

COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION

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

instituée par la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006

RAPPORT D'ÉVALUATION N°6

NOVEMBRE 2012

COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION

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

instituée par la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006

RAPPORT D'ÉVALUATION N°6

NOVEMBRE 2012

S O M M A I R E

AVIS DE LA CNE2 SUR LA GESTION DES MATIÈRES ET DES DÉCHETS RADIOACTIFS..	1
RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS	2
LIMINAIRE	5
ACTIVITÉS DE LA CNE2	6

Chapitre 1 – SÉPARATION-TRANSMUTATION

1.1. INTRODUCTION	8
1.2. SÉPARATION	8
1.3. TRANSMUTATION	9
1.3.1. ADS	9
1.3.2. Astrid	10
1.3.2.1. Sûreté et spécificités technologiques	10
1.3.2.2. Démonstration de la faisabilité industrielle	12
1.3.3. Scénarios de RNR associés à un parc de Rep	14

CHAPITRE 2 – STOCKAGES ET ENTREPOSAGES

2.1. INTRODUCTION	16
2.2. INVENTAIRE DE CIGÉO	16
2.2.1. Cas des combustibles usés	17
2.2.2. Colis prévus dans la première tranche de Cigéo	17
2.3. CARACTÉRISATION DE LA ZIRA	18
2.4. TRAVAUX SCIENTIFIQUES	19
2.4.1. Expérimentation en laboratoire souterrain	19
2.4.2. Comportement différé	20
2.4.3. Hydrogène et chaleur dégagée	21
2.4.4. Modélisation hydrogéologique	22
2.4.5. Résultats sur le forage profond	23

2.5.	AVANCÉES TECHNOLOGIQUES.....	25
2.5.1.	Alvéoles HAVL.....	25
2.5.2.	Scellements.....	26
2.6.	COÛT DU STOCKAGE.....	28
2.7.	OBSERVATION PÉRENNE DE L'ENVIRONNEMENT.....	29
2.8.	ENTREPOSAGES ET INSTALLATIONS DE SURFACE.....	29
2.9.	POUR UNE VUE D'ENSEMBLE DU PROJET CIGÉO.....	31

Chapitre 3 – PANORAMA INTERNATIONAL

3.1.	CADRE LÉGAL INTERNATIONAL.....	33
3.2.	LABORATOIRES DE RECHERCHE OU SITES DE STOCKAGE SOUTERRAIN.....	34
3.3.	SOURCES D'IRRADIATION À SPECTRE RAPIDE.....	37
3.4.	PRINCIPALES INITIATIVES INTERNATIONALES SUR LES ADS.....	38
3.5.	CONCLUSION.....	39

ANNEXES

Annexe I –	COMPOSITION DE LA COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION - NOVEMBRE 2012.....	I
Annexe II –	ORGANISMES AUDITIONNÉS PAR LA CNE2.....	III
Annexe III –	Liste des documents transmis à la Commission – 2011-2012.....	V
Annexe IV –	ANALYSE DU RAPPORT DE L'IEER.....	VII
Annexe V –	STOCAMINE.....	XI
Annexe VI –	E&R INTERNATIONALES.....	XV

AVIS DE LA CNE2 SUR LA GESTION DES MATIÈRES ET DES DÉCHETS RADIOACTIFS

(transmis à l'Opecst le 21 septembre 2012)

L'industrie nucléaire produit des substances radioactives à vie longue. Les unes sont des déchets. L'éthique et le développement durable interdisent d'en transférer le soin et le souci aux générations à venir. L'entreposage en surface ne saurait être qu'un palliatif à moyen terme. Sur l'avis des experts, les pays concernés ont conclu que la solution présentant toutes les garanties est le stockage géologique en profondeur. La loi de 2006 l'a retenue pour la gestion des déchets français, en l'assortissant d'une clause de réversibilité pour une durée d'un siècle au moins. D'autres, dont le plutonium et l'uranium appauvri, pourraient servir de ressources pour une nouvelle génération de réacteurs. Ceux-ci devront être plus efficaces et plus sûrs encore. Leur mise en œuvre assurerait l'indépendance de la France, du point de vue de la production d'électricité, pour plusieurs siècles. La même loi de 2006 a confirmé la mission faite à la CNE2 de présenter chaque année au Parlement un rapport et un avis sur l'avancement et la qualité des études, des recherches et des réalisations conduites tant sur le stockage des déchets en profondeur que sur la transmutation des matières radioactives par le moyen des réacteurs de quatrième génération.

