces efforts d'E&R et la taxe est une bonne modalité à pérenniser.

Le financement de la construction et de l'exploitation de Cigéo sera à la charge des producteurs de déchets (EDF, CEA et Areva) et se fera via des conventions entre l'Andra et les producteurs. La clef de répartition retenue est actuellement la suivante : 78 % pour EDF, 17 % pour le CEA et 5 % pour Areva. Les producteurs doivent, de par la loi, prévoir les provisions nécessaires et sécuriser ces provisions via des actifs dit "dédiés". Le coût du stockage doit être arrêté courant 2013 par le Ministère, mais des discussions sont toujours en cours et aucune décision n'est encore prise. Ce coût sera en hausse sensible par rapport aux estimations initiales de 2005, ce qui n'a rien de surprenant pour un "prototype", d'autant que le volume des colis à stocker s'est accru depuis le premier projet. Le fait d'accroître la durée de vie des centrales aura également un impact sur le volume des déchets MAVL et HAVL à stocker. Créer une taxe pour financer ces dépenses ne semble pas judicieux : cela reviendrait à affaiblir la responsabilité des producteurs de déchets et à faire reposer sur le contribuable le rôle de payeur en "dernier ressort". La loi est claire sur ce point : c'est aux producteurs de déchets qu'incombe la responsabilité de payer pour le stockage.

La première tranche de Cigéo concerne la réalisation des infrastructures nécessaires à la mise en place du démarrage de l'installation. Cela concerne les bâtiments de surface (installations conventionnelles et installations nucléaires), le creusement des premières galeries et d'un certain nombre d'alvéoles, et un premier stockage. La DGEC a mis en place depuis 2012 un groupe de travail qui, sous la présidence du Ministère, réunit les producteurs de déchets (EDF, CEA, Areva) et l'Andra. La Commission participe en tant qu'observatrice à ce "GT coûts". L'expérience a montré que les réunions périodiques de ce GT étaient utiles pour expliciter les divergences portant les coûts entre acteurs et mutualiser les retours d'expérience. Certains rapprochements ont ainsi été observés, même si des divergences subsistent encore (notamment sur le coût du béton). Les discussions au sein du "GT coûts" ont précisément pour objet d'expliquer les écarts observés au niveau des chiffres avancés par l'Andra, d'une part, les producteurs, d'autre part. Deux observations peuvent être faites.

- Il est par nature difficile de prévoir aujourd'hui le coût d'installations dont la durée de vie dépasse le siècle. Ce coût est en outre très sensible à la chronique de livraison des déchets fournie par les producteurs. Il est sensible aussi à l'évolution des techniques qui seront sollicitées. Les calculs s'appuient aujourd'hui sur la chronique de déchets fournie en janvier 2012. Elle peut évoluer. Certains écarts de coûts par rapport aux estimations de 2005 s'expliquent par un périmètre différent des installations. Ainsi il est prévu deux installations de surface (EP1 pour des déchets MA et EP2 pour des déchets HA) contre une seule dans le projet 2005. L'Andra devrait être en mesure de fournir d'ici fin 2013 les coûts de construction des installations de surface et des premières installations souterraines. Il faut aussi déterminer avec précision les coûts d'exploitation, les coûts de jouvence (il est difficile de prévoir aujourd'hui le coût des équipements de recharge qui seront nécessaires demain), les coûts d'assurance et surtout le montant des taxes qui seront prélevées sur ces installations. Des incertitudes sur le montant des taxes subsistent ; elles devraient être levées lorsque les négociations entre le Ministère de l'Industrie et le Ministère des Finances auront abouti.
- Il faut distinguer les dépenses brutes des dépenses actualisées. Les dépenses seront étalées sur le long terme et leur positionnement dans le temps n'implique pas qu'il faille prévoir aujourd'hui de tout financer. Selon l'estimation de janvier 2012 de la Cour des comptes, le coût du stockage de ces déchets représentera un pourcentage faible, estimé de 1 à 2 %, du prix du KWh payé par le consommateur. Les coûts actualisés sont par nature sensiblement plus faibles que les coûts bruts et ils varient selon le taux d'actualisation retenu. Ainsi, à titre d'exemple, en coût actualisé à 3 %, un décalage de 50 ans correspond à une charge réduite de 77 %.

*Tout en prônant la poursuite de l'analyse du coût total du stockage, la Commission demande que lui soit fournie rapidement l'estimation des coûts de réalisation de la tranche 1. Les estimations du coût du stockage devront être affinées au fur et à mesure des dépôts de colis, en fonction du retour d'expérience.*

*Elle recommande de procéder à des comparaisons internationales concernant les coûts affichés pour un stockage souterrain. Une analyse comparative avec le cas de la Belgique, celui de l'Angleterre, de la Finlande et de la Suède serait utile pour éclairer le débat.*

Le projet comprend des coûts fixes et des coûts variables. Certains de ces coûts sont imputables, soit aux déchets MAVL, soit aux déchets HAVL, d'autres sont difficilement imputables (coûts communs). Cela est vrai à la fois pour les coûts fixes et pour les coûts variables (exploitation). Comment assurer leur financement ? Peut-on concevoir un tarif binôme ? On fait alors payer des coûts de réservation qui sont fonction du volume de déchets à stocker et des coûts d'exploitation qui sont recouvrés lorsque les déchets sont stockés. Il faut tenir compte du fait qu'entre le moment où on réserve les capacités et le moment où on stocke les déchets, le délai peut être long. Pour financer les coûts de première installation, il faudra passer une convention pour "avance sur travaux" avec les producteurs. Faire payer EDF et Areva c'est in fine faire payer le consommateur d'électricité car le coût sera logiquement répercuté dans le tarif de l'électricité. Faire payer le CEA (qui produit des déchets MAVL surtout) c'est faire payer le contribuable car c'est l'Etat qui devra in fine donner les crédits nécessaires. Les impacts du mode de financement sur le coût de l'électricité et sur les finances publiques doivent être explicités. Les règles devront en outre être ajustables au cours du temps.

*La Commission considère qu'il faut dès maintenant réfléchir à la façon de financer les diverses étapes du projet.*

33

## **2.10 IMPACTS SOCIO-ÉCONOMIQUES DU PROJET CIGÉO**

Par son ampleur et sa durée, le projet Cigéo aura un impact certain sur les conditions de vie des habitants de la Meuse et de la Haute Marne concernés.

Se réclamer de l'intérêt général ne peut à lui seul légitimer des impacts ressentis comme négatifs. De fait, la construction et l'exploitation d'un centre de stockage de déchets radioactifs entraîneront des nuisances. Les retombées économiques et les mesures d'accompagnement envisagées devraient toutefois devenir une chance pour le développement d'une région affectée par la désindustrialisation et le dépeuplement.

Les conséquences d'un projet d'ampleur comparable à Cigéo font l'objet d'études approfondies dans plusieurs pays. Ainsi, en Suède, depuis 2004, un programme de recherche en sciences sociale s'attache à l'impact socio-économique à long terme de l'implantation d'un stockage sur les communautés concernées.

*La Commission considère que les études scientifiques et celles sur les installations industrielles doivent être complétées par des études sur l'intégration économique et sociale afin de faire de Cigéo un projet cohérent et équilibré.*

Si certains acteurs enregistrent déjà des retombées positives du projet, d'autres ne les verront qu'à long terme. Ceux qui ressentiront les nuisances ne seront pas toujours les bénéficiaires directs des retombées économiques et sociales. La dissymétrie entre les perceptions des externalités négatives et des contreparties positives explique, en partie, les inquiétudes exprimées lors du Débat public.

*Les conséquences, positives et négatives, induites par la construction puis l'exploitation de Cigéo doivent être identifiées, analysées et prises en compte en concertation avec les populations.*

## Chapitre 3

### LES DÉCHETS FAVL

Les déchets de faible activité à vie longue (FAVL) comprennent les graphites de la filière "uranium naturel-graphite-gaz", des radifères, dont ceux résultant du traitement des minerais de terres rares, des fûts d'enrobés bitumineux et, enfin, des résidus du traitement de conversion de l'uranium, produits dans l'usine Comurhex de Malvési.

Dans son rapport n° 2 de juin 2008, la Commission avait estimé que les déchets radifères pourraient être stockés sous couvertures remaniée (SCR) ou intacte (SCI). Au contraire, les 23 000 tonnes de graphites, dont l'inventaire total en  $^{36}\text{Cl}$ , de période 300 000 ans, était grossièrement estimé à 21 000 TBq, nécessitaient un stockage sous couverture intacte (SCI) pour isoler de la biosphère le  $^{36}\text{Cl}$ , labile et très mobile dans l'environnement. Aucune étude n'avait été présentée pour le stockage des autres catégories de déchets FAVL.

Depuis 2008, les producteurs développent un programme de recherche sur les graphites, pour parvenir à une évaluation plus précise de l'inventaire en  $^{36}\text{Cl}$ ; les premiers résultats indiquent que l'inventaire initial en avait été surévalué. Par ailleurs, le projet européen Carbowaste s'intéresse aux méthodes de décontamination. La Commission n'a pas eu connaissance des conclusions de ce projet. D'autre part, des études sont en cours sur la possibilité de transformer certains déchets FAVL en déchets MAVL par la concentration de leurs radionucléides. Ils auraient alors vocation à être stockés dans Cigéo.

*La Commission estime que la gestion des FAVL a été jusqu'ici trop chaotique. Les résultats des études et recherches apparaissent, à beaucoup d'égards, encore préliminaires.*

35

*La Commission sera attentive aux conclusions que l'Andra et les producteurs tireront des E&R en cours. Le stockage des diverses variétés de FAVL exigera la définition de filières de stockages dédiées. Les procédés de concentration des radionucléides devront prévoir des matrices de stockage efficaces.*

*Pour préparer son prochain rapport, la Commission auditionnera l'Andra et les producteurs sur leurs stratégies vis-à-vis de l'ensemble des déchets FAVL.*

*La Commission rappelle que, lorsque des déchets ne peuvent être stockés en surface en raison de leur radioactivité, ils doivent être isolés de la biosphère. Cet isolement doit être maintenu pendant toute la période de nocivité de ces déchets. Une analyse de sûreté du site de stockage doit le démontrer.*

*Le silence actuel sur la recherche d'un site potentiel de stockage sous couverture intacte est préoccupant.*



## Chapitre 4

### PANORAMA INTERNATIONAL 2007-2013

#### 4.1 DIFFÉRENTES OPTIONS DE GESTION DES DÉCHETS FA, MA ET HAVL

La plupart des pays utilisant l'énergie électronucléaire disposent d'un centre de stockage opérationnel ou en construction pour les déchets de faible (FAVC) ou moyenne activité (MAVC) à vie courte. Il n'y a plus, de ce fait, de défis majeurs à relever concernant la gestion de ce type de déchets. Les efforts restants les plus importants concernent la démonstration de la sûreté, l'assurance qualité et la garantie que les capacités programmées intègrent bien les productions futures.

Pour les déchets de faible (FAVL) ou moyenne activité (MAVL) à vie longue (transuraniens, chlore 36,...) des technologies de traitement et de gestion restent en partie à développer. Peu de sites sont opérationnels, ou même en construction, voire à l'étude. Aux Etats-Unis, le centre WIPP (Waste Isolation Pilot Plant, profondeur de 650 m en couche de sel à Carlsbad, Nouveau Mexique) est opérationnel depuis 1999 pour le stockage définitif de déchets transuraniens du programme militaire.

Pour le stockage de déchets de haute activité à vie longue (HAVL), plusieurs pays ont des programmes d'E&R conduits dans des laboratoires souterrains (Allemagne, Belgique, France, Suède, Suisse,...). En Europe, en termes de projets concrets d'implantation d'un stockage géologique de combustible irradié ou de déchets HAVL, la Finlande, la France et la Suède sont les pays les plus avancés, avec un calendrier similaire. Le début de construction y est prévu dans 3 à 5 ans et l'exploitation vers 2025.

Dans tous les pays utilisant l'énergie électronucléaire, le choix stratégique le plus important concerne la gestion du combustible irradié. Il y a trois options de base :

- le stockage direct : le combustible est entreposé pendant quelques décennies, puis stocké en couche géologique (Finlande, Suède, Canada, ...);
- le recyclage complet ou partiel: le combustible est retraité, l'uranium et le plutonium sont (mono)recyclés en réacteurs à eau pressurisée ; les déchets HAVL issus de ce retraitement et les combustibles Mox ou non recyclés sont temporairement entreposés (France, Belgique: moratoire sur le retraitement,...)
- "Wait and see": un entreposage de longue durée est prévu (plusieurs décennies), en attendant une visibilité sur le futur de l'énergie nucléaire et/ou le temps nécessaire au développement de techniques de traitement, de stockage et de choix de site (Etats-Unis, Corée du Sud,...), éventuellement partagé entre plusieurs pays (Pays-Bas, Roumanie, Italie, Croatie-Slovénie,...)

L'AIEA et l'Union européenne spécifient que le stockage géologique est la solution de référence pour garantir la sûreté à long terme de la gestion des déchets radioactifs HAVL et des combustibles usés, s'ils sont considérés comme déchets.

Environ 15 % du combustible irradié dans le monde a été retraité ; la France est le pays où cette stratégie est poussée le plus loin (les 2/3 des combustibles y sont actuellement retraités, dont tous les combustibles UOX sortant des centrales). D'autres pays, comme la Chine, le Japon, l'Inde, le Royaume-Uni et la Russie ont des installations de retraitement, mais ces pays, jusqu'à aujourd'hui, n'ont retraité que des quantités limitées. L'avenir du retraitement est fortement lié au développement de réacteurs à neutrons rapides qui permettront d'aller au bout d'une stratégie de traitement-recyclage.

La stratégie "wait and see" est liée au fait que beaucoup de pays n'ont pas encore pris de décision concernant le stockage ou le retraitement. Elle trouve une partie de sa justification dans les difficultés rencontrées pour le choix d'implantation de sites de stockage géologique. Cette situation va probablement durer encore longtemps, d'où l'importance que les quelques pays qui avancent actuellement selon un programme clairement défini, puissent le mener à bien, montrant ainsi des exemples de bonnes pratiques.

## 4.2 CADRE LÉGAL INTERNATIONAL

La gestion des déchets radioactifs, et par extension les E&R sur la gestion des déchets, se situent dans un cadre légal national et international. Ces conventions et traités nationaux et internationaux sont rappelés en annexe VI.

## 4.3 LABORATOIRES DE RECHERCHE OU SITES DE STOCKAGES SOUTERRAINS

En fonction des caractéristiques géologiques locales, les E&R sur la roche hôte sont centrées sur l'argile, le granite ou le sel. En Europe, les principales recherches concernant le stockage géologique sont effectuées en Belgique (Mol, GIE Euridice, dans l'argile), Finlande (Olkiluoto, Posiva Oy, dans le granite), France (site de Meuse/Haute-Marne, Andra, dans l'argile), Suède (Äspö, SKB, dans le granite) et Suisse (sites du Mont-Terri et Grimsel, Nagra, argile et granite). L'Italie, la Lituanie, les Pays-Bas, la Roumanie, la Slovaquie, la Slovénie/Croatie, la République Tchèque, ainsi que plusieurs autres pays européens ont des projets pour le stockage géologique, soit individuellement, soit en collaboration avec d'autres. Les actions des pays dans le domaine du stockage sont présentées en annexe VII.

## 4.4 SOURCES D'IRRADIATION À SPECTRE RAPIDE

38

Le nombre de réacteurs offrant une possibilité d'irradiation avec des neutrons à spectre rapide est extrêmement limité au niveau mondial. En Europe, il s'agit de réacteurs à neutrons thermiques qui présentent localement des flux de neutrons rapides ne permettant que des irradiations d'échantillons de très faible volume. L'absence de réacteurs RNR européens compromet fortement le développement de nouvelles filières et les expériences de transmutation. Les sources d'irradiation à spectre rapide sont présentées pays par pays en annexe VIII.

## 4.5 PRINCIPALES INITIATIVES INTERNATIONALES SUR LES ADS

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

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

Contrairement aux réacteurs critiques où il faut contrôler en permanence la réaction en chaîne grâce à des éléments absorbeurs de neutrons, les ADS sous-critiques ne peuvent fonctionner que tant qu'il y a apport externe de neutrons. Ils ont donc une sûreté passive inhérente puisqu'ils s'arrêtent de fonctionner dès que l'accélérateur est coupé.

Si l'on veut charger de façon importante (40 à 50 %) le cœur d'un réacteur dédié à la transmutation, la sous-criticité est nécessaire. En effet, le contrôle d'un réacteur critique par des absorbants est rendu possible grâce à la présence d'une petite fraction de neutrons retardés. Or cette fraction devient de plus en plus ténue à mesure que le noyau à fissioneer devient plus lourd. Dès lors, la fraction d'actinides mineurs, comme l'américium ou le curium que l'on pourrait charger dans un cœur critique, est limitée à quelques % seulement.

La plupart des projets d'ADS prévoient un caloporeur de métal liquide, typiquement l'eutectique Pb-Bi ou le Pb pur. Un projet alternatif propose un refroidissement au gaz. Le choix du Pb-Bi est principalement dicté par l'absence de réaction chimique exothermique au contact de l'air ou de l'eau (contrairement au sodium) et par la température de fusion relativement basse de l'eutectique (123 °C).

Par rapport à un réacteur critique électrogène de 4<sup>ème</sup> génération, le flux en neutrons rapides peut être nettement plus élevé dans le cœur d'un ADS en fonction de l'intensité du courant de protons. Toutefois, le niveau de flux neutronique et la puissance totale du cœur sont dictés par la capacité de refroidissement du système. Pour des puissances totales comparables, il est possible d'avoir des niveaux de flux neutronique plus élevés pour l'ADS que pour un réacteur critique.

Le couplage accélérateur-source de spallation Pb-Bi a été étudié dans le cadre international de l'expérience Mégapie (Megawatt Pilot Target Experiment) à l'Institut Paul Scherrer (PSI - Suisse). L'expérience Mégapie, qui s'est déroulée en 2006 et dont les résultats sont actuellement en cours d'analyses, est le fruit d'une collaboration entre 17 partenaires dont le CEA et le CNRS. Le but est de démontrer la faisabilité d'une cible de Pb-Bi comme source de spallation de grande intensité.

Le couplage accélérateur-réacteur sous-critique a été étudié dans le cadre de l'expérience Muse-4 à Cadarache, auprès du réacteur expérimental Masurca sur la période 2000-2004. A cette fin, le CNRS a développé un accélérateur-source de neutrons pulsé, Genepi.

39

Guinevere, installé dans le réacteur Venus au SCK•CEN (Centre d'études de l'énergie nucléaire de Mol en Belgique) est un modèle à puissance réduite d'un premier ADS avec un cœur entier au plomb. Le projet est une collaboration entre le SCK•CEN qui a modifié le réacteur à eau Venus pour le transformer en réacteur au Pb (solide vu la faible puissance), le CEA qui a mis le combustible à disposition, et le CNRS qui a livré Genepi-3C, accélérateur à faisceau continu ou pulsé. Les expériences menées sur Guinevere, démarrées en 2010, permettront de comprendre le comportement spécifique d'un ADS. Elles visent notamment à qualifier une méthodologie permettant de suivre, en cours de fonctionnement, la mesure en continu du niveau de sous-criticité, paramètre caractérisant la sûreté du système couplé accélérateur-réacteur. Depuis mars 2011, le projet Freya (Fast Reactor Experiments for hYbrid Applications) est la poursuite des études entamées dans Guinevere. Le CEA et le CNRS sont partenaires de ce projet du 7<sup>ème</sup> PCRD.

Le Pb-Bi est employé comme caloporeur dans les réacteurs russes. La visualisation sous métal liquide et les interactions entre l'eutectique et les matériaux en contact avec le Pb-Bi, sont actuellement étudiées à la faveur du projet Myrrha et par d'autres partenaires en Europe (KIT, CIEMAT, ENEA, KTH, NRG, NRI), en Russie (IPPE), au Japon (JAEA), en Corée du Sud (NUTRECK/SNU), en Inde (BARC) et aux USA (LANL, MIT).

Les études initiées dans le projet Eurotrans, ont donné lieu au projet CDT (Central Design Team) dans le cadre duquel la conception du système " Myrrha – Fastef " a été développée. Il permettra d'étudier la transmutation d'actinides dans des flux très intenses de neutrons rapides. Le CNRS et Areva sont partenaires du projet CDT.

Dans le cadre de Gedepeon, divers scénarios pour la transmutation en RNR ou/et ADS ont été étudiés en collaboration entre le CEA, CNRS, EDF et Areva. Les scénarios, spécifiques du contexte français, ont comparé les approches à simple ou double strate, en réacteur électrogène ou dédié. Comme les scénarios sont étudiés sur la base de données non-encore vérifiées expérimentalement, ainsi que sur des technologies encore virtuelles, les résultats doivent cependant être considérés avec prudence.

Actuellement dans le cadre du 7<sup>ème</sup> PCRD, le projet Arcas permet d'étudier les scénarios de transmutation en mode hétérogène (c.-à-d. avec des combustibles de transmutation dédiés) et la comparaison économique de la transmutation par RNR critiques et par les ADS. Le projet est coordonné par le SCK•CEN avec la participation de 11 partenaires dont le CNRS.

Les principaux verrous qui restent à lever avant la construction d'un prototype industriel ADS pour la transmutation sont :

- la fiabilité de l'accélérateur à haute puissance (recherches très prometteuses au CNRS, au CEA et à l'étranger) ;
- la pérennisation de la démonstration de la source de spallation (Mégapie) pour des durées de fonctionnement d'un an au moins ;
- la confirmation des choix des matériaux en générant une base de données expérimentales ;
- la fabrication de combustible à haute teneur en actinides mineurs (recherche préliminaire au CEA et à l'ITU en Europe ainsi qu'au Japon et aux USA) ;
- la robotique pour les technologies d'inspection et de maintenance sous métal liquide, dans un environnement fortement irradiant ;
- l'étude de scénarios optimisés dans un contexte national spécifique, ainsi que la consolidation de la dimension économique.

Il est à noter, qu'à côté de l'emploi des ADS pour la transmutation, ces derniers offrent des perspectives très prometteuses comme sources à haut flux de neutrons rapides pour l'étude et la qualification de matériaux et combustibles pour les RNR ou autres nouveaux concepts de réacteurs. Dans cette optique, le projet Myrrha est retenu dans le cadre de ESNII (European Sustainable Nuclear Industrial Initiative) comme installation de support pour le développement des réacteurs rapides au sodium (Astrid), gaz (Allegro) et plomb (Alfred). Myrrha fait également partie de la feuille de route d'ESFRI (European Strategy Forum on Research Infrastructures) pour les grandes infrastructures de recherche pour l'énergie.

---

40

Un panorama des initiatives nationales est présenté en annexe IX.

#### **4.6 STOCKAGE GÉOLOGIQUE PROFOND**

La nature de la roche "hôte" impose des techniques spécifiques pour l'excavation industrielle, l'exploitation et le scellement des galeries de stockage. De plus, les caractéristiques des déchets ou du combustible usé conditionnent le choix des barrières ouvrageées qui, en interaction avec la roche "hôte", vont influencer la performance du stockage.

L'étude de l'impact environnemental du stockage est essentielle dans l'évaluation du risque potentiel pour les générations futures. Elle est nécessairement basée sur une modélisation poussée à partir de données aussi précises que possible sur la migration des radionucléides à travers les différentes barrières artificielles et naturelles.

La participation du public aux processus décisionnels et l'accès à la justice en matière d'environnement sont devenus un droit. Cela implique non seulement une transparence quant aux choix et décisions à prendre, mais également un accès préalable aux connaissances et une volonté des autorités d'adopter de nouvelles règles de bonne gouvernance.

Un panorama des projets est présenté en annexe X.

## **4.7 NOUVELLES FILIÈRES POUR LA SÉPARATION-TRANSMUTATION**

Les stratégies de transmutation reposent principalement sur les neutrons rapides, soit dans des systèmes critiques, soit dans des systèmes sous-critiques (ADS). L'initiative Génération IV et la plate-forme technologique européenne pour l'énergie nucléaire durable (SNE-TP) visent le développement de nouveaux types de réacteurs parmi lesquels les réacteurs à neutrons rapides recyclant un maximum de déchets. Ils nécessiteront le développement de nouveaux matériaux et des combustibles innovants incorporant des radionucléides issus de nouvelles techniques de séparation.

Les nouveaux concepts et les études de sûreté associées nécessiteront des méthodes de modélisation sur la base de données nucléaires aujourd'hui moins bien connues que celles qui sont disponibles pour les réacteurs de la génération actuelle (2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> générations).

Le développement d'une nouvelle filière doit prendre en compte l'ensemble des coûts, internes et externes, positifs et négatifs, ainsi que les éléments de nature géopolitique pour que la sûreté d'approvisionnement soit garantie au mieux.

Un panorama des projets est présenté en annexe XI.

## **4.8 ENSEIGNEMENT, FORMATION ET GESTION DES CONNAISSANCES**

Un des éléments critiques du développement de l'énergie nucléaire est le manque potentiel de ressources humaines, de laboratoires disponibles et d'institutions compétentes pour l'enseignement et la formation nucléaires. Un autre est la gestion des connaissances.

Un panorama des projets est présenté en annexe XII.







## Annexe I

### COMPOSITION DE LA COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION NOVEMBRE 2013

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

**Jean BAECHLER** – Membre de l'Académie des Sciences Morales et Politiques - Professeur émérite de l'Université de Paris-Sorbonne (Paris IV).

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

**Pierre BÉREST** – Directeur de recherche à l'Ecole Polytechnique.

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

**Hubert DOUBRE\*** – Professeur émérite de l'Université Paris XI-Orsay.

**Maurice LAURENT** – Secrétaire général de la Commission nationale d'évaluation - Directeur honoraire de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques.

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

**Maurice LEROY** – Vice-président de la Commission nationale d'évaluation – Membre associé de l'Académie nationale de Pharmacie - Président de la Fédération Française pour les Sciences de la Chimie (FFC) - Professeur émérite de l'Université de Strasbourg.

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

**Gilles PIJAUDIER-CABOT\*\*** – Professeur de Génie Civil, ISA-BTP, LFC-R – Membre senior à l'Institut Universitaire de France.

**François ROURE** – Professeur et expert scientifique à l'IFP-Energie Nouvelles - Professeur extraordinaire de l'université d'Utrecht (2004-2014).

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

---

\* N'a pas participé à la rédaction du présent rapport.

\*\* Nommé le 13 août 2013 en remplacement de M. Yves Bréchet.



## Annexe II

### ORGANISMES AUDITIONNÉS PAR LA CNE2

12 décembre 2012 :	Andra - Présentation et analyse des solutions d'esquisses – Présentation de saisine du débat public
16 janvier 2013 :	CEA - Audition restreinte – Dossier 2012.
17 janvier 2013 :	CEA – Programmes CEA sur l'aval du cycle pour les systèmes nucléaires futurs.
13 février 2013 :	CNRS – La filière thorium.
14 février 2013 :	Andra – Bétons.
6 mars 2013 :	CEA – Faibles doses.
7 mars 2013 :	Andra – Simulation numérique.
24 avril 2013 :	CEA - Revue des scénarios électronucléaires.
25 avril 2013 :	Andra – Gaz – Transitoire hydraulique gaz – Rejets – Résultats du programme Forge.
15 mai 2013 :	Andra - Les déchets contenant des composants organiques.
16 mai 2013 – matin :	CEA – Astrid.
16 mai 2013 – après-midi :	Andra – Les autres Déchets MAVL et les graphites.
19 juin 2013 :	Andra – Point d'avancement Cigéo.
20 juin 2013 :	Andra – Les scellements

45

\* \* \*

11 janvier 2013 :	DGEC – Réunion technique sur les coûts du centre de stockage des déchets radioactifs Cigéo.
16 janvier 2013 après-midi :	Rencontre CNE2/Claude Bernet – Président Commission du Débat Public chargé du projet Cigéo.
17 janvier 2013 :	DGEC – Réunion de préparation de débat public Cigéo.
7 février 2013 :	HCTSIN – Réunion de préparation de débat public Cigéo.
13 février 2013 :	Andra – Réunion revue Cigéo.
28 février 2013 :	OPECST – table rondes sur la séparation-transmutation et les perspectives d'évolution en matière de gestion des déchets et de démantèlement au regard des décisions à venir dans le cadre de la transition énergétique.
4 & 5 avril 2013 :	Présentation du rapport 6 au Clis à Bar-le-Duc (Meuse)
22 avril 2013 :	DGEC – Réunion de préparation du débat public Cigéo.
14 mai 2013 :	ASN – Réunion d'échanges avec la CNE2.
21 mai 2013 :	Andra/DGEC – Réunion de restitution – revue projet.
12 juin 2013 :	CEA – Prolifération.

\* \* \*

## VISITES DE LA CNE2

3 au 14 novembre 2012 : Voyage d'étude en Chine et Corée du Sud.

17 & 19 avril 2013 : Rencontre CNE2/CNS/ESK - Visite du laboratoire de Mont-Terri (Suisse).

18 au 20 septembre 2013 : Visite de l'usine Melox à Marcoule (Gard).

### Annexe III

## LISTE DES DOCUMENTS TRANSMIS À LA CNE2 2012-2013

### Andra

- Bilan des études et recherches sur l'entreposage des déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue – décembre 2012.
- Proposition de l'Andra relatives à la réversibilité du projet Cigéo – décembre 2012.
- Synthèse sur l'activité microbienne et ses conséquences dans une alvéole HA – 28 février 2013.
- Synthèse des études d'esquisse du projet Cigéo – mars 2013.
- Déchets radioactifs : rapport de veille – Veille internationale sur les projets de stockage géologique des déchets de haute activité et ceux à vie longue, et sur la gestion des déchets radioactifs – février 2013.
- Synthèse de l'étude monotube – bitubes – 7 mai 2013.
- Synthèse des études de transferts hottes : comparatif automoteur/funiculaire – 7 mai 2013.
- Rapport Andra Cigéo - Le second système de confinement pendant les opérations de transfert des colis de déchets MA-VL dans l'installation souterraine de Cigéo – mai 2013
- Contrat d'objectifs – Etat-Andra – 2013-2016 – mai 2013.
- Synthèse sur l'activité microbienne et ses conséquences dans une alvéole HA – février 2013
- Tableau de bord des connaissances sur l'ensemble des colis MAVL prévus dans Cigéo – 12 juillet 2013.
- Document technique – Les déchets pris en compte dans les études de conception de Cigéo – juillet 2013.
- Rapport annuel d'avancement des travaux réalisés dans le laboratoire de recherche souterrain en 2012 – 17 juin 2013.

47

### CEA

- Rapport sur la gestion durable des matières radioactives avec les réacteurs de 4<sup>ème</sup> génération – décembre 2012.
- Rapport sur la séparation-transmutation des éléments radioactifs à vie longue – décembre 2012.
- Rapport sur les réacteurs à neutrons rapides de 4<sup>ème</sup> génération à caloporteur sodium – le démonstrateur Astrid – décembre 2012.
- Rapport sur les réacteurs à neutrons rapides de 4<sup>ème</sup> génération à caloporteur gaz – le réacteur expérimental Allegro - Les autres filières à neutrons rapides de 4<sup>ème</sup> génération – décembre 2012.
- Synthèse et recommandations.
- Note technique – Programme de recherches sur la séparation-transmutation – période 2013-2020 – 5 mars 2013.
- Monographie de la Direction de l'énergie nucléaire – La neutronique – 2013.



## Annexe IV

### VOYAGE D'ÉTUDE EN CHINE ET CORÉE DU SUD DU 3 AU 14 NOVEMBRE 2012

La Commission a effectué un voyage d'étude en Chine et en Corée du 3 au 14 novembre 2012.

#### CHINE

Le Service Nucléaire de l'Ambassade de France à Pékin a fourni un panorama actualisé et très approfondi des activités nucléaires en Chine. Ces informations ont permis à la CNE d'analyser et d'évaluer les développements en cours présentés par les instances nucléaires chinoises.

Des rencontres avec le CAEA (China Atomic Energy Authority), le CNNC (China National Nuclear Corporation), le BRIUG (Beijing Research Institute for Uranium Geology), et le CIAE (China Institute of Atomic Energy) ont permis de discerner les grandes lignes de la politique de mise en œuvre de l'énergie électronucléaire en Chine.

En 2011 la production d'électricité d'origine nucléaire (12,5 GWe) représente 2% de la production totale. Le tableau ci-dessous compare les chiffres de production électrique totale pour la France, les USA et la Chine. Il illustre la faible consommation électrique de la Chine relativement à sa population et laisse présager un développement rapide à venir.

2011	CHINE	ETATS-UNIS	FRANCE
TWh	3450	4110	536
Population en millions	1337	313	65

49

Le CNNC et le CAEA ont confirmé un plan de construction de 19 unités pour 20 GWe à l'horizon 2020 et de 7 unités pour 7 GWe en 2030. La production d'électricité d'origine nucléaire devrait représenter 240 GWh en 2050. L'analyse des ressources mondiales en uranium et des tensions à prévoir dans le futur a conduit la Chine à faire le choix du retraitement du combustible usé pour recycler le plutonium et l'uranium dans un futur parc de RNR. Les E&R concernant les RNR sont principalement développées au CIAE (China Institute of Atomic Energy) ; le CEFR (China Experimental Fast Reactor) a été présenté à la CNE. Ce prototype de 20MWe a été couplé durant 48 heures au réseau en 2012 et les mises au point se poursuivent pour atteindre un couplage de type industriel à l'avenir. Ce prototype, refroidi au sodium, a les caractéristiques des réacteurs russes de 2<sup>ème</sup> génération.

S'agissant des ADS, un programme d'E&R moins avancé que celui des RNR est en cours.

Ayant choisi le retraitement des combustibles usés (sauf ceux issus d'un réacteur Candu), les produits de fission et vraisemblablement les actinides mineurs seront vitrifiés et destinés à pour un stockage géologique profond.

Le concept de stockage géologique repose, comme cela est classique au plan international, sur trois barrières : les conteneurs, la barrière ouvragee pour laquelle les équipes chinoises étudient la mise en œuvre de la bentonite et un stockage géologique profond. Cinq régions sont étudiées: le nord-ouest de la Chine avec le site de Beishan, la Mongolie intérieure, le sud et le sud-ouest de la Chine, et l'est de la Chine non loin des zones côtières fortement industrialisées. La roche hôte prioritaire est le granite mais l'argile n'est pas exclue. 12 sites seront sélectionnés dans un premier temps, puis ce chiffre sera réduit à 3 sites considérés de qualité équivalente pour l'implantation d'un stockage géologique.

Le plan de réalisation comprend une recherche de site lancée dès 1985, la création d'un laboratoire souterrain en 2020 et la mise en œuvre d'un stockage géologique en 2050.

La Commission a visité le site de Beishan où les études sont les plus avancées. 19 forages ont déjà été réalisés pour étudier la qualité de la roche, sa fracturation et l'hydrogéologie. Ce site situé dans le désert de Gobie, est considéré actuellement comme celui qui a le meilleur potentiel en raison de la faible densité de population, l'absence de ressources minérales, un contexte géologique favorable au plan hydrologique avec de très faibles précipitations. Un réseau de voies de communication, déjà très avancé, est en cours de réalisation, avant même que le laboratoire souterrain ne soit implanté. On ne peut qu'apprécier très favorablement la cohérence de la stratégie chinoise.