Forte d'une expérience de plus de vingt ans, tirée de l'audition de tous les acteurs concernés, des évaluations des installations et laboratoires concourant à cette entreprise tant en France qu'à l'étranger, la CNE2 se juge en droit d'affirmer aujourd'hui que :

1. 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 ;
2. 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 ;
3. la conception de l'ouvrage à implanter - 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 ;
4. 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.

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 conjoints : la séparation-transmutation des actinides mineurs qui seront présents dans le combustible usé des futurs réacteurs nucléaires et le stockage géologique des déchets de haute et moyenne activité à vie longue.

Séparation et transmutation

La loi de 2006 dispose de combiner les recherches sur la séparation et la transmutation avec les E&R sur les nouvelles générations de réacteurs (réacteurs à neutrons rapides, RNR, et réacteurs sous-critiques pilotés par accélérateur, ADS¹).

Les procédés de séparation ont atteint un niveau de maturité technique permettant d'envisager des opérations industrielles de transmutation. En particulier, le CEA a démontré la faisabilité technique du multi-recyclage du plutonium issu des combustibles Mox des RNR à l'aide des molécules extractantes et des techniques de séparation qu'il a développées.

Les ADS sont étudiés pour leur potentialité à transmuter, dans le cadre d'une stratégie européenne, des actinides mineurs. Les équipes belges du SCK•CEN, associées à celles du CEA et du CNRS développent actuellement le projet Guinevere, une expérience maquette reproduisant un ADS. Guinevere est la première étape du programme Myrrha qui vise à construire un ADS, refroidi au plomb, de puissance suffisante pour préparer le passage à un niveau industriel bien au-delà de 2040.

Associés à un parc de Rep en fonctionnement, les ADS ne permettent pas de brûler tout le plutonium issu du retraitement ni, par conséquent, de fermer le cycle du combustible, sauf à gérer la majeure partie du plutonium par la mise en œuvre d'un parc utilisant des RNR à côté des ADS.

Pour les RNR, le CEA a engagé, avec ses partenaires EDF et Areva, des E&R pour construire dans les années 2020 un prototype industriel de réacteur électrogène appelé Astrid qui permet d'utiliser le plutonium associé à de l'uranium appauvri dans le combustible et de s'affranchir des importations d'uranium naturel. Les recherches portent sur un accroissement important de la sûreté qui devra être au moins égale à celle des réacteurs de 3^{ème} génération. Les avancées les plus significatives sont le coefficient de vidange négatif du cœur qui offre une sûreté passive accrue, l'échangeur avec un gaz inerte pour éliminer les risques de contact sodium-eau, et l'amélioration de l'inspection en service. La Commission apprécie très positivement ces innovations.

Le réacteur expérimental Astrid et son cycle associé – fabrication et retraitement du combustible – sont indispensables pour en tester la validité industrielle et économique. La construction d'un prototype industriel nécessite des études approfondies sur les matériaux qui devront supporter des taux de combustion élevés. Une analyse complète de la radioprotection au cours des opérations de chargement, déchargement et refroidissement des combustibles est requise. Un programme exhaustif, permettant d'établir la faisabilité industrielle de la transmutation de l'américium, nécessitera, dans une seconde étape, la mise au point industrielle de la séparation de l'américium, puis la construction d'une unité de fabrication et de retraitement des couvertures chargées en américium.

¹ Accelerator Driven System

Stockage géologique

La couche d'argilite de plus de 130 m d'épaisseur située à 500 m de profondeur à l'emplacement du site de Meuse/Haute-Marne est étudiée depuis plus de quinze ans. Elle a révélé d'excellentes qualités de confinement : stabilité depuis 100 millions d'années au moins ; capacité de rétention élevée des éléments, démontrée par les études géochimiques ; absence de transferts de fluide, confirmée par l'analyse du forage profond atteignant la base du Trias ; temps de transfert des radionucléides de plusieurs centaines de milliers d'années ; circulation de l'eau très lente dans les aquifères encaissants, confirmée par un modèle hydrogéologique expérimentalement validé.

La conception de l'ouvrage à implanter – puits, galeries, alvéoles, ventilation, scellements – a été confiée à un maître d'œuvre système. La mise au point des dispositifs et procédures nécessaires à sa sûreté, en exploitation et après sa fermeture définitive, sont en cours d'étude. Il demeure que l'Andra, maître d'ouvrage, en endosse l'entière responsabilité. Ces études sont assez avancées pour qu'il soit permis d'engager la phase industrielle prévue par la loi. Il s'agit d'un travail de réalisation concrète, avec toutes les étapes de développement, d'innovation et d'ingénierie nécessaires. La Commission attend encore les précisions sur les coûts de l'ouvrage.