## CORÉE DU SUD

La Commission a bénéficié de l'accueil de l'Ambassade de France en Corée du Sud qui lui a fourni des informations détaillées permettant de mieux comprendre comment ce pays aborde les recherches scientifiques et techniques dans le domaine de l'énergie électronucléaire et quels sont pour lui les enjeux économiques.

50

La rencontre avec des acteurs du nucléaire en Corée a eu lieu les lundi 12 et mardi 13 novembre 2012. Le KAERI (Korean Atomic Energy Research Institute) développe des recherches concernant le traitement pyrométallurgique, fondé sur la séparation électrochimique à haute température des constituants du combustible usé. Cette technologie vise à réduire le volume des déchets et à recycler l'uranium et le plutonium dans de futurs RNR. Des recherches concernant le développement de réacteurs à neutrons rapides sont en cours et un prototype de boucle sodium est en expérimentation. Toujours dans le domaine des innovations, le KAERI développe des recherches concernant le cycle du combustible pour des réacteurs CANDU en mettant au point notamment un combustible DUPIC (Direct Use of Pressurised Water Reactor Spent Fuel). Cette approche permet à la Corée de respecter le traité de non-prolifération qui lui interdit la séparation des éléments contenus dans le combustible usé. Le combustible DUPIC est en effet re-fabriqué à partir de l'uranium, du plutonium, des actinides mineurs et des produits de fission.

Jusqu'à maintenant, les déchets de faible et moyenne activité ainsi que des combustibles usés, sont entreposés sur site, en attente d'une solution complète de l'aval du cycle. Les combustibles usés sont entreposés en piscine dans le cas des REP et à sec dans le cas des CANDU. Cette situation ne pourra durer telle quelle en raison de la prochaine saturation des installations d'entreposage.

Un site de stockage des déchets radioactifs de faible et moyenne activité, géré par l'agence nationale KRMC (Korean Radioactive waste Management Corporation), est en phase de construction sur un site localisé à proximité de la ville de Gyeongju (côte Est). La Commission a visité ce site dont la conception s'appuie sur des silos forés dans une caverne granitique souterraine ; elle est donc proche du modèle suédois. Sa mise en exploitation était prévue pour l'année 2013, avec quatre ans de retard sur le projet initial. Elle a été reportée récemment à juin 2014.

La Commission a été surprise par la dimension des galeries, qui paraissent surdimensionnées pour les déchets envisagés, alors que le problème des déchets de haute activité reste entier. D'autre part le renforcement des parois granitiques par un revêtement de béton laisse présager un milieu fracturé.



## Annexe V

### AVIS DE LA CNE2 TRANSMIS LE 28 MARS 2013 À MADAME LA MINISTRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE

#### AVIS DE LA COMMISSION SUR LE RAPPORT CEA 2012 : LA SÉPARATION-TRANSMUTATION

*Cet avis a été préparé à partir du rapport CEA 2012, tomes 1 à 5 (loi n° 2006-739 du 28 juin 2006)*

Le déploiement d'un parc de réacteurs à neutrons rapides (RNR) assurerait à la France l'indépendance complète de sa production d'électricité pour une durée multiséculaire et placerait son industrie nucléaire au tout premier rang mondial. Des défis techniques et technologiques sont encore en suspens, mais l'industrie nucléaire française est capable de les relever. Le plus grand sera d'assurer une sûreté égale ou supérieure à celle des réacteurs les plus récents et de faire partager au public la confiance dans le niveau de sûreté atteint.

La Commission retient de ses auditions que :

1. La France est engagée dans trois projets de réacteurs à neutrons rapides : le projet Astrid (Sodium), le projet Allégro (Gaz) et le projet d'un réacteur liquide à sel fondu. Par ailleurs, elle participe au projet de réacteur piloté par un accélérateur (ADS) Myrrha, susceptible de brûler les actinides mineurs. Seule la filière sodium a atteint la maturité préindustrielle. Le projet Astrid est aujourd'hui le seul au monde à proposer des innovations à la hauteur des exigences de sûreté induites par Fukushima.
2. La filière RNR consommerait le plutonium produit tant par ces réacteurs que par les réacteurs actuels. A un parc de RNR produisant, comme le parc actuel, 430 TWh par an, correspondrait, en 2150, un inventaire stabilisé de 900 tonnes de plutonium, soit trois fois plus que la quantité déjà produite à ce jour. Dans l'hypothèse d'un parc de réacteurs de type actuel et de puissance équivalente, l'inventaire serait de 1 300 à 1 900 tonnes en 2150 et continuerait à croître.
3. Que deviendraient ces 900 tonnes de plutonium après l'arrêt de la filière RNR ? Une solution serait de mettre les combustibles usés directement au stockage profond, comme le font d'autres pays. Elle exigerait, cependant, des études dédiées, car les teneurs de 25 % de plutonium dans les combustibles demanderaient des solutions spécifiques. Un progrès décisif, avancé par le CEA, consisterait à consommer le plutonium dans le parc fonctionnant en mode sous-générateur, tout en continuant à produire de l'électricité. Le stock de plutonium inclus dans le cycle serait alors réduit de 65 % tous les soixante ans. Cette solution, dont la faisabilité technique et industrielle reste à démontrer, implique une stratégie énergétique stable sur le long terme.
4. Des progrès considérables ont été réalisés dans la séparation des éléments contenus dans le combustible usé. Les actinides mineurs peuvent dorénavant être isolés spécifiquement, ce qui ouvre la voie à leur transmutation. Dans la pratique, elle s'appliquerait surtout à l'américium. Sa transmutation permettrait de réduire l'emprise du stockage des déchets haute activité à vie longue (HAVL). La radio-toxicité de l'inventaire stocké en serait également diminuée. Toutefois, en raison de la faible mobilité de l'américium dans l'argile, cet avantage serait avant tout sensible dans un scénario comme l'intrusion humaine involontaire dans le stockage profond.

5. Les avantages de la transmutation seraient payés par un doublement approximatif du coût total de la gestion des déchets HAVL. Un chiffrage plus précis devrait prendre appui sur une comparaison étroite entre un stockage avec et un autre sans transmutation.

Recommandations de la Commission :

- La Commission recommande la poursuite du projet Astrid (réacteur et ateliers de fabrication et traitement du combustible) ; il doit être mené à terme, pour permettre une évaluation complète des potentialités des RNR sodium ;
- La Commission estime que les RNR gaz et sel fondu ouvrent des perspectives intéressantes pour un avenir lointain ; il convient donc de poursuivre les études exploratoires engagées avec nos partenaires européens ;
- Si la transmutation des actinides mineurs est retenue, la Commission est d'avis que les solutions envisagées par les ADS soient prises en compte et comparées à celles des RNR ;
- La séparation-transmutation de l'américium et le fonctionnement en mode sous-générateur des réacteurs RNR présentant des avantages substantiels, la Commission tient qu'ils continuent à faire l'objet de recherches actives ;
- La Commission demande, enfin, que le bilan complet des déchets ultimes de la filière RNR soit précisé.

\* \* \*

## AVIS DE LA COMMISSION SUR LES PROPOSITIONS DE L'ANDRA : L'ENTREPOSAGE DES DÉCHETS DE HAUTE ACTIVITÉ ET DE MOYENNE ACTIVITÉ À VIE LONGUE (HAVL-MAVL).

54

Cet avis a été préparé avec l'ensemble des documents fournis par l'Andra avant le 7 mars 2013.

L'entreposage des déchets radioactifs HAVL-MAVL doit garantir la conservation des colis de déchets en toute sécurité, en attendant leur reconditionnement ou leur mise en stockage. Il doit être intégralement réversible et provisoire ; il ne saurait se substituer au stockage qui, lui, doit être définitif. L'entreposage et le stockage sont donc des outils complémentaires, qui doivent être conçus et exploités de manière coordonnée.

L'entreposage remplit plusieurs fonctions :

- il rend flexible la gestion de la construction et de l'exploitation du stockage géologique profond ;
- il assure par décroissance radioactive (cas des HA essentiellement) le refroidissement des colis au service d'un stockage optimal ;
- il intervient dans d'éventuelles opérations de récupération de colis stockés, en recueillant ceux qui seraient remontés au jour ;
- il permet de surveiller les colis et de mieux connaître l'évolution de certains.

Un entreposage ne peut donc fonctionner en mode passif, mais doit demeurer en exploitation active jusqu'à sa fermeture définitive et son démantèlement.

Afin d'assurer sa mission, l'entreposage doit être conçu pour :

- protéger pendant le temps nécessaire les colis des agressions externes (intempéries, inondations,...) et interne (dégagement de chaleur, de gaz, ...) pour en garantir l'intégrité ;
- protéger de la radioactivité les travailleurs, les populations et l'environnement ;
- en garantir la maintenance ;
- permettre la surveillance des colis ;

- autoriser le retrait des colis lorsque nécessaire ;
- s'adapter, autant que possible, à des changements de nature des colis.

Les recherches menées par l'Andra, en collaboration avec les producteurs, ont d'abord considéré une approche globale basée sur les concepts du dossier 2009. Le programme industriel de gestion des déchets (PIGD) a permis de dégager des voies d'optimisation assurant la coordination avec le développement du projet Cigéo. Ces recherches conduisent à :

- prévoir les installations d'entreposage pour une durée séculaire, notamment pour les HAVL pour lesquels le PIGD retient l'intérêt d'une durée d'entreposage de 85 ans ;
- concevoir des installations optimisées tenant compte du dégagement thermique des déchets HAVL et des dégagements gazeux des déchets MAVL ;
- permettre l'entreposage de colis primaires et de colis de stockage ;
- privilégier des installations de surface ou faiblement enterrées, moins complexes à réaliser que des installations profondes ;
- réaliser les entreposages sur les lieux de production ;
- ne pas implanter un entreposage sur le site Cigéo hormis les installations nécessaires à la gestion flexible des flux de colis à stocker.

### **Avis de la Commission**

La Commission considère que les réflexions et les recherches sur l'entreposage, conduites en étroite concertation avec les producteurs, sont parvenues à maturité. Les résultats obtenus permettent de concevoir un programme de développement des entreposages en harmonie avec les besoins des producteurs et les développements du stockage géologique profond. Elle approuve le programme scientifique de l'Andra visant à optimiser les ouvrages sur le plan de la durabilité des structures, de la simulation de leur fonctionnement hydro-thermo-aéraulique et des moyens de surveillance.

55

La Commission recommande que tous les déchets historiques bénéficient de conditions d'entreposage en conformité avec les concepts issus de la recherche actuelle.

La Commission engage l'Andra et les producteurs à poursuivre leur dialogue fécond avec les populations locales au-delà des obligations légales pour toute opération sur les entrepôts (création, modification, démantèlement).

\* \* \*

## AVIS DE LA COMMISSION SUR LES PROPOSITIONS DE L'ANDRA : L'ESQUISSE CIGÉO.

Cet avis a été préparé avec l'ensemble des documents fournis par l'Andra avant le 7 mars 2013.

L'Andra a démontré l'aptitude de la couche d'argilite de la Zira<sup>4</sup> à confiner sur le long terme les radionucléides contenus dans les colis de déchets HAVL<sup>5</sup> et MAVL<sup>6</sup>. Elle a, en conséquence, demandé au groupement Gaiya, chargé de la maîtrise d'œuvre système du projet Cigéo, de lui proposer une esquisse comportant, pour la conception des ouvrages souterrains comme pour la conception des ouvrages de surface, trois solutions distinctes. Pour la définition de ces solutions l'Andra avait fixé au préalable un ensemble hiérarchisé de critères, au premier rang desquels figuraient la sûreté à long terme et la sûreté en exploitation.

### Sûreté du stockage

Le concept retenu pour le stockage doit permettre de maintenir l'impact radiologique au niveau le plus faible qu'il est raisonnablement possible d'atteindre, compte tenu de la connaissance scientifique acquise, de l'état des techniques et des facteurs économiques et sociaux. La Commission estime que l'Andra s'est placée dans une démarche en accord avec ce principe.

Notamment, la recherche de solutions devait obligatoirement s'inscrire dans un ensemble de dispositions favorables à la sûreté : groupement des puits d'accès ; choix d'une orientation des alvéoles qui réduit les dommages causés à la roche ; simplicité du trajet des colis depuis leur réception en surface jusqu'à leur emplacement définitif dans les alvéoles de stockage en profondeur ; et séparation stricte entre les activités à caractère nucléaire et les activités de réalisation des ouvrages souterrains.

56

De ce fait, les solutions proposées par le groupement ne présentent pas, du point de vue de la sûreté à long terme, de différences qui permettent de les distinguer nettement. Même si, au vu des calculs préliminaires de sûreté, elle est légèrement inférieure à la solution dite 2, plus compacte, la solution souterraine retenue par l'Andra, dite 1, présente des avantages significatifs du point de vue de la simplicité de réalisation et de la sécurité en exploitation, notamment en raison de la séparation particulièrement nette entre les activités nucléaires et les activités de génie civil.

La solution 1 privilégie l'usage du tunnelier plutôt que celui de la machine à attaque ponctuelle testée, avec succès, dans le laboratoire souterrain. D'utilisation moins flexible en matière de géométrie des galeries et d'architecture du stockage, le tunnelier présente des avantages certains en matière de sécurité du travail et réduit l'endommagement de la roche. Des essais de mise en œuvre sont en cours dans le laboratoire souterrain pour valider cette option.

### Revêtement – incendie – scellement

Le revêtement des galeries et alvéoles doit assurer la bonne tenue des ouvrages et donc permettre une récupération éventuelle des colis pendant un siècle au moins. La question de son dimensionnement est posée clairement dans l'esquisse ; les connaissances accumulées jusqu'en 2025 devront s'appliquer à lever les incertitudes qui subsistent.

<sup>4</sup> Zone d'intérêt pour une reconnaissance approfondie.

<sup>5</sup> Haute Activité Vie Longue.

<sup>6</sup> Moyenne Activité Vie Longue.

La prévention de l'incendie et la limitation de ses effets sont des préoccupations primordiales dans la conception d'un ouvrage souterrain. L'effort doit porter notamment sur la réduction des quantités de matières inflammables, les dispositifs d'alerte, la tenue au feu des structures de génie civil et la gestion d'un incendie. L'évacuation du personnel en cas d'incendie dans les galeries MAVL est rendue plus facile dans la solution 1 retenue par l'Andra du fait de la présence de galeries parallèles dont les fonctions sont complètement distinctes.

La réalisation des scellements concerne surtout la fin de vie du stockage. Son étude doit être poursuivie, même si l'esquisse a apporté des clarifications. Des essais à l'échelle 1 sont prévus dans Cigéo.

### **Alvéoles HAVL et MAVL**

Les choix effectués pour le stockage des déchets HAVL exothermiques laissent encore la place à des optimisations. La mise en stockage de ces déchets n'est pas prévue avant 2075. L'Andra a démontré qu'elle disposait d'une solution technologique crédible.

Le principe de la hotte paraît le choix le plus robuste comme seconde barrière de confinement des déchets MAVL pendant leur transfert surface-fond.

Un petit nombre de colis exige des ouvrages de grand diamètre qui ne peuvent être qualifiés dans le laboratoire souterrain. Si leur réalisation s'avérait impossible, les producteurs devront redimensionner ces colis.

### **Optimisation**

Certaines dispositions contenues dans les solutions non retenues, telles que la position des ouvrages au sein de la Zira ou la distance entre les quartiers MAVL, HAVL et HA<sup>7</sup>, peuvent présenter des avantages du point de vue de la sûreté à long terme. Il sera important de vérifier si, dans une démarche d'optimisation, elles peuvent être intégrées dans la solution 1.

57

### **Installations de surface**

L'Andra a étudié plusieurs solutions pour les installations de surface, incluant les aspects de sûreté mais aussi les demandes des élus et la qualité architecturale et paysagère. Sa préférence va à la réalisation en subsurface des bâtiments de réception, contrôle et conditionnement des colis de déchets et de l'entrée de la descenderie, les activités de support aux travaux étant localisées pour leur part au voisinage des puits. Le dossier est encore préliminaire. Les choix définitifs tiendront compte des demandes qui auront été exprimées lors du débat public.

### **Avis de la Commission**

La Commission estime que le choix de la solution 1 par l'Andra, responsable de la conception du stockage selon la loi, prend bien en compte les préoccupations de sûreté d'exploitation et de long terme. Les incertitudes industrielles qui subsistent (tunnelier, grand diamètre) sont réduites.

Pour la Commission, l'esquisse est, à ce stade, crédible industriellement et globalement conforme aux principes qui visent à assurer la sûreté maximale du stockage. Les pistes d'amélioration sont clairement identifiées et devront impérativement être explorées.

Au vu de l'esquisse proposée, la Commission ne voit pas de raison scientifique ou technique de se réserver à la poursuite du processus d'examen de la demande d'autorisation et de création du stockage.

\* \* \*

<sup>7</sup> Colis de déchets haute activité vitrifiés moyennement exothermiques.

## AVIS DE LA COMMISSION SUR LES PROPOSITIONS DE L'ANDRA : LA RÉVERSIBILITÉ

Cet avis a été préparé avec l'ensemble des documents fournis par l'Andra avant le 7 mars 2013.

### Position de la CNE sur la réversibilité

La réversibilité traduit le principe que le stockage est susceptible d'évoluer tout au long de son exploitation, imposant que toutes les interventions nécessaires puissent être effectuées. Sa mise en œuvre exige, outre une qualité assurée et vérifiée, la récupérabilité et la flexibilité.

La récupérabilité signifie la latitude d'extraire tout colis de déchets de son lieu de stockage ; elle implique la capacité de mobiliser, le cas échéant, les moyens techniques et économiques nécessaires, et ce pendant toute la durée de la période de réversibilité que la loi fixera.

La flexibilité exige la réunion de capacités variées :

- de prise en compte des avancées scientifiques et techniques, ainsi que du retour d'expérience pendant la période séculaire d'exploitation ;
- d'adaptation du stockage à l'évolution de la nature des déchets et des colis ;
- de surveillance des différentes composantes de l'ouvrage, de manière à appliquer les actions de réversibilité qui s'imposeraient.

La Commission est favorable à la réversibilité du stockage ainsi conçue et mise en œuvre. Elle impose des contraintes à prévoir à l'avance et des pratiques à respecter. À titre d'exemple contraire, la Commission observe que l'évolution des chambres de stockage de la mine d'Asse eût vraisemblablement été plus facile à contrôler, si les ouvrages avaient été conçus dès l'origine pour être réversibles, et que la récupération de certains colis de Stocamine a été gravement compromise par l'oubli de la réversibilité pendant l'exploitation du stockage.

58

Toutefois, la commission rappelle que, à terme, un stockage de déchets radioactifs a vocation à être fermé et à fonctionner en mode passif, sans qu'il soit nécessaire de le surveiller. Par conséquent, les dispositions favorables à la réversibilité ne doivent pas compromettre la sûreté du stockage tant durant la phase d'exploitation qu'après fermeture.

### Avis de la Commission sur le rapport de l'Andra

Dans le schéma directeur d'exploitation et de fermeture proposé par l'Andra, la commission apprécie favorablement :

- la construction des installations par tranches dans une conception modulaire ; l'intégration, dès la conception des installations, d'éléments qui facilitent la récupération des colis sans remettre en cause l'objectif d'un stockage définitif ;
- la mise en place d'ouvrages témoins : la Commission recommande qu'ils correspondent aux différents niveaux de fermeture et donc de difficulté de récupération ;
- l'organisation de revues de projet avec une périodicité de dix ans, pour bénéficier du retour d'expérience et actualiser les conditions de la réversibilité : la Commission souhaite que les conclusions des revues de projet soient rendues publiques ;
- la mise en place, dès la création de Cigéo, de dispositifs de surveillance du stockage ;
- la création de l'Observatoire Pérenne de l'Environnement, destiné à perdurer après la fermeture du stockage.

La Commission considère que :

- la sécurité des travailleurs et la sûreté du stockage à long terme sont prioritaires ;
- aussi la fermeture d'un alvéole à temps pour garantir une évolution optimale doit-elle être préférée à la prolongation de son ouverture à des fins de récupération ;
- le schéma directeur devra préciser les opérations de maintenance et de réparation qui pourront être réalisées en situation tant normale qu'accidentelle ;
- des exercices de récupération de colis, dans le respect des règles de radioprotection, doivent être prévus ; ils seront l'occasion d'ausculter le milieu de stockage.



## Annexe VI

### CADRE LÉGAL INTERNATIONAL

#### TRAITÉ EURATOM, ARTICLE 37 (1957)

L'article 37 du traité Euratom spécifie que "Chaque État membre est tenu de fournir à la Commission [européenne] les données générales de tout projet de rejet d'effluents radioactifs sous n'importe quelle forme, permettant de déterminer si la mise en œuvre de ce projet est susceptible d'entraîner une contamination radioactive des eaux, du sol ou de l'espace aérien d'un autre État membre".

#### CONVENTION D'ESPOO (1991)

La Convention sur l'évaluation de l'impact sur l'environnement (EIE) dans un contexte transfrontalier stipule les obligations des Parties d'évaluer l'impact sur l'environnement de certaines activités dès le début de leur planification. Elle stipule également l'obligation générale des Etats de notifier et de se consulter sur tout projet majeur à l'étude, susceptible d'avoir un impact transfrontière préjudiciable important sur l'environnement. La Convention est entrée en vigueur le 10 septembre 1997 et a été ratifiée par la France en 2001.

#### CONVENTION INTERNATIONALE OSPAR (1992)

Suite aux conventions de Londres et d'Oslo sur la prévention de la pollution marine due aux immersions de déchets par bateau ou avion, et à celle de Paris sur la prévention des rejets à partir de la terre ferme, les pays européens ont mis fin, depuis 1982, à l'évacuation de déchets radioactifs dans l'Océan Atlantique. Depuis 1992, les conventions ont été réunies dans la Convention internationale OSPAR, ratifiée par la France en 1997 et entrée officiellement en vigueur en 1998.

Concernant tout risque consécutif au rejet de déchets en mer, la convention requiert l'application du principe de précaution, du principe du pollueur payeur, et de choisir en tout état de cause les meilleures techniques et pratiques environnementales disponibles.

61

#### CONVENTION SUR LA SÛRETÉ NUCLÉAIRE (1994)

Les objectifs de la convention sont les suivants :

- d'atteindre et maintenir un haut niveau de sûreté nucléaire dans le monde entier grâce à l'amélioration des mesures nationales et de coopération internationale, et notamment, s'il y a lieu, de coopération technique en matière de sûreté ;
- d'établir et maintenir, dans les installations nucléaires, des défenses efficaces contre les risques radiologiques potentiels afin de protéger les individus, la société et l'environnement contre les effets nocifs des rayonnements ionisants émis par ces installations ;
- de prévenir les accidents ayant des conséquences radiologiques et atténuer ces conséquences au cas où de tels accidents se produiraient.

Adoptée en 1994 par l'AIEA, la convention a été approuvée par la France en 1995. Depuis 2005, tous les pays exploitant des réacteurs électronucléaires l'ont ratifiée.

## DIRECTIVE CE/97/11 (1997)

Cette directive du 3 mars 1997 modifie la directive 85/337/CEE concernant l'évaluation des incidences de certains projets publics et privés sur l'environnement. La directive est la transcription en droit européen de la convention d'Espoo. Elle impose que "Les États membres prennent les dispositions nécessaires pour que, avant l'octroi de l'autorisation, les projets susceptibles d'avoir des incidences notables sur l'environnement, notamment en raison de leur nature, de leurs dimensions ou de leur localisation, soient soumis à une procédure de demande d'autorisation et à une évaluation en ce qui concerne leurs incidences."

## CONVENTION COMMUNE SUR LA SÛRETÉ DE LA GESTION DU COMBUSTIBLE USÉ ET DES DÉCHETS RADIOACTIFS (1997)

La convention, négociée sous l'égide de l'AIEA a pour objet :

- d'atteindre et maintenir un niveau élevé de sûreté partout dans le monde en matière de gestion du combustible usé et des déchets radioactifs, par le renforcement des mesures nationales et de la coopération internationale ;
- d'établir et maintenir, à tous les niveaux de la gestion du combustible usé et des déchets radioactifs, des défenses efficaces contre les dangers potentiels, afin que les individus, la société et l'environnement soient protégés des effets néfastes des rayonnements ionisants.

À ce jour, 42 Etats ont ratifié la Convention commune, dont la France en 2001.

## CONVENTION D'ÅAARHUS (1998)

62

La convention d'Åaarhus règle la participation du public aux processus décisionnels et l'accès à la justice en matière d'environnement. Elle est entrée en vigueur en 2001 et a été ratifiée par la France en 2002. Le droit d'accès à l'information s'exerce auprès de toutes les autorités et opérateurs publics. La convention stipule également que la participation du public aux processus décisionnels doit pouvoir s'exercer lorsque toutes les options et solutions sont encore possibles. Les résultats de la participation doivent être dûment pris en considération. Enfin, l'accès à la justice doit prévoir des recours suffisants et sans coûts prohibitifs.

## DIRECTIVE DU CONSEIL DE L'UNION EUROPÉENNE SUR LA GESTION DU COMBUSTIBLE USÉ ET DES DÉCHETS RADIOACTIFS (2011/70/EURATOM)

Le 19 juillet 2011, le Conseil a adopté la directive relative à la gestion du combustible usé et des déchets radioactifs. Afin d'améliorer de manière continue la sûreté de la gestion des déchets radioactifs dans l'Union Européenne, la directive demande :

- de mettre en place, par chaque État membre, un plan national de gestion du combustible usé et des déchets radioactifs accessible au public et devant comprendre un inventaire des dispositions de financement ou un cadre réglementaire ;
- de mettre en œuvre des politiques de gestion des déchets qui devront se faire de manière transparente et associer le public, notamment à l'occasion des décisions d'implantation d'un stockage ;
- de renforcer l'usage de revue par les pairs.

Les États membres ont l'obligation de soumettre le premier rapport sur la mise en œuvre de leur programme national respectif en 2015

La directive vise à établir un cadre juridique concernant la gestion du combustible usé et des déchets radioactifs qui résultent d'activités civiles, depuis la production jusqu'au stockage définitif, qui résultent d'activités civiles. Cette directive indique que le stockage géologique est la solution de référence pour la gestion des déchets de haute activité à vie longue.

Les États membres sont responsables en dernier ressort de la gestion du combustible usé et des déchets radioactifs. Ils doivent établir, mettre en œuvre et maintenir à jour un programme national pour la gestion du combustible usé et des déchets radioactifs couvrant toutes les étapes de la gestion, depuis la production jusqu'au stockage définitif. Ces programmes nationaux doivent être réexaminés et mis à jour régulièrement. Ils sont chargés de mettre en place des politiques nationales qui :

- maintiennent à un niveau le plus bas possible la production de déchets radioactifs ;
- assurent l'interdépendance des différentes étapes de la production et de la gestion du combustible usé et des déchets radioactifs ;
- gèrent de manière sûre le combustible usé et les déchets radioactifs, y compris sur le long terme ;
- mettent en œuvre les mesures adéquates selon une approche graduée ;
- régissent toutes les étapes de la gestion du combustible usé et des déchets radioactifs.

Les États ont le devoir de stocker définitivement leurs déchets sur leur propre territoire, sauf s'ils ont conclu des accords avec d'autres États membres leur permettant d'utiliser les installations de stockage de ces derniers. Cependant, la responsabilité continue à incomber à l'État d'origine. Ils doivent mettre en place un cadre national législatif, réglementaire et organisationnel ; ils instituent et maintiennent une autorité compétente chargée de la gestion du combustible usé et des déchets radioactifs.

Une démonstration de sûreté doit être élaborée en cas de demande d'autorisation relative à une installation ou à une activité. La démonstration de la sûreté couvre :

- la mise en place et l'exploitation d'une activité ;
- la création, l'exploitation et le démantèlement d'une installation ;
- la fermeture d'une installation de stockage ;
- la phase postérieure à la fermeture d'une installation de stockage.

Le texte de la directive étant sujet à interprétation, ENEF (European Nuclear Energy Forum) a indiqué ce qui, selon lui, doit être compris par "programmes nationaux". ENSREG (European Nuclear Safety Regulators Group) a publié des instructions concernant les rapports à faire. L'AIEA, AEN et WANO (World Association of Nuclear Operators) feront de même pour d'autres articles de la directive comme ceux concernant la peer review.



## Annexe VII

### LABORATOIRE DE RECHERCHE OU SITE DE STOCKAGES SOUTERRAINS

#### ALLEMAGNE

De 1967 à 1978, l'ancienne mine de sel d'Asse a reçu des déchets FAVC et MAVC dans le cadre d'un projet de stockage. Par la suite, la mine a été utilisée comme laboratoire de recherche souterrain, principalement pour l'étude des effets thermiques sur le sel entourant des conteneurs chauffés simulant des déchets HAVL.

Ce site de stockage connaît actuellement des difficultés liées à des venues de saumure (environ 12 m<sup>3</sup> par jour). Un amendement à la loi qui, entre autres, régit la gestion des déchets (AtG – Atomgesetz) dispose que le site de Asse doit être assaini et déclassé au plus vite. Cette opération est considérée comme risquée et difficile au niveau technique.

L'ancienne mine de sel de Morsleben (anciennement en RDA) a accueilli les premiers déchets radioactifs en 1971. En 1981 une licence provisoire pour le stockage a été obtenue, licence qui est devenue définitive en 1986. La mine a continué d'accepter des colis de déchets jusqu'en 1998. Elle connaît de graves problèmes de stabilité qui ont conduit à y injecter plus de 4 000 000 m<sup>3</sup> de matériaux de remblai.

Le stockage définitif des déchets de haute activité (exothermiques) était prévu à Gorleben dans un dôme salin à une profondeur de 800 m. Le site de Gorleben est étudié depuis trente ans pour la possibilité d'y stocker des déchets de toute catégorie ainsi que du combustible usé. Le laboratoire à - 840 m a été opérationnel entre 1998 et 2000, date à laquelle un moratoire politique a interrompu les E&R. Malgré les résultats satisfaisants des forages en profondeur, le Gouvernement de remplacement, avec les consentements des Länder, une évaluation de sites alternatifs. En effet, suite à la décision de sortie du nucléaire et aux difficultés principalement politiques quant au choix d'un site de stockage, le Gouvernement a consulté les Länder et, en 2013, a promulgué une nouvelle loi concernant la gestion des déchets nucléaires et le choix de sites de stockage. La loi, laquelle est une loi fédérale, sera mise en application par les Länder sous les auspices du gouvernement fédéral. Elle prévoit une étude de toutes les régions qui disposeraient d'une roche hôte adaptée: sel, argile ou roche cristalline. Le site de Gorleben n'est pas exclu a priori mais sera évalué en parallèle aux autres régions potentielles. Avant tout processus de sélection de site, le Gouvernement chargera une commission pluridisciplinaire d'étudier les questions du stockage, y compris la pertinence d'un stockage géologique. Les conclusions seront transcrives sous forme d'une loi soumise au parlement. Un site serait choisi en 2031, avec le début de la construction en 2040. Les producteurs de déchets devront payer les études et l'exploration de nouveaux sites, ce qu'ils contestent étant donné que l'étude du site de Gorleben n'a pas été officiellement abandonnée.

Dans l'attente de solutions acceptées par les autorités politiques et de sûreté, les déchets de haute activité sont entreposés sur plusieurs sites (les sites des réacteurs inclus), répartis dans le pays. Les verres issus du retraitement sont entreposés en surface à Gorleben.

Le stockage définitif des déchets de moyenne activité à vie longue (non exothermiques) est prévu dans la mine de Konrad (ancienne mine de fer) à une profondeur de 800 à 1 300 m en-dessous d'une très épaisse couche d'argile. En 2002, le Gouvernement allemand y a autorisé le stockage de déchets FAVL et MAVL. Suite à des actions judiciaires, l'exploitation du stockage a été retardée. Le feu vert définitif pour l'exploitation a été obtenu en 2008. Après la résolution des désaccords politiques et actions en justice, les travaux continuent afin que le site soit opérationnel pour accueillir les déchets en 2019.

## BELGIQUE

La Belgique dispose depuis 1982 du laboratoire Hades à -225 m, situé dans une couche d'argile en-dessous du Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire de Mol (SCK•CEN); le laboratoire est exploité par le GIE Euridice. Le laboratoire a actuellement une longueur de plus de 200 m et comporte des dizaines d'expériences. Les recherches et expériences dont certaines durent depuis trente ans, ont trait principalement aux techniques de construction, à la corrosion, à la migration des radionucléides, au comportement des déchets et à l'instrumentation. La plupart des projets de recherche sont effectués dans un cadre international. L'Andra y participe régulièrement.

Une expérience thermo-hydro-mécanique et chimique de grande ampleur, Praclay, y est installée. Elle simule le champ de température autour d'une galerie d'enfouissement de déchets de haute activité. A cette fin, une galerie dont les dimensions correspondent au concept de stockage belge sera chauffée pendant 10 ans à 80 °C sur une longueur de 30 m. Dans le cadre du projet Forge, un dispositif expérimental de 40 cm de diamètre y est installé pour étudier l'effet des contraintes in situ sur l'écoulement des gaz. Cette expérience, ainsi que d'autres, est complétée par un important programme de recherches en laboratoire de surface, associant des modélisations.

Depuis plus de dix ans, deux expériences sont en cours dans le cadre du programme Coralus visant à étudier l'influence de différentes conditions aux limites (chimie, température et radiation) sur la lixiviation et migration des actinides incorporés dans le verre nucléaire. Dans ces expériences, des plaquettes de verre avec des concentrations représentatives en isotopes d'uranium, de plutonium, d'américium et de neptunium (ordre de grandeur :  $10^{10-11}$  Bq/g), préparées par le CEA, sont mises en contact avec différents matériaux poreux. Le champ de radiation gamma est simulé par des sources de cobalt 60 (ordre de grandeur :  $10^{13}$  Bq). Le laboratoire Hades est actuellement le seul qui dispose d'une licence pour travailler à de tels niveaux d'activité.

---

66

L'Ondraf, organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies, a finalisé son "Plan Déchets". L'organisme a remis le rapport sur les incidences environnementales, le rapport de la conférence citoyenne et les commentaires reçus lors des consultations sociétales et légales. Avec ce Plan Déchets, l'Ondraf fournit au gouvernement les éléments nécessaires pour lui permettre de prendre, en connaissance de cause, une décision de principe, autrement dit une décision de politique générale en matière de gestion à long terme des déchets, y compris les combustibles irradiés déclarés comme déchets. La solution de référence proposée par l'Ondraf est la mise en dépôt géologique dans une argile peu indurée (soit, pour la Belgique, l'argile de Boom ou les argiles Yprésiennes).

## CANADA

Le Canada a disposé d'un laboratoire de recherches souterrain situé à proximité des laboratoires de Pinawa-Whitehell (Manitoba). Il avait été créé en 1982 pour étudier la faisabilité de l'évacuation sûre des déchets de combustible nucléaire dans une roche granitique. Le laboratoire n'est plus opérationnel ; il en est aux premières étapes de son déclassement.

La société de gestion des déchets nucléaires (SGDN-NWMO) a entrepris un dialogue avec les organisations et les personnes intéressées en vue de cerner les principes d'un processus équitable pour trouver une collectivité favorable à l'accueil des installations de gestion du combustible nucléaire irradié. Le gouvernement du Canada a approuvé cette approche. NWMO a indiqué que le site de stockage se situerait probablement dans les provinces de l'Ontario, Québec, Nouveau Brunswick ou Saskatchewan. A ce jour, 21 municipalités sont volontaires pour collaborer au choix d'un site sur leur territoire. Le site serait opérationnel en 2035.