La Commission s'attachera tout particulièrement à peser les choix de conception du stockage Cigéo et des installations de surface retenues par l'Andra. Les incertitudes sur le comportement différé du massif devront être prises en compte pour la conception des alvéoles HAVL et pour les scellements. La Commission recommande de progresser au plus vite vers une synthèse des mesures en place et l'élaboration d'un modèle hydro-thermo-mécanique prédictif robuste, indispensable pour l'ingénierie. Elle souligne que, pour satisfaire à l'obligation de réversibilité imposée par le législateur, des essais de scellement à l'échelle 1 devront être réalisés. Or, ils ne pourront être effectués que dans un projet mené conjointement dans le laboratoire souterrain et dans une partie dédiée du stockage lui-même.

L'Andra prévoit une construction progressive du stockage. La première tranche de Cigéo est destinée à réaliser les installations nécessaires au démarrage de l'exploitation et à recevoir un premier contingent de déchets. L'examen en 2015 de la demande de création du stockage sera un jalon important ; il offrira à la Commission l'occasion de vérifier si des réponses satisfaisantes auront été apportées aux questions posées dans le présent rapport. Si ce n'était pas le cas, la Commission recommandera de surseoir à l'autorisation de création.

L'inventaire des colis de déchets à prendre en compte pour dimensionner le stockage Cigéo a été élaboré conjointement par l'Andra, Areva, le CEA et EDF. Conformément à la loi de 2006, le stockage direct des combustibles usés, à l'exception des combustibles du réacteur à eau lourde EL4, n'est pas prévu dans cet inventaire. S'il devait l'être à l'avenir, plusieurs dizaines d'années d'entreposage des combustibles, après leur déchargement des réacteurs, seront nécessaires à leur refroidissement. Aussi bien leur prise en charge dans Cigéo devra faire l'objet d'une enquête publique pour modifier le décret d'autorisation.

A l'exception des bitumes, les colis envisagés pour la première phase du stockage bénéficient d'un niveau de connaissance satisfaisant. Les colis de boues bitumées soulèvent de nombreux problèmes spécifiques. Compte tenu des connaissances actuelles, les incertitudes sur leur comportement, notamment à court terme, en cas d'incendie, conduisent à recommander de ne pas les prévoir pour la première phase d'exploitation d'un stockage. Pour se prononcer de manière définitive, la Commission exige de recevoir pour décembre 2014 une démonstration en vraie grandeur avec une analyse de sûreté du comportement en stockage du colis primaire et de son conteneur, dans les conditions les plus pénalisantes. L'analyse de sûreté doit être faite conjointement par le CEA et l'Andra. Si la démonstration n'était pas convaincante, la Commission recommanderait d'étudier, avant toute décision, des modes de traitement qui pourraient être appliqués aux bitumes pour les transformer en d'autres déchets ultimes.

Dimension internationale

En soutenant, en 2012, plus de 60 projets dédiés à optimiser les solutions techniques ou à la formation dans le domaine des déchets à vie longue ou celui des nouveaux concepts de réacteurs, l'Europe montre la grande importance qu'elle y attache.

La France participe à 53 de ces projets. L'Andra se concentre logiquement sur les projets qui ont trait à la gestion et au stockage des déchets. Le CEA mène la recherche concernant les nouveaux concepts de réacteurs. Le CNRS est particulièrement actif dans la recherche sur les systèmes sous-critiques refroidis au plomb et sur la conception de l'accélérateur qui les pilote.

Alors que les principaux organismes français acteurs du nucléaire (Andra, Areva, CEA, CNRS, EDF, IRSN) contribuent à une large part (53) des projets internationaux (60), on note leur faible participation aux projets européens qui traitent des aspects sociétaux ou de l'implication des parties prenantes.

LIMINAIRE

La question des déchets n'est pas séparable de celle de l'ensemble du cycle nucléaire, ni des choix de filières de réacteurs à l'origine des déchets à gérer. Le problème des déchets nucléaires est donc un problème de l'ensemble du cycle et doit être traité comme tel.

Suite au débat sur la transition énergétique, les décisions qui seront prises, y compris sur les réacteurs existants, devront prendre en compte leurs répercussions – du point de vue de la gestion des déchets – sur la stratégie de retraitement, sur les nouvelles filières de réacteur, sur leur mise en œuvre pour le recyclage du plutonium et la transmutation éventuelle des actinides mineurs, et sur le projet de stockage géologique.

ACTIVITÉS DE LA CNE2

La période de novembre 2011 à octobre 2012 est la 5^{ème} année de plein exercice de la CNE2 ; elle fait l'objet du présent rapport n° 6. Depuis la publication de son précédent rapport en décembre 2011, la Commission a présenté son rapport n° 5 à différentes instances, au premier rang desquelles l'Opecst et les départements ministériels. Une délégation de la Commission s'est également rendue le 13 mars à Ligny-en-Barrois dans la Meuse, pour présenter son rapport aux membres du Clis de Meuse/Haute-Marne.

* * *

La Commission a suivi la même méthode de travail que les années précédentes. Elle a procédé à 16 auditions, dont 6 d'une pleine journée 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 93 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. Le programme Pacen du CNRS étant en refondation², la Commission a reporté à l'exercice suivant l'examen de ses résultats.

Cette année, la Commission a visité des installations du site d'Areva à La Hague ainsi que l'installation Guinevere³ au SCK•CEN de Mol en Belgique.

6

Pour préparer ce rapport, la Commission a tenu un pré-séminaire de 2 jours, à l'occasion de sa visite à Mol, 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.

* * *

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.

Conformément à sa mission, la Commission poursuit son observation du panorama international. Les principaux éléments sont reportés dans le chapitre 3 et l'annexe VI.

² Needs (Nucléaire : Énergie, Environnement, Déchets, Société) est le nouveau programme.

³ Generator of Uninterrupted Intense NEutrons at the lead VEnus Reactor.

A la demande du CLIS de Meuse/Haute-Marne, la Commission a reçu dans ses bureaux une délégation du CLIS et le Président de l'Institut américain pour la recherche sur l'énergie et l'environnement (IEER). Ce dernier a exposé sa démarche d'expertise des recherches menées par l'Andra dans le laboratoire souterrain et les principales conclusions d'un rapport demandé par le CLIS, remis à ce dernier en février 2011. L'analyse que la Commission a faite de ce rapport est reportée en annexe IV. Suite à sa visite du site de Stocamine en mars 2011, la Commission a tiré quelques enseignements sur la réversibilité d'un stockage profond, présentés dans l'annexe V.

Enfin, dans la perspective du débat national sur l'énergie, la Commission a transmis en septembre 2012, à l'Opecst, un avis qui résume sa position sur deux thèmes majeurs qui gouvernent actuellement la problématique des déchets nucléaires : d'une part leur stockage en couche géologique profonde, d'autre part l'optimisation de la gestion des déchets futurs que produiraient des réacteurs de 4^{ème} génération. Cet avis figure en tête du présent rapport.

L'année 2012 constitue un rendez-vous majeur pour les acteurs de la loi. Suivant les dispositions de la loi du 28 juin 2006, le Programme national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR) leur a en effet fixé les échéances suivantes :

- **31 décembre 2012 au plus tard** : *"L'Andra remet aux ministres chargés de l'énergie, de la recherche et de l'environnement le dossier de support à l'organisation du débat public"* qui aura lieu avant le dépôt d'une demande d'autorisation de création d'un site de stockage géologique profond.
- **31 décembre 2012 au plus tard** : le CEA remet aux ministres en charge respectivement de l'énergie, de la recherche et de l'environnement, un dossier faisant état du bilan des recherches sur la séparation-transmutation.

A la date de rédaction du présent rapport (mi-octobre 2012), il était trop tôt pour que la Commission puisse avoir connaissance de ces dossiers. Elle a donc établi ses avis à partir des informations recueillies pendant les auditions, mais n'a pas à ce stade rédigé d'annexes techniques, en l'attente de contenus qui lui seront transmis fin 2012.

* * *

Chapitre 1

SÉPARATION-TRANSMUTATION

1.1. INTRODUCTION

Pour fabriquer le combustible des Rep, réacteur électrogène, une phase d'enrichissement de l'uranium naturel en uranium 235 est nécessaire. L'uranium appauvri résiduel fait l'objet d'un entreposage industriel. Les combustibles usés de ces réacteurs contiennent de l'uranium, du plutonium, des produits de fission et des actinides mineurs. La France a choisi la stratégie de séparation et retraitement : produits de fission et actinides mineurs sont vitrifiés en vue de leur stockage profond ; le plutonium, qui a une valeur énergétique, est utilisé sous forme d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium (Mox) dans les réacteurs du parc actuel. Cependant, en pratique, le plutonium ne peut y être recyclé qu'une seule fois, alors qu'il peut être recyclé indéfiniment en réacteur à neutrons rapides. L'utilisation du plutonium dans les Mox utilisés par les Rep n'est donc qu'une étape transitoire de la stratégie française de retraitement qui s'inscrit en fait dans la perspective de la mise en œuvre de réacteurs à neutrons rapides.

Dans ces réacteurs, le plutonium ainsi que l'uranium issu de l'enrichissement et du retraitement constituent les éléments d'un combustible indépendant de tout approvisionnement extérieur. Ces réacteurs permettraient en outre d'envisager la transmutation de certains actinides mineurs, notamment l'américium.