Le projet d'un stockage de déchets FAVC et MAVC en milieu calcaire à grande profondeur (680 m) est en cours sur la presqu'île de Bruce (Tiverton, municipalité de Kincardine, Ontario). La procédure de demande d'autorisation est en cours ; la demande d'exploitation serait déposée en 2015.

## CHINE

Le projet chinois de stockage géologique implique la China Atomic Energy Agency (CAEA) et la China National Nuclear Corporation (CNNC) avec quatre de ses filiales : le Beijing Research Institute of Uranium Geology (BRIUG), le China Institute of Atomic Energy (CIAE), le China Institute for Radiation Protection (CIRP) et la China Nuclear Power Engineering Company (CNPE). Le BRIUG est en charge de la recherche liée au stockage de déchets de haute activité, y compris la recherche de site.

Trois sites potentiels de stockage ont été définis. La roche "hôte" est le granite. Le site actuellement étudié, sans que le choix du site de stockage futur ne soit décidé, est celui de Beishan dans le désert de Gobi. Les études préalables à l'implantation d'un laboratoire souterrain sont en cours, le début de la construction est prévu en 2016 et l'ouverture en 2020. Le site de stockage devrait voir le jour avant 2050.

## ÉTATS-UNIS

Pendant plus de deux décennies, Yucca Mountain au Nevada a été le site principal étudié pour le stockage des déchets HAVL. En 2002, le "Yucca Mountain Development Act" était approuvé par le Congrès américain et signé par le président Bush. Ainsi, Yucca Mountain devenait le site officiellement proposé comme site de stockage. En juin 2008, le Département de l'Energie (US-DOE) a soumis une demande de licence pour le site aux autorités compétentes (Nuclear Regulatory Commission, NRC). Suite à la réduction drastique du budget alloué au projet sous le Président Obama - ce qui *de facto* a ramené le problème des déchets à son point de départ – la NRC n'a pas revu la demande de licence et l'Administration américaine a créé une commission de haut niveau, la "Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future" (BRC), afin de proposer des alternatives au projet. La commission a publié une liste de recommandations au Gouvernement afin de proposer des alternatives au projet Yucca Mountain au Nevada. En voici quelques-unes :

67

- Le stockage géologique profond est affirmé comme une composante essentielle du système de gestion des déchets de haute activité à vie longue ;
- La recherche de sites doit reposer sur la recherche d'un consensus entre parties prenantes ;
- Une nouvelle organisation, exclusivement dédiée à la mise en œuvre du programme de gestion des déchets, doit être créée et avoir accès aux fonds récoltés à cette fin ;
- Il faut faire preuve de diligence pour développer une ou plusieurs installations d'entreposage et de stockage géologique.

L'assainissement de 22 sites d'entreposage de déchets transuraniens d'origine militaire, répartis sur l'ensemble du territoire américain, a permis depuis 1999, sans incidents, de stocker 83 000 m<sup>3</sup> au Waste Isolation Pilot Plant (WIPP). Le WIPP est situé dans le désert du Chihuahua au Nouveau Mexique. Les déchets y sont stockés à une profondeur de 650 m dans une couche de sel d'une épaisseur moyenne de 1000 m et âgée de 250 millions d'années. Le Département de l'Energie (DOE) étudie la possibilité d'y stocker également des déchets militaires de haute activité.

La Cour d'Appel des Etats-Unis a jugé que la NRC a agi illégalement en abandonnant la revue de la demande de licence par le DOE. La NRC est par conséquent obligée de traiter la demande de licence. Les producteurs ont en outre avancé le fait qu'ils avaient déjà contribué de l'ordre de 35 milliards de dollars US pour la gestion des combustibles usés.

Suite aux conclusions de la "Blue Ribbon Commission", l'administration a publié un document intitulé "Strategy for the Management and Disposal of Used Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste". Ce document décrit le cadre pour arriver à une solution durable et intégrée pour le transport, l'entreposage et le stockage de combustible usé et de déchets hautement actifs résultant de la production électrique, mais également des activités liées à la défense, la sécurité nationale et les autres activités. Le document est la réponse au rapport BRC, dont il a fait siens les grands principes.

L'administration espère que le Congrès autorisera un plan sur dix ans qui prévoit un centre pilote d'entreposage en 2021, des avancées vers une installation d'entreposage plus grande vers 2025 et un centre de stockage vers 2048.

Le budget 2013 prévu pour les R&D concernant le stockage géologique est de 60 millions de dollars US.

## **FINLANDE**

Posiva Oy, qui gère les déchets radioactifs finlandais, a entrepris depuis 2003 les travaux de construction d'un laboratoire de recherche dans le granite à 400 m de profondeur. Le site choisi est celui d'Onkalo à Olkiluoto où un EPR est en construction. La demande de construction du stockage et de l'usine d'encapsulation a été introduite en décembre 2012 sur le même site. La construction des tunnels d'accès au laboratoire, et donc également au centre de stockage futur, est terminée. Le site accueillera les 9000 tonnes de combustibles usés des réacteurs actuellement en service, ainsi que ceux de deux réacteurs à construire dans le futur. L'exploitation, suivant le concept suédois KBS3, est prévue à partir de 2022.

## **FRANCE**

Pour mémoire : les E&R avancent à un rythme soutenu dans le laboratoire de Meuse/Haute-Marne.

68

## **HONGRIE**

Le site de Bataapati est en construction depuis 2008 dans des cavernes en granite entourées de couches d'argile à une profondeur de 200 à 250 m. Il est destiné à accueillir la totalité des déchets de faible et moyenne activité de la centrale de Paks.

## **INDE**

Pendant 8 ans, l'Inde a étudié expérimentalement, dans une ancienne mine d'or à 1000 m de profondeur, la réponse de la roche-hôte à une charge thermique. D'autres expériences sont prévues dans des mines abandonnées. Actuellement, des sites potentiels ont été identifiés dans le granite pour y choisir une zone de 4 km<sup>2</sup>. Un site opérationnel est prévu dans 30 à 40 ans.

## **JAPON**

Le tsunami, suivi par l'accident de Fukushima a mis en évidence les problèmes de traitement et de gestion de grandes quantités de déchets suite aux activités de remédiation et de nettoyage, aussi bien aux environs que sur les sites nucléaires contaminés.

Deux laboratoires de recherche sont actuellement en construction, un à Mizunami dans une roche cristalline et un à Horonobe dans une roche sédimentaire. Au laboratoire de Mizunami, une profondeur de 500 m sur les 1 000 m prévus a été atteinte. Les études concernant l'hydrologie et la mécanique des roches y continuent. Au laboratoire de Horonobe, les tests hydrologiques et les mesures hydrochimiques continuent. L'EDZ y est étudiée autour d'une galerie à une profondeur de 140 m. Une profondeur de 350 m sur 500 est atteinte.

L'organisation japonaise pour la gestion des déchets radioactifs, Numo, a la responsabilité de mettre au point un site de stockage pour les déchets HAVL. Un site sera sélectionné en trois phases : investigation préliminaire ; zones d'investigation détaillées ; zone de construction. L'exploitation débuterait en 2035. En 2002, Numo a fait un appel à candidatures, mais jusqu'à présent, cet appel est resté sans succès. Si des propositions sont reçues, Numo fera une étude bibliographique sur l'activité volcanique, les failles et autres caractéristiques géologiques. Entre temps, Numo continue à faire appel à des municipalités, susceptibles d'être volontaires pour ces études préliminaires. Les projets rencontrent une forte opposition populaire.

## PAYS-BAS

Les Pays-Bas ont fait le choix d'entreposer les déchets radioactifs pendant un siècle. Cependant, un programme de recherche, Opera, doit étudier les conditions qui permettront, après cette période, de stocker les déchets de façon sûre dans de l'argile ou du sel. Les recherches concerneront non seulement les aspects scientifiques et technologiques, mais également les aspects sociaux. Les Pays-Bas prônent également une solution régionale, commune à plusieurs pays, dont l'Italie, afin d'optimiser la gestion de différents déchets et d'en partager les coûts.

## ROYAUME UNI

La Nuclear Decommissioning Authority (NDA) a publié un rapport définissant un cadre pour l'identification et l'évaluation de sites de stockage potentiels intégrant la participation volontaire des communautés locales. Bien que deux localités du comté de West Cumbria, Allerdale et Copeland, aient confirmé qu'elles désirent continuer le processus d'évaluation d'un site de stockage sur leur territoire, le comté a décidé de se retirer du projet. Le district de Shepway (Kent - argile) a également décidé de retirer sa candidature. Actuellement, aucun site n'est étudié, et aucun calendrier n'est fixé. Le Gouvernement a lancé en septembre 2013 une consultation afin de solliciter des avis sur une nouvelle approche de travail avec des collectivités locales potentiellement intéressées. La nouvelle proposition prévoit un droit de veto des districts et une consultation des comtés.

## RUSSIE

La Douma russe a passé une loi sur la gestion des déchets radioactifs en 2011. La loi établit des limites pour les quantités destinées à l'entreposage, et pour sa durée. Elle définit également le conditionnement des déchets pour le stockage, le transfert des déchets à l'opérateur nouvellement créé (Norao), et les mécanismes de financement. Aucun site de stockage géologique n'est disponible actuellement, mais le massif granitique de Nizhnekansky près de Krasnoïarsk pourrait accueillir un laboratoire souterrain. La construction d'un site de stockage pourrait être décidée vers 2025. La première phase de l'installation prévoit d'accueillir 20.000 tonnes de déchets MAVL et HAVL, en assurant la récupérabilité.

## SUÈDE

En Suède, la gestion des déchets radioactifs est de la responsabilité de SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB).

SKB dispose depuis 1995 du laboratoire d'Äspö près de la ville d'Oskarshamn, creusé dans du granite à une profondeur de 460 m. Contrairement à l'approche finlandaise, le laboratoire ne fera pas partie du site de stockage définitif, mais sert à valider les concepts choisis. Les recherches y sont axées principalement sur les techniques de construction, la mise en place des conteneurs et de la bentonite dans leurs positions de stockage, sur l'hydrogéologie, la migration des radionucléides et la modélisation.

Le "Laboratoire de Bentonite" a été mis en service au printemps de 2007 ; il est situé en surface au dessus du laboratoire d'Äspö. Ce laboratoire examine si la bentonite - qui forme un tampon autour des conteneurs et sert de matériau de remplissage pour les tunnels - remplit son rôle sous différents régimes hydrogéologiques. Il assure le complément aux activités souterraines et permet des essais à grande échelle de diverses méthodes d'opération dans des conditions variées. Des machines et des robots y sont également développés et testés.

Le "Laboratoire d'encapsulage des conteneurs" d'Oskarshamn est le centre de SKB pour le développement des conteneurs. SKB y développe la technologie pour le soudage du couvercle et du fond des conteneurs destinés aux combustibles nucléaires usés. Des méthodes sont également mises au point pour l'inspection des soudures et des matières. Un autre domaine de recherche important consiste à vérifier que les machines et les équipements qui seront utilisés dans l'usine d'encapsulage, fonctionnent de manière adéquate. Ce laboratoire servira aussi de centre de formation pour le personnel futur de l'usine correspondante.

SKB a déposé une demande d'autorisation pour la construction de l'installation de stockage profond à Forsmark et pour l'usine d'encapsulation, suivant le concept dit KBS-3, le tout dans le cadre du code environnemental suédois et de la loi sur les activités nucléaires. L'Agence de l'énergie nucléaire de l'OCDE a évalué le dossier de demande d'autorisation de stockage et a conclu qu'il est suffisamment étayé pour permettre aux autorités de prendre une décision définitive. Ce processus durera trois ans. L'installation de stockage est prévue pour être opérationnelle vers 2025.

---

70

## SUISSE

La Suisse a deux laboratoires de recherche : le laboratoire de Grimsel est situé dans le granite d'un flanc de la montagne Aar. Le laboratoire du Mont Terri est situé le long d'un tunnel autoroutier dans une couche d'argile à opalines. D'une longueur totale de plusieurs centaines de mètres, il comporte des dizaines d'expériences internationales sur les caractéristiques géologiques, hydrogéologiques, géochimiques et géotechniques de l'argile à opaline. Les expériences sont aussi bien méthodologiques que visant une qualification de l'argile à opalines comme roche-hôte d'un stockage. L'Office fédéral de l'énergie (Ofen) a désigné six régions d'implantation potentielle d'un site de stockage pour les déchets FA et MA. Ils feront l'objet d'études approfondies : Südranden, Zürich nord-est, Nord des Lägern, Jura oriental, Piémont méridional et Wellenberg. Les études sont en cours et dureront quatre ans. Trois de ces régions (Zürcher Weinland, Nord des Lägern et Bözberg) feront également l'objet d'études pour le stockage des HA.

## Annexe VIII

### SOURCES D'IRRADIATION À SPECTRE RAPIDE

#### **ALLEMAGNE**

Le réacteur FRM II à Garching (2004 - ...), 20 MWt, permet d'irradier en spectre rapide ( $\pm 1,9$  MeV) avec une paire de convertisseurs d'uranium, positionnée dans un faisceau de neutrons thermiques.

#### **BELGIQUE**

Le réacteur de recherche BR2 (1963-2026?), 120 MWt, permet d'accueillir des petits (diamètre 1,5 à 3 cm x h=80 cm) comme des grands volumes (diamètre de 8 à 22 cm x h=80 cm) pour irradier des échantillons sous un haut flux en spectre rapide, simulant un sous-assemblage de combustible de réacteur RNR.

#### **CHINE**

Le réacteur de recherche CEFR de 65 MWt (20 MWe) à neutrons rapides refroidi au sodium a été mis en service en juillet 2010.

#### **FRANCE**

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

71

#### **INDE**

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

#### **JAPON**

Le réacteur Joyo semble définitivement arrêté et, suite à l'accident de Fukushima, le Gouvernement a décidé d'arrêter le projet Monju. Il est très peu probable que ces deux réacteurs redémarrent un jour.

#### **PAYS-BAS**

Le HFR (1961-2015) à Petten permet des irradiations limitées.

#### **RUSSIE**

Le Bor-60 (1969-2015) de 60 MWt est un réacteur de recherche à neutrons rapides refroidi au sodium.



## Annexe IX

### PRINCIPALES INITIATIVES INTERNATIONALES SUR LES ADS

#### ALLEMAGNE

L'Institut de Technologie de Karlsruhe (KIT), l'Institut de Physique Appliquée de l'Université de Frankfort (IAP-FU) et le Helmholtz Zentrum Dresden Rossendorf (HZDR) participent aux projets belges MYRRHA et Guinevere. Le centre de recherche de Jülich (FZJ) propose un concept ADS refroidi au gaz (Agate).

#### BELARUS

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

#### BELGIQUE

En 2010, le SCK•CEN a inauguré Guinevere, réacteur d'essai à très faible puissance pour soutenir le projet Myrrha. Pour sa réalisation, le SCK•CEN a travaillé en étroite collaboration avec le CNRS, qui a construit l'accélérateur, et le CEA qui a mis à disposition le combustible. Guinevere, piloté par accélérateur, peut fonctionner aussi bien en mode critique qu'en mode sous-critique.

Myrrha sera un ADS sous-critique de 100 MW à spectre de neutrons rapides, refroidi au plomb-bismuth qui démontrera la faisabilité du couplage "accélérateur - source de spallation - réacteur sous-critique" dans une installation préindustrielle. Le réacteur est conçu pour pouvoir fonctionner également en mode critique. Il permettra aux équipes travaillant sur les problématiques de réacteurs à neutrons rapides (SFR, LFR, GFR) de disposer d'une machine pour les tests de matériaux et de combustibles. Myrrha permettra également d'obtenir des données indispensables à la transmutation industrielle. Le projet est entré dans la phase de l'ingénierie détaillée d'avant-projet (le "FEED").

73

#### CHINE

L'Académie chinoise des sciences (CAS) a décidé de construire un ADS pour la recherche en transmutation. La feuille de route prévoit une installation test en 2017 ; un ADS de 80-100 MWt en 2022 et une installation de démonstration de 1 000 MWt en 2032.

#### CORÉE DU SUD

Un programme ambitieux de gestion des déchets nucléaires (transmutation des actinides mineurs par ADS et procédés de retraitement par pyrochimie) est développé à l'Institut Nutreck (Nuclear Transmutation Energy Research Center of Korea) et à l'Université nationale de Séoul (SNU). Kaeri évalue différentes voies pour changer la nature et réduire le volume des déchets à stocker.

## **ÉTATS-UNIS**

Depuis les années 90, divers projets de transmutation par ADS ont été proposés. L'arrêt du projet Yucca Mountain a redynamisé l'intérêt du Département de l'Énergie (DOE) et des laboratoires nationaux (LANL, ANL, Jefferson Lab, Fermi Lab ...) pour les ADS.

## **FRANCE**

Pour mémoire : le CNRS, Areva et CEA collaborent aux projets belges Guinevere et Myrrha.

## **INDE**

Le programme ADS, démarré en 2000, est destiné à accélérer la mise en place du cycle du thorium par la production d'uranium 233 fissile, à partir du thorium 232 non-fissile.

## **ITALIE**

Plusieurs centres de recherche (ENEA, INFN, CRS4, ...), universités (Cirten) et industries (Ansaldo Nucleare) participent aux projets européens concernant les ADS. Il est question en Italie de développer un ADS expérimental de faible puissance (100 à 200 kWt) à l'INFN de Legnaro.

## **JAPON**

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

## Annexe X

### STOCKAGE GÉOLOGIQUE PROFOND

**ARGONA**<sup>8</sup> Argona examine les questions de transparence et de concertation et dans quelles mesures elles sont en rapport l'une avec l'autre. Il évalue également l'articulation au système politique qui, en dernier ressort, prendra les décisions, par exemple celle de l'enfouissement final des déchets nucléaires. Le projet examine enfin le rôle des médiateurs pour associer le public à la question des déchets nucléaires.

**BELBAR**<sup>9</sup> Des évaluations récentes de la sûreté d'installations de stockage ont montré que la formation et la stabilité de colloïdes pourraient avoir un impact sur le comportement global du stockage. Le but principal du projet est d'augmenter les connaissances des processus qui contrôlent la genèse et la stabilité de colloïdes, ainsi que leur capacité de transport de radionucléides.

**BIOPROTA**<sup>10</sup> L'objectif de Bioprot, initié par l'Andra en 2002, est d'identifier des modèles de biosphère, de déterminer les protocoles d'acquisition de données de l'environnement de surface et d'analyser l'état des connaissances sur les processus et les paramètres spécifiques du transfert dans la biosphère de radionucléides prioritaires comme le chlore 36, le sélénium 79, le carbone 14, l'iode 129 etc...

**CARBOWASTE**<sup>11</sup> Les réacteurs à modérateur graphite sont représentatifs de la première génération de réacteurs en démantèlement. Le graphite irradié contient du carbone 14 et du chlore 36 en concentration variable. Ces deux radionucléides sont très mobiles et susceptibles d'être absorbés par la matière vivante. Le projet a pour but de développer des techniques optimales pour traiter ces déchets.

75

**CATCLAY**<sup>12</sup> Suite aux résultats du projet Funmig, CatClay devrait résoudre le problème de la migration des cations dans l'argile densément compactée. En effet, pour certains cations, les expériences ont montré un écart par rapport à la diffusion attendue. Une explication scientifique est essentielle pour les études de sécurité des concepts de stockage en argile.

**CIP**<sup>13</sup> Le programme CIP, suite de Cowam-2, a pour principal objectif de contribuer à la bonne gouvernance en matière de gestion des déchets radioactifs en Europe. Pour chaque pays (France, Roumanie, Slovénie, Espagne et Royaume-Uni) un groupe national traite les processus suivant lesquels les groupes d'intérêt sont associés aux prises de décisions en matière de gestion des déchets radioactifs.

**CROCK**<sup>14</sup> Le projet vise à développer une méthodologie pour diminuer les incertitudes dans les prédictions à long terme de la migration de radionucléides dans une roche cristalline. La variation des données actuelles quant aux données de rétention dans cette roche ne peut pas encore être liée aux propriétés ou mécanismes attachés au matériau. En conséquence, des valeurs très conservatrices sont utilisées dans les évaluations de sûreté. Le projet fait suite au projet Funmig et aux études pour la sélection du site suédois.

<sup>8</sup> Arenas for Risk Governance, 2006-2009, 6<sup>ème</sup> PCRD, 7 pays, 14 partenaires.

<sup>9</sup> Bentonite Erosion: effects on the Long term performance of the engineered Barrier and Radionuclide Transport, 2012-2016, 7<sup>ème</sup> PCRD, 7 pays, 14 partenaires.

<sup>10</sup> Key Issues in Biosphere Aspects of Assessment of the Long-term Impact of Contaminant Releases Associated with Radioactive Waste Management ; 2002-?, 15 pays, 18 partenaires, dont l'Andra et EDF.

<sup>11</sup> Treatment and disposal of irradiated graphite and other carbonaceous waste ; 2008-2012, 7<sup>ème</sup> PCRD, 16 pays, 28 partenaires dont l'Andra, le CEA, le CNRS, Areva, EDF, UCAR-SNC et l'Ecole Normale Supérieure.

<sup>12</sup> Processes of Cation Migration in Clay Rocks ; 2010-2013, 7<sup>ème</sup> PCRD, 5 pays, 7 partenaires dont le CEA (coordinateur), Andra, BRGM.

<sup>13</sup> COWAM In Practice ; 2007-2009, 6<sup>ème</sup> PCRD, 6 pays, 11 partenaires, dont l'IRSN ; le Syndicat de l'Enseignement de la productique, de la Mécanique et des Matériaux; le centre d'Étude sur l'Évaluation de la Protection dans le Domaine nucléaire, l'Institut Symlog et Mutadis Consultants.

<sup>14</sup> Crystalline Rock Retention Processes, 2011-2013, 7<sup>ème</sup> PCRD, 6 pays, 10 partenaires.

**DOPAS**<sup>15</sup> Le projet a pour but d'améliorer la faisabilité industrielle et la performance de bouchons et scellement à utiliser dans des installations de stockage situés dans les roches hôtes étudiés (argile, cristallin et sel). Cinq expériences seront installées. Elles serviront comme démonstration et leurs caractéristiques seront étudiées.

**EBSSYN**<sup>16</sup> EBSSYN est un projet commun entre la Commission européenne et l'Agence de l'Énergie Nucléaire, destiné à préparer un rapport de synthèse sur les systèmes de barrière et la sûreté des sites de stockage HAVL.

**EMRAS**<sup>17</sup> Le programme Emras, initié dans le cadre de l'AIEA, se concentre sur la modélisation en radioécologie, en particulier les conséquences du relâchement de radionucléides dans l'environnement.

**ERDO**<sup>18</sup> Suite au succès des projets Sapierr, un groupe de travail multinational a été nommé par les organismes gouvernementaux participants, afin d'étudier la possibilité de créer une association non-commerciale qui pourrait, d'ici 10 ou 15 ans, établir un ou plusieurs centres de stockage européen.

**ESDRED**<sup>19</sup> L'objectif du programme est de démontrer la faisabilité industrielle des développements et technologies nécessaires pour construire, exploiter et fermer un site géologique profond de stockage qui réponde aux exigences de sûreté à long terme. Le programme tient compte des différents concepts européens et inclut des activités d'enseignement et de formation.

**FEBEX II**<sup>20</sup> Dans le laboratoire souterrain de Grimsel, l'expérience Febex I simulait l'échauffement d'une barrière de bentonite et en mesurait les conséquences. Comme la plupart des capteurs sont encore opérationnels, Febex II poursuit la phase d'observation de l'expérience afin d'améliorer et de valider les données et les codes pour l'étude des processus géochimiques, la génération et le transport de gaz, la corrosion et la performance des instruments de mesure.

76

**FIRST-NUCLIDES**<sup>21</sup> Améliorer la compréhension des mécanismes du relâchement rapide de certains radionucléides du combustible stocké, irradié à haut taux de combustion, est le but du projet. L'IGD-TP a donné une haute priorité à ce sujet.

**FORGE**<sup>22</sup> L'objectif du projet qui associe expérimentation et modélisation, est d'améliorer la connaissance des processus de transfert de gaz dans les principaux matériaux présents dans les différents concepts de stockages de déchets radioactifs étudiés actuellement en Europe.

**FUNMIG**<sup>23</sup> L'objectif central de Funmig est de comprendre et de modéliser les processus clés de la migration des radionucléides à travers les couches géologiques et la géosphère. Les roches-hôtes considérées sont l'argile, le granite et le sel.

---

<sup>15</sup> Full-Scale Demonstration Of Plugs And Seals ; 2012-2016, 8 pays, 14 partenaires dont l'Andra.

<sup>16</sup> A joint EC/NEA EBS project synthesis report ; 2008-2009, 7<sup>ème</sup> PCRD et AEN.

<sup>17</sup> Environmental Modelling for Radiation Safety ; 2003-2011, AIEA, 30 pays, 100 participants.

<sup>18</sup> European Repository Development Organisation, avec des représentants de l'Autriche, la Bulgarie, la République Tchèque, le Danemark, l'Estonie, l'Irlande, l'Italie, la Lettonie, les Pays-Bas, la Pologne, la Roumanie, la Slovaquie et la Slovénie.

<sup>19</sup> Engineering Studies and Demonstrations of Repository Designs ; 2004-2009, 6<sup>ème</sup> PCRD, 9 pays, 14 partenaires dont l'Andra.

<sup>20</sup> Full-scale High Level Waste Engineered Barriers, 1994-2012, 22 partenaires dont l'Andra, le BRGM et l'Institut National Polytechnique de Toulouse.

<sup>21</sup> Fast / Instant Release of Safety Relevant Radionuclides from Spent Nuclear Fuel, 2012-2014, 7<sup>ème</sup> PCRD, 7 pays, 9 partenaires, dont le CNRS.

<sup>22</sup> Fate of repository gases ; 2009-2013, 7<sup>ème</sup> PCRD, 12 pays, 24 partenaires dont l'Andra, le CEA, l'IRSN, le CNRS, EDF et l'Ecole Centrale de Lille.

<sup>23</sup> Fundamental processes of radionuclide migration ; 2005-2008, 6<sup>ème</sup> PCRD, 15 pays, 53 partenaires dont l'Andra, le CEA, le BRGM, l'Université Joseph Fourier Grenoble 1, l'Université du Maine, l'Association pour la recherche et le développement des méthodes et processus industriels, Études-Recherches-Matériaux, l'École Nationale Supérieure de Chimie de Mulhouse, l'Alpine Institute for Environmental Dynamics et UJF-Filiale.

**IGD-TP<sup>24</sup>** La plate-forme technologique européenne IGD-TP sur le stockage géologique des déchets nucléaires est l'aboutissement de travaux commencés durant le 6<sup>ème</sup> Programme Cadre et poursuivis par les organisations de gestion des déchets radioactifs en Suède, en Finlande et en France, en collaboration avec le Ministère fédéral allemand de l'Economie et de la Technologie. Un document d'orientation décrit la mission, les objectifs, les prestations et l'organisation de la plate-forme. Il résume également les mesures techniques à mettre en œuvre au cours des 10-15 prochaines années pour mettre en œuvre le stockage géologique des déchets nucléaires par les États membres. IGD-TP a défini et mettra en œuvre un agenda stratégique de recherche qui permettra de coordonner les efforts nécessaires pour relever les défis scientifiques, technologiques et sociopolitiques relatifs au stockage géologique des déchets nucléaires tout en respectant les plus hauts niveaux de sécurité et de protection de l'environnement.

**INSOTEC<sup>25</sup>** Insotec identifiera aussi bien les défis socio-politiques les plus importants posés par l'implantation d'un stockage géologique que leurs interactions avec les défis technologiques, comme adapter un concept de stockage générique à la réalité sociale et naturelle d'un site choisi.

**IPPA<sup>26</sup>** Ippa se concentre sur la création, principalement en Europe centrale et de l'est, de structures qui permettent à différentes personnes ou différents groupes concernés d'améliorer leur compréhension de la problématique du stockage géologique et de discuter ensemble de leurs points de vue.

**LUCOEX<sup>27</sup>** L'objectif du projet est de réaliser des essais in situ de démonstration de différents concepts pour les stockages de déchets HA : le concept horizontal au Mont-Terri et à Bure; le concept horizontal dans le granite à Aspö et le concept vertical dans le granite à Onkalo. L'Andra fera également un essai de chauffe d'un alvéole HA.

**MICADO<sup>28</sup>** Ce programme du 6<sup>ème</sup> PCRD vise à évaluer les incertitudes dans la modélisation des mécanismes de dissolution du combustible nucléaire usé dans un site de stockage.

**MODERN<sup>29</sup>** Le projet vise à fournir une référence décrivant les objectifs techniques, moyens et méthodes, permettant de concevoir un système de monitoring. Le projet désire également contribuer à la compréhension et la confiance des parties prenantes, et ce pendant les différentes phases de stockage, en respectant les besoins et contraintes spécifiques à chaque pays.

**NEA-MESA<sup>30</sup>** Dans la plupart des pays, le stockage de déchets radioactifs dans des ouvrages en couche géologique est la solution de référence. La prise de décision et l'acceptation sociale les concernant, repose sur le degré de confiance dans les évaluations de sûreté. Le projet a examiné et documenté ces méthodes d'évaluation, en a déduit les similarités et les différences, et a identifié du travail encore à accomplir.

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

<sup>25</sup> International Socio-Technical Challenges for implementing geological disposal, 2011-2014, 7<sup>ème</sup> PCRD, 11 pays, 14 partenaires dont le CNRS.

<sup>26</sup> Implementing Public Participation Approaches in Radioactive Waste Disposal, 2011-2013, 7<sup>ème</sup> PCRD, 12 pays, 17 partenaires, dont Mutadis consultants.

<sup>27</sup> Large Underground Concept Experiments, 2011-2014, 7<sup>ème</sup> PCRD, 4 pays et partenaires, dont l'Andra (coordinateur), Nagra, Posiva et SKB.

<sup>28</sup> Model uncertainty for the mechanism of dissolution of spent fuel in a nuclear waste repository; 2006-2009, 6<sup>ème</sup> PCRD, 6 pays, 19 partenaires dont l'Andra, le CEA, l'IRSN et l'Association pour la recherche et le développement des méthodes et processus industriels de l'Ecole Nationale Supérieure des Techniques Industrielles des Mines de Nantes.

<sup>29</sup> Monitoring Developments for safe Repository operation and staged closure, 2009-2012, 7<sup>ème</sup> PCRD, 12 pays, 17 partenaires, dont l'Andra, coordinateur.

<sup>30</sup> Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, 2008-2012, Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) de l'OCDE.

**NWD<sup>31</sup>** L'action a pour but de fournir aussi bien des données expérimentales que des résultats de calculs aidant à développer une compréhension globale du comportement à long terme des déchets à haute activité issus des cycles de combustible actuels et futurs.

**OBRA<sup>32</sup>** Le programme Obra vise à mettre en place des mécanismes par lesquels les groupes d'intérêt pourront avoir accès aux connaissances générées par les programmes européens de recherche sur la gestion des déchets et combustibles usés, tant sur les aspects scientifiques que sur ceux des sciences sociales.

**PAMINA<sup>33</sup>** Le but du projet est d'améliorer et d'harmoniser les méthodes et outils d'évaluation utilisés pour démontrer la sûreté des différents concepts de stockage HAVL et de combustibles usés ; cela, dans les différentes roches-hôtes considérées en Europe.

**PEBS<sup>34</sup>** En développant une approche globale par des expériences, des modèles et des études d'impact sur les fonctions de sécurité à long-terme, PEBS permettra d'évaluer les performances de barrières ouvrageées. Les expériences et les modèles couvriront le spectre complet des conditions, du début (haute température, resaturation de la barrière) jusqu'à l'équilibre thermique et la resaturation avec la roche "hôte".

**RADIOECOLOGY AND WASTE TASK GROUP<sup>35</sup>** L'Andra et l'Union Internationale de Radioécologie ont lancé en 2002 un groupe de travail international afin de promouvoir la collaboration scientifique entre radioécologues dans le domaine des déchets radioactifs.

**RECOZY<sup>36</sup>** L'objectif est la compréhension des phénomènes redox qui gouvernent la fixation et le relâchement de radionucléides lors du stockage souterrain de combustible usé. Le but est de proposer des outils pour l'évaluation des performances des différents modes de stockage et du dossier de sécurité.

78

**REDUPP<sup>37</sup>** Le projet vise à réduire les incertitudes dans les mesures de vitesse de dissolution des combustibles usés ; cela afin d'augmenter la crédibilité des études de sûreté. Un deuxième objectif est d'organiser une formation pour les jeunes chercheurs qui devront assurer l'avenir de la recherche concernant le stockage géologique.

**SAPIERR II<sup>38</sup>** Dans la période 2003 à 2005, le projet Sapierr a été consacré à des études-pilote sur la faisabilité et les modalités régionales partagées d'installation de stockage, à l'usage des pays européens. L'objectif de la 2<sup>ème</sup> phase du programme, Sapierr II, est de développer des stratégies de mise en œuvre éventuelle ainsi que des structures organisationnelles.

**SITEX<sup>39</sup>** Le projet identifie les approches qui doivent être développées par voie de la création d'un réseau durable européen afin d'améliorer la compréhension, l'harmonisation et la collaboration entre organismes de régulation, organisations techniques de sûreté et agences de gestion des déchets.

---

<sup>31</sup> Nuclear Waste Disposal action, Euratom CCR, 11 pays, 21 partenaires, dont le CNRS et le CEA.

<sup>32</sup> European observatory for long-term governance on radioactive waste management ; 2006-2008, 6<sup>ème</sup> PCRD, 7 pays, 10 partenaires.

<sup>33</sup> Performance assessment methodologies in application to guide the development of the safety case ; 2006-2009, 6<sup>ème</sup> PCRD, 10 pays, 25 partenaires dont l'Andra, le CEA, l'Université Claude Bernard Lyon 1 et l'IRSN

<sup>34</sup> Long-term Performance of the Engineered Barrier System, 2010-2014, 7<sup>ème</sup> PCRD, 8 pays, 17 partenaires dont l'Andra.

<sup>35</sup> <http://www.iur-uir.org/en/task-groups/id-5-radioecology-and-waste>

<sup>36</sup> Redox phenomena controlling systems, 2008-2012, 7<sup>ème</sup> PCRD, 15 pays, 32 partenaires dont l'Andra, le CEA, le CNRS, le BRGM et l'Association pour la Recherche et le Développement des Méthodes et Processus Industriels d'Armines.

<sup>37</sup> Reducing Uncertainty in Performance Prediction, 2011-2014, 7<sup>ème</sup> PCRD, 3 pays, 5 partenaires.

<sup>38</sup> Strategy action plan for implementation of European regional repository - stage 2 ; 2006-2009, 6<sup>ème</sup> PCRD, 8 pays et 8 partenaires.

<sup>39</sup> Sustainable network of independent technical expertise for radioactive waste disposal, 2011-2014, 7<sup>ème</sup> PCRD, 10 pays, 15 partenaires, dont l'IRSN (coordinateur), le European nuclear safety training and tutoring institute, Mutadis consultants et le Ministère de l'environnement, du développement durable, des transports et du logement.