Dans ce contexte, la loi de 2006 demande de mener les recherches sur la séparation et la transmutation en relation avec les E&R sur les nouvelles générations de réacteurs (RNR et ADS⁴). L'étude des ADS est menée dans un cadre européen avec le projet Myrrha. En matière de RNR, le CEA a engagé, avec ses partenaires EDF et Areva, des E&R pour développer et mettre en œuvre le prototype industriel de réacteur à neutrons rapides appelé Astrid.

Le présent chapitre fait le point sur l'état de l'art tel qu'il a été présenté à la Commission au cours de l'exercice 2011-2012, en l'attente du dossier que le CEA doit remettre à la fin 2012 pour que le Gouvernement dispose d'une évaluation des perspectives industrielles de ces filières.

1.2. SÉPARATION

Depuis la loi de 1991, le CEA a développé et conduit un programme important d'E&R sur la séparation et la transmutation des éléments radioactifs à vie longue, qu'il a poursuivies et complétées dans le cadre des dispositions de la loi du 28 juin 2006.

De nouvelles molécules aux propriétés extractantes ont été créées. Leur synthèse peut être réalisée à l'échelle industrielle. Ces molécules sont stables et elles résistent à la radiolyse dans les conditions réelles de mise en œuvre des séparations.

⁴ Accelerator Driven System.

Les procédés de séparation (colonnes, colonnes pulsées...) ont atteint un niveau de maturité incontestable. Le CEA dispose d'un ensemble unique de procédés, brevetés, permettant de répondre aux diverses stratégies de séparation des actinides (uranium, plutonium, américium, neptunium, curium) ou de séparation des groupes d'éléments (produits de fission, groupes d'éléments contenant uranium et plutonium et/ou actinides mineurs) pour répondre à des exigences liées à leur mise en œuvre.

Les combustibles Mox destinés aux futurs RNR diffèrent notablement des combustibles Mox utilisés dans les Rep et fabriqués à l'usine Melox. Pour développer à l'échelle industrielle le multi-recyclage du plutonium issu des Mox utilisés dans les RNR, le CEA a lancé un ensemble d'études en vue de séparer les matières valorisables (uranium et plutonium) et les utiliser pour fabriquer un combustible neuf. Le pilotage des procédés, appliqués à des combustibles Mox utilisés dans les Rep, a été validé. C'est un acquis important qui établit la faisabilité du retraitement de ces combustibles et donc la disponibilité du plutonium qu'ils contiennent pour l'élaboration du combustible de futurs RNR. De même, des solutions mimant celles qui seraient obtenues par dissolution de l'ordre d'un kilogramme de combustible RNR irradié, ont été traitées avec succès et permettent de montrer que le plutonium pourrait être isolé pour être multi-recyclé. Ceci démontre l'applicabilité des molécules extractantes et des techniques séparatives, mises au point par le CEA, à l'ensemble des combustibles Mox irradiés provenant des Rep (EPR compris) et de futurs RNR.

Enfin les effluents issus des opérations de séparation ont été caractérisés ; leur traitement et leur conditionnement continuent à faire l'objet d'E&R. Ainsi, afin de satisfaire aux exigences d'un éventuel stockage profond de l'iode, plusieurs matrices font l'objet d'investigations.

1.3. TRANSMUTATION

Il existe aujourd'hui une alternative pour la mise en œuvre de la transmutation des actinides : les ADS, dont un projet européen Myrrha auquel participe la France, et les réacteurs à neutrons rapides, dont Astrid, projet français.

1.3.1. ADS

Les ADS constituent un moyen potentiel pour transmuter les actinides mineurs. Les E&R sur les ADS sont actuellement menées dans le cadre du programme européen Myrrha, qui vise à construire un prototype de faible puissance à Mol (Belgique). Les équipes belges du SCK•CEN, associées à celles d'Areva, du CEA et du CNRS, jouent un rôle moteur dans ce projet qui n'est qu'un tout premier pas vers la réalisation d'un ADS industriel.

Le projet Myrrha est l'aboutissement d'une décennie de projets européens (IP-Adopt, Pateros, Eurotrans, Arcas) ayant développé une stratégie de la séparation et de la transmutation des actinides. Cette stratégie repose sur une mise en œuvre d'ADS, à l'échelle européenne, qui permettrait de transmuter les actinides générés par les réacteurs européens.

La construction d'un accélérateur de puissance destiné à piloter un réacteur sous-critique est un projet très innovant. Les expériences réalisées ont montré sa faisabilité scientifique. Dans le cadre du programme Myrrha, les équipes du SCK•CEN exploitent actuellement l'installation Guinevere. Cette expérience-maquette a pour but de valider les procédures de contrôle et de surveillance d'un réacteur sous-critique et d'étudier les différentes configurations de cœur envisagées pour Myrrha.