**SKIN<sup>40</sup>** L'étude des processus impliquant des mouvements très lents d'eau dans des couches géologiques doit permettre le développement de méthodes d'évaluation robustes et à long terme.

**SORPTION II<sup>41</sup>** Ce projet de l'AEN a comme objectif de démontrer la possibilité d'utiliser diverses techniques de modélisation thermodynamique dans le cadre des évaluations de la sûreté des stockages de déchets radioactifs en formation géologique. Pour permettre l'évaluation des limites et des avantages respectifs de différents modèles de sorption thermodynamique, le projet a pris la forme d'un exercice de modélisation comparatif appliqué à une série de jeux de données sur la sorption des radionucléides par des matériaux.

**THERESA<sup>42</sup>** Le programme Theresa vise à développer une méthodologie d'évaluation des modèles mathématiques et des codes utilisés pour l'évaluation des performances d'un stockage. Ces modèles et codes sont utilisés pour la conception, la construction, le fonctionnement, l'analyse de performance et de sûreté ainsi que le suivi après la fermeture de sites géologiques d'enfouissement de déchets nucléaires. Cette méthodologie s'appuie sur une représentation microscopique des mécanismes et des processus thermo-hydro-mécaniques et chimiques dans les systèmes et les matériaux géologiques.

**TIMODAZ<sup>43</sup>** Le projet vise à étudier l'impact thermique sur la zone perturbée de l'argile "hôte" autour d'un stockage de déchets radioactifs. A cette fin, trois argiles sont étudiées : l'argile de Boom du site de Mol, l'argile à opalines du Mont-Terri et l'argile du Callovo-Oxfordien de Bure.

<sup>40</sup> Slow processes in close-to-equilibrium conditions for radionuclides in water/solid systems of relevance to nuclear waste management, 2011-2013, 7<sup>ème</sup> PCRD, 7 pays, 10 partenaires, dont ARMINESUBATECH (coordinateur).

<sup>41</sup> Projet Sorption II, 2000- ?, AEN, 11 pays, 20 partenaires dont l'Andra.

<sup>42</sup> Coupled thermal-hydrological-mechanical-chemical processes for application in repository safety assessment; 2007-2009, 6<sup>ème</sup> PCRD, 7 pays, 16 partenaires dont l'IRSN.

<sup>43</sup> Thermal Impact on the Damaged Zone Around a Radioactive Waste Disposal in Clay Host Rocks ; 2006-2010, 7<sup>ème</sup> PCRD, 8 pays, 15 partenaires, dont l'Université Joseph Fourier Grenoble 1, l'École Nationale des Ponts et Chaussées et ITASCA Consultants.



## Annexe XI

### NOUVELLES FILIÈRES POUR LA SÉPARATION-TRANSMUTATION

**ACSEPT<sup>44</sup>** Le projet succède à Europart et Pyropep. Son objectif est de sélectionner et d'optimiser les procédés de séparation-recyclage des actinides, compatibles avec les options avancées du cycle du combustible. La faisabilité scientifique par des procédés hydrochimiques (extraction sélective et groupée d'actinide) et par des procédés pyrochimiques, à l'état d'évaluation préliminaire (électrolyse et extraction liquide-liquide), prenant en compte les critères et contraintes de l'industrie, doit y être démontrée.

**ACTINET-I3<sup>45</sup>** Le but du projet est de permettre à la communauté scientifique européenne de bénéficier des infrastructures de laboratoire pour la recherche concernant les actinides.

**ANFC<sup>46</sup>** Des cycles du combustible alternatifs basés sur la S&T seront étudiés et évalués. Des méthodes pour la récupération de radionucléides à longue période, l'optimisation de technologies pour la fabrication de combustibles innovants sur base de matrices inertes, et la caractérisation des propriétés du combustible avant et après irradiation y seront étudiées.

**ARCAS<sup>47</sup>** Une étude technico-économique de la performance des systèmes critiques et sous-critiques comme machines dédiées à la transmutation de déchets radioactifs sera effectuée dans une approche à doubles strates.

**ASGARD<sup>48</sup>** Des études transversales seront effectuées en synergie avec les programmes européens sur le combustible et les déchets comme Acsept ou Fairfuels. Ils approfondiront également la recherche concernant des concepts de réacteurs nouveaux comme Astrid et Myrrha. Asgard fournira un cadre de recherche pour le développement de techniques de dissolution, retraitement et fabrication d'une nouvelle génération de combustibles.

**ASTRID<sup>49</sup>** Pour mémoire, le prototype de réacteur rapide à caloporteur sodium, d'une puissance de 600 MWe, est prévu pour 2020. Astrid devrait être construit sur le site nucléaire de Marcoule.

**CANDIDE<sup>50</sup>** Dans le cadre de cette action, un réseau coordonne les efforts de mesure des données nucléaires nécessaires pour minimiser les flux de déchets via la transmutation dans des réacteurs rapides ou des ADS.

**CDT<sup>51</sup>** Le projet représente une suite des activités d'Eurotrans. CDT vise à obtenir un schéma de conception avancé pour Myrrha grâce à une équipe intégrée européenne d'experts et d'ingénieurs. CDT doit permettre de donner les spécifications nécessaires aux fournisseurs de composants ainsi qu'aux bureaux d'études pour la construction de l'infrastructure. L'équipe étudiera également un scénario d'exploitation de l'installation en mode critique.

<sup>44</sup> Actinide recycling by separation and transmutation ; 2008-2012, 7<sup>ème</sup> PCRD, 12 pays, 34 partenaires dont le CEA, EDF, la Compagnie Générale des Matières Nucléaires, Alcan Centre de Recherche de Voreppe, l'Université Louis Pasteur, le CNRS, et l'Université Pierre et Marie Curie.

<sup>45</sup> Actinet Integrated Infrastructure Initiative, 7<sup>ème</sup> PCRD, 5 pays, 7 partenaires dont le CNRS, LGI et le CEA.

<sup>46</sup> Alternative Nuclear Fuel Cycles; 2010-..., 7<sup>ème</sup> PCRD, 6 pays, 14 partenaires dont le CEA.

<sup>47</sup> ADS and fast reactor comparison study in support of SRA of SNETP ; 2010-2012, 7<sup>ème</sup> PCRD, 8 pays et 14 partenaires, dont le CNRS.

<sup>48</sup> Advanced fuels for Generation IV reActors, Reprocessing and Dissolution, 2012-2015, 7<sup>ème</sup> PCRD, 9 pays, 16 partenaires, dont le CEA.

<sup>49</sup> ASTRID, prototype de réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium, projet piloté par le CEA

<sup>50</sup> Coordination action on nuclear data for industrial development in Europe ; 2007-2008, 6<sup>ème</sup> PRCD, 11 pays, 14 partenaires dont Areva, EDF et le CEA.

<sup>51</sup> Central Design Team for a Fast Spectrum Transmutation Experimental Facility, 2009-2011, 7<sup>ème</sup> PCRD, 8 pays, 19 partenaires dont le CEA, le CNRS et Areva.

**CP-ESFR**<sup>52</sup> Le projet adressera des problèmes clefs liés au développement du RNR-Na européen ESFR. L'objectif est d'optimiser, vis-à-vis des réacteurs actuels, les niveaux de sûreté, la garantie d'un risque financier comparable, et une gestion flexible mais robuste des matériaux nucléaires. Des études d'optimisation seront réalisées sur des cœurs avec un combustible oxyde ou carbure. La fabrication et la détermination des propriétés physiques de combustibles chargés en actinides mineurs seront étudiées.

**EFNUDAT**<sup>53</sup> Le projet a pour but de créer un réseau européen des infrastructures de recherche capables, si nécessaire, de générer les données nécessaires à l'étude de réacteurs, critiques ou sous-critiques à base de source de spallation. Les aspects d'enseignement et de formation seront développés en collaboration avec les universités, les centres de recherche et l'industrie.

**EISOFAR**<sup>54</sup> Cette action est destinée à définir les objectifs de recherche spécifiques concernant les réacteurs rapides refroidis au sodium. Elle s'inscrit dans la perspective de SNE-TP et de GenIV.

**ELSY**<sup>55</sup> Le projet ELSY du 6<sup>ème</sup> PCRD envisage la conception d'un réacteur refroidi au plomb d'une puissance de 600 MWe. Des simplifications de conception sont recherchées en se basant sur les caractéristiques du caloporeur plomb. Ces simplifications ouvriront la voie à un réacteur rapide qui pourrait être économiquement compétitif du point de vue des coûts d'investissement et des coûts d'exploitation, dans un marché d'électricité libre.

**EUFRAT**<sup>56</sup> L'unité de physique neutronique du CCR-IRMM est équipée d'une infrastructure unique pour la mesure très précise de sections efficaces couvrant un large spectre d'énergie. Le projet poursuit le travail effectué dans le cadre du projet Nudame.

**EVOL**<sup>57</sup> Le CNRS développe un concept novateur de réacteur rapide à sels fondus depuis 2004. Basé sur l'emploi de combustible liquide, le concept est inspiré des réacteurs à sels fondus des années 1960.

**ERINDA**<sup>58</sup> En vue d'étudier leur capacité de transmuter, différents concepts de réacteurs critiques ou sous-critiques (ADS) seront étudiés. Une connaissance précise des réactions nucléaires induites par des neutrons ou protons dans les domaines d'énergie de 1 keV à 500 Mev est cruciale pour prédire la réduction de l'inventaire de plutonium, des actinides mineurs et des produits de fission à longue durée de vie.

**EUROTRANS**<sup>59</sup> - Les E&R sur les ADS sont actuellement conduites dans le cadre européen du programme Eurotrans. Ce programme intégré étudie le design, le coût et les aspects de sûreté d'un système ADS, la fiabilité de l'accélérateur, le couplage des différents éléments, les matériaux et les technologies du réfrigérant, les combustibles et cibles, et les données nucléaires de base. Il comprend également un volet enseignement et formation.

---

<sup>52</sup> Collaborative project on European sodium fast reactor ; 2009-2012, 7<sup>ème</sup> PCRD, 10 pays, 25 partenaires dont le CEA, Areva NP, IRSN et EDF.

<sup>53</sup> European Facilities for Nuclear Data Measurements ; 2006-2010, 6<sup>ème</sup> PCRD, 7 pays, 10 partenaires dont le CNRS et le CEA.

<sup>54</sup> Sodium cooled Fast Reactor ; 2007-2008, 6<sup>ème</sup> PCRD, 9 pays, 13 partenaires dont le CEA, Areva et EDF.

<sup>55</sup> European Lead-cooled System ; 2006-2009, 6<sup>ème</sup> PCRD, 15 pays, 20 partenaires dont le CNRS et EDF.

<sup>56</sup> European facility for innovative reactor and transmutation neutron data ; 2008-2012, 7<sup>ème</sup> PCRD, CE-CCR.

<sup>57</sup> Evaluation and Viability of Liquid Fuel Fast Reactor System, 2010-2013, 7<sup>ème</sup> PCRD, 8 pays, 11 partenaires dont le CNRS, Inopro et Aubert & Duval.

<sup>58</sup> European Research Infrastructures for Nuclear Data Applications, 2010-2013, 7<sup>ème</sup> PCRD, 10 pays, 14 partenaires, dont le CEA et le CNRS.

<sup>59</sup> European research Programme for the transmutation of high level nuclear waste in an accelerator driven system ; 2005-2010, 6<sup>ème</sup> PCRD, 14 pays, 29 partenaires dont le CNRS, le CEA, Areva, Advanced Accelerator Applications et le Réseau Européen pour l'Enseignement du Nucléaire ENEN.

**FAIRFUELS**<sup>60</sup> Le projet doit fournir une voie vers un usage plus efficient de la matière fissile dans les réacteurs, afin de réduire le volume et le danger potentiel des déchets HAVL. Fairfuels se concentre sur les actinides mineurs. Du combustible dédié sera produit et un programme d'irradiation assez complet sera effectué afin d'étudier les capacités de transmutation. En parallèle, le programme comprend des examens post-irradiation sur certains anciens combustibles afin de développer des modèles. Un programme d'éducation et de formation est également prévu.

**FAR**<sup>61</sup> Cette action mettra à disposition les connaissances de base ainsi qu'appliquées dans le domaine des matériaux et combustibles nucléaires, et sera une "fenêtre académique" et un centre de référence des activités des Centres Communs de Recherche dans ces domaines.

**F-BRIDGE**<sup>62</sup> La méthode empirique, employée jusqu'à présent pour le développement et la qualification de combustible conventionnel, ne convient pas pour le développement et la qualification de combustible pour les réacteurs de 4<sup>ème</sup> génération. Le projet a comme but de construire un pont entre, d'une part la recherche fondamentale sur le combustible de type "céramique" et les matériaux de gainage, et d'autre part les technologies pour les combustibles des réacteurs du futur.

**FREYA**<sup>63</sup> En se fondant sur les résultats obtenus par les projets Muse et Eurotrans, Freya étendra l'étude de configurations sous-critiques afin de valider la méthodologie de mesure en continu de la réactivité des systèmes ADS.

**GACID**<sup>64</sup> Le programme expérimental, établi grâce à une collaboration entre le CEA, le DOE (États-Unis) et le JAEA (Japon), prévoit la fabrication d'un assemblage combustible chargé en actinides mineurs, à partir de Mox retraité, et son irradiation dans un RNR-Na. Il sera réalisé sur le long terme avec des irradiations prévues entre 2015 et 2025, car il nécessite la construction d'un atelier pilote pour la fabrication de l'assemblage et un retour d'expérience suffisant après irradiation dans Monju.

**GETMAT**<sup>65</sup> Le but de ce projet de collaboration est d'intégrer les activités d'étude et de développement des laboratoires européens experts en recherche sur les matériaux pour les réacteurs du futur, dont ceux de 4<sup>ème</sup> génération, les systèmes de transmutation, et ceux dédiés à la fusion.

**GIF/GEN-IV**<sup>66</sup> L'initiative du forum Génération-IV vise le développement de nouveaux types de réacteurs, parmi lesquels les réacteurs rapides produisant un minimum de déchets. Deux voies technologiques sont explorées en Europe afin de permettre de faire un choix et de limiter les risques liés au développement et au calendrier de la recherche : un réacteur rapide refroidi au sodium (SFR), première voie technologique basée sur l'expérience européenne ; une technologie alternative de réacteur à neutrons rapides refroidi au gaz ou au plomb. L'objectif est d'être en mesure d'exploiter commercialement une technologie de réacteurs rapides pour l'an 2040. Dans une perspective de développement durable, ces deux technologies peuvent contribuer à la minimiser la production de déchets radioactifs et les risques de prolifération.

<sup>60</sup> Fabrication, irradiation and reprocessing of fuels and targets for transmutation; 2009-2013, 7<sup>ème</sup> PCRD, 6 pays, 10 partenaires dont le CEA et Lagrange-LCI.

<sup>61</sup> Fundamental and Applied Actinide Research ; action CCR, 12 pays, 26 partenaires.

<sup>62</sup> Basic research for innovative fuels design for GEN IV systems ; 2008-2012, 7<sup>ème</sup> PCRD, 8 pays, 18 partenaires dont le CEA, le CNRS, Areva, Materials design, Nathalie Dupin et Lagrange-LCI Consulting.

<sup>63</sup> Fast reactor experiments for hybrid applications, 2011-2015, 7<sup>ème</sup> PCRD, 10 pays, 16 partenaires dont le CNRS et le CEA.

<sup>64</sup> Global Actinide Cycle International Demonstration ; DOE, JAEA, CEA.

<sup>65</sup> Gen IV and transmutation materials ; 2008-2013, 7<sup>ème</sup> PCRD, 11 pays, 24 partenaires dont le CEA, le CNRS et EDF.

<sup>66</sup> Generation IV International Forum ; 2001- ..., Euratom + 12 pays dont la France.

**GOFASTER**<sup>67</sup> Afin de développer une version plus durable d'un réacteur à très haute température, le projet se concentre sur un réacteur rapide refroidi au gaz (GFR). La conception du GFR vise une température à la sortie du cœur de 850°C, une densité de puissance de 100 MWt/m<sup>3</sup>, et un cœur contenant peu de plutonium. Il doit également être non-générateur de plutonium afin d'être non-proliférant.

**GUINEVERE**<sup>68</sup> En mars 2010, le réacteur "Guinevere" a été inauguré au SCK•CEN (Mol). Guinevere est un réacteur rapide de recherche piloté par accélérateur (ADS) de très faible puissance, quelques centaines de Watts seulement, et précurseur de Myrrha. Le réacteur est le fruit d'une excellente collaboration entre le SCK•CEN, le CEA et le CNRS, dans le cadre du projet EUROTRANS. L'accélérateur Génépi-C a été construit par le CNRS à Grenoble, le combustible étant livré par le CEA.

**JASMIN**<sup>69</sup> Le but du projet est de développer un nouveau code de calcul européen, ASTEC-Na, afin d'y intégrer le retour d'expérience d'accidents graves de réacteurs au sodium. Cela aidera la conception d'un SFR européen de 4<sup>ème</sup> génération.

**JHR-CP**<sup>70</sup> Pour mémoire: le réacteur Jules Horowitz (RJH) est un réacteur de recherche de 100 MWt, actuellement en construction à Cadarache. Il est destiné à offrir, durant une grande partie du XXI<sup>ème</sup> siècle, une capacité d'irradiation expérimentale de haute performance pour étudier le comportement des matériaux et combustibles sous irradiation, en réponse aux besoins, industriels et publics, pour les 2<sup>ème</sup>, 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> générations de réacteurs de puissance (réacteurs à eau pressurisée, à eau bouillante, à gaz, à sodium...), et les technologies associées. JHR-CP organise les réseaux internationaux qui collaborent au RJH, prépare les besoins en dispositifs d'irradiation nécessaires pour ces programmes et définit les formations utiles aux futurs opérateurs de ces dispositifs.

**LEADER**<sup>71</sup> Le projet est la suite du projet ELSY. Ce projet propose de raffiner les choix technologiques pour la conception d'un réacteur prototype refroidi au plomb d'une puissance de 600 MWe et le design d'un démonstrateur LFR.

**LWR-DEPUTY**<sup>72</sup> Il s'agit d'étudier la possibilité que les réacteurs à eau pressurisée (REP) actuels génèrent moins de déchets en brûlant du combustible à base de matrices inertes. Il vise l'élimination du plutonium dans les réacteurs par la recherche de nouveaux types de combustible.

**MARISA**<sup>73</sup> Le projet vise à apporter au projet MYRRHA le degré de maturité nécessaire pour commencer la construction. En particulier, le projet soutient l'ingénierie de MYRRHA, la coordination du programme R&D, la réalisation du consortium internationale, la gestion opérationnelle et la préparation du processus d'autorisation. Une feuille de route sera développée, identifiant la contribution de MYRRHA comme installation européenne de recherche à neutrons rapides à la fermeture du cycle de combustible.

<sup>67</sup> European Gas Cooled Fast Reactor, 2010-2013, 7<sup>ème</sup> PCRD, 10 pays, 22 partenaires, dont l'IRSN, Areva et le CEA.

<sup>68</sup> Guinevere: Generator of Uninterrupted Intense Neutrons at the lead Venus Reactor ; 2006-..., collaboration avec le CEA et le CNRS.

<sup>69</sup> Joint Advanced Severe Accidents Modelling and Integration for Na-cooled fast neutron reactors, 2011-2015, 7<sup>ème</sup> PCRD, 5 pays, 9 partenaires, dont l'IRSN (coordinateur), Areva et EDF.

<sup>70</sup> Jules Horowitz reactor collaborative project : contribution to the design and construction of new research infrastructure of pan-European interest, the JHR material testing reactor ; 2009- ..., 7<sup>ème</sup> PCRD, 5 pays et 6 partenaires dont le CEA, maître D4OUEVRE

<sup>71</sup> Lead-cooled European Advanced Demonstration Reactor ; 2010-2012 ; 7<sup>ème</sup> PCRD, 12 pays et 17 partenaires dont le CEA.

<sup>72</sup> Light Water Reactor fuels for Deep Burning of Pu in Thermal Systems ; 2006-2011 ; 7<sup>ème</sup> PCRD, 6 pays et 9 partenaires.

<sup>73</sup> Myrrha Research Infrastructure Support Action, 2013-2016 ; 7<sup>ème</sup> PCRD, 9 pays et 15 partenaires dont le CEA, le CNRS, Areva et ACS.

**MATISSE**<sup>74</sup> Le projet rassemble plusieurs organisations de R&D ayant établi, dans le cadre de l'initiative 'European Energy Research Alliance' (EERA), un programme appelé 'Joint Programme on Nuclear Materials (JPNM)' pour une meilleure coordination des initiatives nationales, des programmes européens et d'éventuelles collaborations 'privé-publique' ou transnationales. Le programme de travail du projet inclut des actions, des activités de coordination ainsi que des activités de R&D prioritaires en support du JPNM.

**MAX**<sup>75</sup> Suite aux recommandations de l'agenda stratégique du SNE-TP concernant le développement d'ADS en Europe, le projet adresse la conception d'un accélérateur à haute puissance pour le projet Myrrha. Une attention particulière est portée à la fiabilité et la disponibilité de l'accélérateur.

**MAXSIMA**<sup>76</sup> Suite aux recommandations du SRA de SNETP concernant le développement de l'ADS en Europe et plus particulièrement le projet Myrrha, le projet traite des études de sûreté en conditions normales et en conditions incidentielles et accidentielles utiles pour le licensing. Les analyses des accidents sévères pouvant mener à des ruptures de gaine de combustible seront effectués. Les problèmes d'un accident par rupture de tube d'échangeur de chaleur et de la propagation des conséquences d'un tel accident seront étudiés. Des expériences de transitoires de sûreté sur des segments de combustible Mox sont prévues en réacteur expérimental en Roumanie.

**MYRRHA**<sup>77</sup> Le projet vise la construction d'un ADS sous-critique de 60 - 100 MWt à spectre de neutrons rapides, refroidi au plomb-bismuth qui démontrera la faisabilité du couplage accélérateur - source de spallation - réacteur sous-critique dans une installation préindustrielle. Le réacteur est conçu pour également pouvoir opérer en mode critique. Comme outil d'irradiation flexible à spectre rapide, il offrira aux communautés des réacteurs rapides (SFR, LFR, GFR) une machine pour les tests de matériaux et combustibles, indispensables pour leur développement. Actuellement, le projet est dans la phase de l'ingénierie détaillée d'avant-projet.

**ND-MINWASTE**<sup>78</sup> Le projet procure de nouveaux résultats expérimentaux destinés à l'évaluation de la sûreté de réacteurs actuels et futurs, du combustible usé, et de la gestion de déchets radioactifs.

85

**NURISP**<sup>79</sup> Le projet s'inscrit dans la suite du projet NURESIM du 6<sup>ème</sup> PCRD. Son objectif est d'intégrer l'état de l'art numérique et physique en une plateforme logicielle européenne de simulation dans le domaine des réacteurs nucléaires.

**PATEROS**<sup>80</sup> Cette action vise la mise en place, à échelle réduite, de toutes les étapes et composants nécessaires à la technologie de séparation-transmutation.

---

<sup>74</sup> Materials innovation for safe and sustainable nuclear energy, 2013-2017 ; 7<sup>ème</sup> PCRD, 13 pays et 28 partenaires dont le CEA, le CNRS, EDF et LGI Consulting.

<sup>75</sup> Myrrha accelerator experiment, research and development programme, 2011-2014, 7<sup>ème</sup> PCRD, 6 pays, 11 partenaires, dont le CNRS (coordinateur), Thales Electron Devices, Accelerators and cryogenic systems et le CEA.

<sup>76</sup> Methodology, Analysis and eXperiments for the Safety In Myrrha Assessment, 2012-2018, 7<sup>ème</sup> PCRD, 8 pays et 13 partenaires.

<sup>77</sup> Multipurpose Hybrid Research Reactor for High-tech Applications ; 1998-2024, collaboration avec les partenaires d'Eurotrans dont le CNRS, le CEA, Areva, Advanced Accelerator Applications et ENEN.

<sup>78</sup> Nuclear data for radioactive waste management and safety of new reactor developments ; 8 pays, 15 partenaires, dont le CNRS, CEA et l'Université Louis Pasteur.

<sup>79</sup> Nuclear reactor integrated simulation project, 2009-2012, 7<sup>ème</sup> PCRD, 14 pays, 22 organismes dont EDF, IRSN et le CEA.

<sup>80</sup> Partitioning and Transmutation European Roadmap for Sustainable Nuclear Energy ; 2006-2008, 6<sup>ème</sup> PCRD, 11 pays, 17 partenaires dont le CEA, le CNRS et Areva.

**PELGRIMM**<sup>81</sup> Afin de soutenir l'agenda stratégique de la SNE-TP, le projet étudie le développement de combustibles contenant des actinides mineurs pour les réacteurs rapides. Aussi bien la transmutation en mode homogène dans le cœur du réacteur que la transmutation en mode hétérogène en couverture sont étudiées.

**PUMA**<sup>82</sup> Le projet fournira les éléments clés pour la transmutation du plutonium et des actinides mineurs dans les réacteurs futurs refroidis au gaz.

**SANF**<sup>83</sup> Le projet étudie les aspects de la sûreté du combustible pour les réacteurs à neutrons rapides (GFR, SFR, LFR) et à très haute température (VHTR) développés dans le cadre de Gen-IV. Le but est d'établir des limites de sûreté pour la fabrication et le comportement de ces combustibles sous la contrainte de taux de combustion élevés, de très fortes doses et de très hautes températures. Le projet rassemble les Etats-Unis, le Japon, la Corée, l'Union européenne ainsi que l'OCDE et l'AIEA.

**SARGEN-IV**<sup>84</sup> Le projet rassemble les experts en sûreté d'organismes techniques, de bureaux d'étude, des industries ainsi que des centres de recherche et des universités, afin :

- de développer et de mettre à disposition une méthodologie commune pour l'évaluation de sûreté ;
- de fournir une feuille de route pour de nouvelles orientations de R&D en sûreté, y compris une estimation des coûts les concernant.

**SACSESS**<sup>85</sup> Conforme à l'agenda stratégique SRA de SNE-TP, SACSESS procurera un cadre structuré afin d'optimiser le cycle de combustible associé à la S&T. Des études de sûreté doivent identifier les points actuellement faibles. Un volet d'éducation et de formation est associé au projet.

**SEARCH**<sup>86</sup> Afin d'aider le processus d'octroi de licences, le projet étudie les aspects ayant trait à la sûreté liés au comportement chimique du combustible et du caloporteur à métal liquide de Myrrha. Les points étudiés plus en détail sont le contrôle du contenu en oxygène et des impuretés dans le métal liquide.

**SILER**<sup>87</sup> Le but du projet est d'étudier le risque associé aux événements initiés par des tremblements de terre dans des réacteurs Gen IV refroidis aux métaux lourds liquides. Une attention particulière est portée aux tremblements de terre ou tsunamis au delà des limites de conception ainsi qu'aux stratégies de mitigation, comme l'identification de solutions qui empêchent les fuites radioactives du cœur ou de piscines d'entreposage de combustible usé.

<sup>81</sup> PELLets versus GRanulates: Irradiation, Manufacturing & Modelling, 2012-2015, 7<sup>ème</sup> PCRD, 9 pays, 10 partenaires, dont le CEA (coordinateur), EDF, Areva, Lagrange et le Réseau européen pour l'enseignement des sciences nucléaires.

<sup>82</sup> Plutonium and Minor Actinides Management by Gas-Cooled Reactors ; 2006-2009, 6<sup>ème</sup> PCRD, 9 pays, 16 partenaires dont Areva, EDF et Lagrange.

<sup>83</sup> Safety of Advanced Nuclear Fuels ; action concertée, 14 pays, 33 partenaires dont le CEA et Areva.

<sup>84</sup> Harmonized European methodology for the Safety Assessment of innovative GEN-IV reactors, 2011-2013, 7<sup>ème</sup> PCRD, 12 pays, 22 partenaires, dont l'IRSN (coordinateur), Areva, EDF et le CEA.

<sup>85</sup> Safety of actinide separation processes, 2013-2016, 7<sup>ème</sup> PCRD, 13 pays, 26 partenaires, dont le CEA, l'IRSN, le CNRS, l'Université de Strasbourg et Lagrange SARL.

<sup>86</sup> Safe Exploitation Related Chemistry for HLM reactors and Lead-cooled Advanced Fast Reactors, 2011-2014, 7<sup>ème</sup> PCRD, 7 pays, 12 partenaires, dont l'IRSN (coordinateur), Areva et EDF.

<sup>87</sup> Seismic-initiated events risk mitigation in lead-cooled reactors, 2011-2014, 7<sup>ème</sup> PCRD, 8 pays, 18 partenaires, dont le CEA, Nuvia Travaux Spéciaux et Areva.

**SNE-TP**<sup>88</sup> La plate-forme technologique européenne sur l'énergie nucléaire durable propose une vision du développement des technologies de l'énergie de fission nucléaire à court, moyen et long termes. Elle propose le développement et la mise en place de technologies nucléaires potentiellement durables, y compris la gestion de toutes les sortes de déchets. La plateforme propose aussi d'étendre l'utilisation de l'énergie nucléaire au-delà de la production d'électricité, notamment pour la production d'hydrogène, la génération de chaleur et la désalinisation de l'eau de mer. La plateforme a préparé une initiative industrielle européenne, "European Sustainable Nuclear Industrial Initiative (ESNII)", chiffrée entre 6 et 10 G€, comprenant les deux projets Astrid et Myrrha.

**TDB**<sup>89</sup> Le projet d'une base de données thermodynamiques sur les espèces chimiques (TDB), initié par l'AEN, a pour objet de répondre aux besoins de modélisation spécifiques aux évaluations de sûreté des sites de stockage des déchets radioactifs.

**THINS**<sup>90</sup> Le projet prévoit la conception et réalisation d'expériences thermo-hydrauliques en support à différents systèmes innovants à base de métaux liquides.

**VELLA**<sup>91</sup> L'initiative tend à créer un laboratoire européen virtuel pour l'étude de technologies aux métaux lourds dont principalement le plomb et ses alliages.

<sup>88</sup> The European Technology Platform on Sustainable Nuclear Energy; 2007- ..., ≥ 19 pays, > 60 membres dont le CEA, l'IRSN, le CNRS, Areva, EDF et GDF-SUEZ.

<sup>89</sup> Thermochemical Database project ; AEN.

<sup>90</sup> Thermal-Hydraulic research for Innovative Nuclear Systems ; 2010-2014, 7<sup>ème</sup> PCRD, 11 pays, 24 partenaires dont le CEA et l'IRSN.

<sup>91</sup> Virtual European Lead Laboratory ; 2006-2009, 6<sup>ème</sup> PCRD, 9 pays, 13 partenaires dont le CNRS et le CEA.



## Annexe XII

### ENSEIGNEMENT, FORMATION ET GESTION DES CONNAISSANCES

**ALICE**<sup>92</sup> Le projet est une action coordonnée entre partenaires européens et chinois afin de développer l'accès transnational à de grandes infrastructures de recherche sur les matériaux, et en particulier aux installations d'irradiation.

**CINCH-II**<sup>93</sup> Le projet est la suite du projet CINCH-I qui a finalisé une stratégie durable pour l'enseignement de la chimie nucléaire ainsi qu'une feuille de route pour sa mise en œuvre. CINCH-II vise entre autre le développement et l'implémentation d'un EuroMaster et d'un passeport européen de formation en chimie nucléaire.

**ENEN-III**<sup>94</sup> Le projet couvre la structuration, coordination et implémentation de schémas de formation, en coopération avec les organisations locales, nationales ou internationales qui forment les professionnels actifs dans le monde nucléaire ou ses (sous)contractants. Les schémas offrent un portefeuille de cours, sessions de formation, séminaires et ateliers pour la formation permanente, la mise à niveau des connaissances et le développement de nouvelles compétences.

**HeLiMnet**<sup>95</sup> Le but du projet, qui est la suite du projet Vella, est de permettre l'échange de chercheurs entre laboratoires qui ont une infrastructure pour l'étude de métaux lourds liquides comme le sodium ou le plomb.

**KTE**<sup>96</sup> Archiver, maintenir et approfondir les connaissances en recherche nucléaire sont les buts du projet. Des formations de haut niveau pour jeunes étudiants et chercheurs seront offertes par le biais de stages dans des laboratoires participant au projet.

**PETRUS II**<sup>97</sup> Le projet tend à permettre aux professionnels européens, actifs dans le domaine de la gestion des déchets radioactifs et quelles que soient leurs études initiales, de suivre une formation sur le stockage géologique qui serait largement reconnue en Europe.

---

<sup>92</sup> Access to Large Infrastructures in China and Europa, 2012-2016, 7<sup>ème</sup> PCRD, 5 pays, 5 partenaires, dont le CEA.

<sup>93</sup> Cooperation in education and training In Nuclear Chemistry ; 2013-2016, 7<sup>ème</sup> PCRD, 7 pays, 11 partenaires dont le CEA.

<sup>94</sup> European nuclear education network training schemes, 2009-2013, 7<sup>ème</sup> PCRD, 11 pays, 20 partenaires dont le Réseau européen pour l'enseignement des sciences nucléaires et le CEA.

<sup>95</sup> Heavy Liquid Metal network ; 2010-..., 7<sup>ème</sup> PCRD, 9 pays et 13 partenaires dont le CEA.

<sup>96</sup> Knowledge Management, Training and Education ; 2007-..., 7<sup>ème</sup> PCRD, CCR Karlsruhe.

<sup>97</sup> Towards an European training market and professional qualification in Geological Disposal ; 2009-2012, 7<sup>ème</sup> PCRD, 10 pays, 14 partenaires dont le Réseau européen pour l'enseignement des sciences nucléaires, l'Andra et l'Institut National Polytechnique de Lorraine.



# **COMMISSION NATIONALE D'EVALUATION**

---

Président : **Jean-Claude DUPLESSY**

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

Secrétaire général : **Maurice LAURENT**

Conseiller scientifique : **Stanislas POMMERET**

Secrétariat administratif : **Chantal JOUVANCE et Florence LEDOUX**

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



Conception/réalisation

---

**donnadieu.biz**  
Tél. : 01 55 48 03 60



# COMMISSION NATIONALE D'EVALUATION

---

Membres de la Commission Nationale d'Evaluation :

**Jean-Claude DUPLESSY**  
**Jean BAECHLER**  
**Pierre BEREST**  
**Adolf BIRKHOFER\***  
**Frank DECONINCK**  
**Hubert DOUBRE\*\***  
**Maurice LAURENT**  
**Emmanuel LEDOUX**  
**Maurice LEROY**  
**Jacques PERCEBOIS**  
**Gilles PIJAUDIER-CABOT\*\*\***  
**François ROURE**  
**Claes THEGERSTRÖM**

Conseiller scientifique :

**Stanislas POMMERET**

Président honoraire :

**Bernard TISSOT**

Secrétariat administratif :

**Chantal JOUVANCE et Florence LEDOUX**

\* Expert invité

\*\* n'a pas participé à la rédaction du présent rapport

\*\*\* nommé le 13 août 2013 en remplacement de M. Yves BRÉCHET

# **COMMISSION NATIONALE D'EVALUATION**

---

Président : **Jean-Claude DUPLESSY**

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

Secrétaire général : **Maurice LAURENT**

Conseiller scientifique : **Stanislas POMMERET**

Secrétariat administratif : **Chantal JOUVANCE et Florence LEDOUX**

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