Associés à un parc de Rep en fonctionnement, les ADS ne sont pas susceptibles de fermer le cycle du combustible sans l'utilisation simultanée de RNR aptes à consommer le plutonium issu du retraitement du combustible irradié des Rep (12 Kg Pu/TMLI⁵).

En effet un ADS de 385 MWth pourrait multi-recycler les 2,5 tonnes de plutonium engagés au démarrage dans son combustible, mais cette quantité ne représente qu'une partie du plutonium total qui serait disponible. Les teneurs en plutonium et en actinides mineurs du combustible sont élevées. Il en résulte que le retraitement du combustible irradié n'est pas une simple transposition de celui mis au point pour les RNR, car la chimie et la radioprotection devront être spécifiques.

Pour fermer le cycle du combustible en utilisant des ADS pour la transmutation des actinides mineurs, il faut donc gérer la majeure partie du plutonium issu du retraitement du combustible et cela implique la mise en œuvre de la "double strate" :

- Les combustibles d'un parc de Rep sont traités pour séparer l'uranium, le plutonium, les actinides mineurs et produits de fission. Les actinides mineurs sont transmutés dans des ADS.
- Le plutonium est partiellement consommé au démarrage des ADS et la majeure partie est convertie en combustible pour RNR.

Enfin, un ADS pourrait produire l'énergie nécessaire au fonctionnement de l'accélérateur qui lui est associé.

1.3.2. Astrid

1.3.2.1. Sûreté et spécificités technologiques

Si la possibilité de transmutation du plutonium dans un RNR a été établie dans le réacteur Phénix, il faudra démontrer que l'outil qui sera utilisé à l'avenir satisfait aux exigences de sûreté de 2040.

L'évolution la plus importante concerne le changement de référentiel de sûreté du réacteur. En effet, pour toute réalisation postérieure à Flamanville III, un référentiel de sûreté cohérent avec celui des réacteurs de 3^{ème} génération et incluant le retour d'expérience de l'accident de Fukushima sera requis. Ce changement de référentiel ne se traduit pas par de simples ajustements à la marge ; il implique souvent de véritables ruptures pour obtenir un gain d'un ordre de grandeur sur les probabilités de fusion du cœur ou de contamination externe. Il intègre le retour d'expériences des réacteurs dans le monde.

Avec Astrid les avancées les plus significatives proposées par le CEA dans le cadre de collaborations très larges réunissant de nombreux industriels (Areva, EDF, Alstom, etc.) concernent :

- ❖ Une réduction de la probabilité de fusion du cœur :
 - Un cœur à faible perte de réactivité pendant tout le cycle permet un enfoncement réduit des barres de contrôle en fonctionnement, ce qui rend l'accident de remontée intempestive d'une barre maîtrisable ;

⁵ Tonne de métal lourd initial.

- Un cœur dont la réactivité liée à une vidange du sodium est rendue très faible, voire négative, et qui est doté d'un coefficient Doppler favorable. Le cœur ainsi conçu permet d'éviter des dégagements fortement énergétiques lors d'une éventuelle perte de débit ou de source froide ou d'alimentation électrique ;
 - Un système de diagnostics s'appuyant sur l'acquisition et le traitement en ligne des signaux des différents capteurs et utilisant les techniques les plus récentes de traitement du signal.
- ❖ L'élimination du risque de dégagement énergétique important lors d'éventuelles réactions sodium-eau, soit par l'usage d'échangeurs modulaires, soit par le recours à un gaz inerte (azote) dans le circuit tertiaire, en aval des deux premiers circuits de refroidissement au sodium ;
- ❖ Un renforcement de l'enceinte qui réduit la probabilité de rejets radioactifs ou chimiques à l'extérieur, avec un niveau de sécurité-sûreté au moins égal à celui de l'EPR :
- Un dispositif de récupération du corium muni d'un système de refroidissement, permettant d'éviter la contamination du sous-sol et de l'environnement ;
 - Une conception du bâtiment réacteur avec patins antisismiques ;
 - La prise en compte des agressions internes, externes, et des chutes d'avion.
- ❖ Une inspection en service plus performante pour laquelle des développements importants sont en cours au CEA, EDF, Areva et Comex (amélioration de la fiabilité de nouveaux capteurs sous conditions extrêmes de température et d'irradiation).

Expertise et connaissances acquises

La faisabilité scientifique de la transmutation de l'américium a été prouvée au CEA par l'analyse de quelques aiguilles contenant des actinides mineurs et irradiées dans différents réacteurs européens : Phénix avant son arrêt définitif ; HFR à Petten (Pays Bas) et RBE à Halden (Norvège), réacteurs à haut flux permettant d'irradier des aiguilles de faible dimension, chargées en actinides. Il convient de noter que les conditions de fonctionnement de ces réacteurs ne sont nullement représentatives de celles de RNR électrogènes ; c'est donc dans un prototype de RNR qu'il faut établir la faisabilité industrielle de la transmutation. Compte tenu des connaissances actuelles c'est l'américium, parmi les actinides mineurs, qui devrait faire l'objet des premières expérimentations en réacteur. S'agissant du curium, les acquis scientifiques et technologiques ne permettent pas à ce jour d'envisager leur transmutation sans la mise œuvre de moyens très lourds pour assurer une radioprotection efficace des travailleurs.

La mise en œuvre :

A côté de sa fonction de réacteur électrogène fonctionnant avec du plutonium et de l'uranium appauvri, Astrid permettra de transmuter l'américium, sans modification de sa conception. Ainsi, dans l'hypothèse du déploiement industriel d'un parc de RNR, il ne serait pas nécessaire de recourir à un réacteur de conception dédiée pour transmuter l'américium.

Deux modes distincts pourraient être envisagés pour introduire, dans le réacteur, l'américium à transmuter⁶ :

⁶ Les sections efficaces encore insuffisamment connues en 1991 ont été mesurées et les nouvelles valeurs ont été introduites dans les codes de calcul destinés à estimer les rendements de transmutation.

- Mode homogène, qui consiste à n'introduire, pour des raisons de sûreté, qu'une petite quantité d'américium (2 à 3 %) dans le cœur du réacteur. Le mode homogène présente l'avantage d'une irradiation optimale par les neutrons et fournit donc un haut rendement de transmutation. Il exige la manipulation d'américium, à toutes les étapes de fabrication et de traitement du combustible, et donc des installations lourdes dédiées ;
- Mode hétérogène, qui autorise des couvertures chargées à hauteur d'une dizaine de pourcent d'américium. On place alors l'américium à transmuter en périphérie du cœur. La mise en œuvre de ce mode de transmutation requiert des installations dédiées à la manipulation de l'américium pour la fabrication des couvertures et pour leur retraitement après refroidissement dans un bain de sodium.

La comparaison des deux modes, homogène ou hétérogène, semble se faire en faveur du mode hétérogène en raison de la complexité de la gestion d'un cœur (U, Pu, Am) comparée à la gestion de couvertures chargées. Dans l'hypothèse d'un parc homogène de RNR déployés à la fin du siècle qui utiliserait 900 t⁷ de plutonium, la totalité de l'américium engagée dans les diverses phases du cycle serait de 100 tonnes ; alors le mode hétérogène permettrait de ne pas charger tous les réacteurs en américium.

Bien qu'il soit difficile d'établir des coûts, on estime que le coût de la seule transmutation de l'américium serait d'un poids équivalent à celui du stockage géologique de tous les déchets, à mettre en regard du gain sur l'emprise du stockage et des volumes excavés.

1.3.2.2. Démonstration de la faisabilité industrielle

Grâce aux avancées scientifiques et techniques réalisées depuis 2006, la construction d'un réacteur prototype de 4^{ème} génération, innovant et répondant à des exigences de sûreté supérieures à celles de l'EPR (3^{ème} génération), est aujourd'hui techniquement possible. Cette avancée technologique est majeure car les réacteurs Phénix et Superphénix ainsi que toutes les autres réalisations dans le monde telles que BN 600 et BN 800 en Russie ou le PFBR 500 indien se sont conformés à une référence inférieure de sûreté.

Pour maintenir et utiliser au mieux les expertises et les compétences développées depuis de longues années en France, il faudrait conduire un ensemble d'actions indispensables et dont la séquence pourrait être la suivante :

Matériaux pour Astrid :

Les innovations essentielles pour Astrid portent sur les matériaux du cœur. Les matériaux de structure (cuve etc.) bénéficient du retour d'expériences de Phénix et Superphénix.

Astrid présentera des taux de combustion élevés, donc des doses d'irradiation importantes. Les solutions proposées pour obtenir un coefficient de vide négatif, et donc une sûreté accrue, nécessitent une excellente stabilité dimensionnelle du cœur. Pour ce faire, il est important de disposer de matériaux de cœur, et en particulier de matériaux de gainage, qui présentent une bonne stabilité vis-à-vis du gonflement. Les études en cours sur les matériaux de gainage de types AIM1 et son évolution AIM2 permettent de disposer d'un matériau de référence qui remplit ce cahier des charges, mais leur usage est limité à des doses de 130 déplacements par atome (dpa)⁸.

⁷ Cf. rapports n° 4 et n° 5, 2004 et 2005.

⁸ Unité de dose pour exprimer les dégâts d'irradiation.

Pour atteindre des taux de combustion plus élevés, et par conséquent des doses d'irradiation plus importantes (jusqu'à 180 dpa), des études ont été lancées sur des aciers ferritiques renforcés par dispersion d'oxyde (ODS). Elles portent sur l'élaboration, la mise en œuvre, la tenue à chaud et la résistance au gonflement. Au contraire des matériaux AIM2 qui constituent une simple évolution des alliages AIM1, les alliages ODS sont une solution très innovante qui nécessite un programme de recherche approfondi. Il passera par une recherche fondamentale sur le rôle des interfaces dans les dommages d'irradiation et sur les spécificités des fortes doses.

Les matériaux de gainage relevant de la catégorie "matériaux consommables", les questions de la fiabilité industrielle et du développement de l'outil de fabrication en fort tonnage sont cruciales ; elles devraient être très rapidement prises en compte. Le calendrier, prévoyant le transfert industriel en 2020, est bien adapté : il doit être impérativement respecté.

Les alliages de vanadium ou les composites tressés SiC⁹/SiC, solutions alternatives aux ODS, ne sont ni au même degré d'avancement dans la compréhension, ni dans le même calendrier de réalisation. Les alliages de vanadium, comme tous les matériaux métalliques réfractaires, présentent de sérieux problèmes de tenue à l'oxydation. Les solutions basées sur le tressage de composites SiC/SiC associés à un "liner"¹⁰ métallique assurant l'étanchéité, sont plus qu'innovantes ; elles constitueraient une véritable rupture technologique. Les problèmes attendus liés aux dilatations différentielles et aux dommages d'irradiation dans le matériau massif aussi bien qu'aux interfaces, font de cette solution une potentialité à très long terme qui doit être traitée comme telle en termes de priorités dans des programmes aux calendriers très serrés.

La Commission recommande de mettre en première priorité les études et recherches sur les AIM2 et les ODS.

Passage à la réalisation du projet :

Parallèlement à la mise au point des matériaux et à la construction du réacteur Astrid, il est indispensable de conduire les actions suivantes :

- Construction d'un pilote de retraitement et d'une unité de fabrication du combustible afin de démontrer la maîtrise, en vraie grandeur, de toutes les opérations industrielles, à savoir que le réacteur Astrid, électrogène, peut être effectivement alimenté par le plutonium issu du retraitement de son combustible usé, auquel on ajoute de l'uranium appauvri ;
- Évaluation, du point de vue de la radioprotection, des diverses opérations de transport, chargement, déchargement, mise en « piscine » sodium puis eau, et de leurs incidences sur les diverses conceptions.

Pour pouvoir en outre mettre en œuvre la transmutation de l'américium, il serait indispensable de conduire les actions suivantes :

- Construction d'une unité de fabrication et de retraitement des couvertures chargées en américium ;

9 Carbure de silicium.

10 Chemisage d'enrobage du composite.

- Mise au point industrielle de la séparation ExAm permettant :
 - d'isoler l'américium contenu dans le combustible irradié d'Astrid,
 - d'isoler l'américium par le traitement des couvertures chargées irradiées.

La loi du 28 juin 2006 dispose que "Les études et recherches [sur la séparation et la transmutation des déchets radioactifs] sont conduites en relation avec celles menées sur les nouvelles générations de réacteurs nucléaires mentionnées à l'article 5 de la loi n° 2005-781 de programme fixant les orientations de la politique énergétique..."

La Commission considère que l'engagement, sans délai, du programme décrit ci-dessus permettra seul de réunir les connaissances scientifiques, technologiques et industrielles, indispensables pour, sur une base rigoureuse, satisfaire aux demandes de la loi du 28 juin 2006.

Ne pas lancer ce programme risque de fermer définitivement la gamme des choix.

1.3.3. Scénarios de RNR associés à un parc de Rep

Aujourd'hui le parc de réacteurs nucléaires électrogènes français est constitué uniquement de Rep. Une partie de ce parc utilise du Mox pour combustible, ce qui permet de réaliser une économie d'uranium naturel de 20 %. Aucun RNR n'est en fonctionnement. Ce scénario peut être poursuivi tant que l'on accepte d'importer de l'uranium et de l'enrichir. Divers scénarios peuvent être envisagés pour introduire des RNR dans un parc électrogène. Le rapport n° 5 de la CNE2 (2011) décrivait un parc dans son état final, uniquement constitué de RNR. Un scénario qui introduit progressivement des RNR dans le parc est également envisageable. Il traduit l'aboutissement des études visant à utiliser les ressources que sont l'uranium appauvri et le plutonium, pour produire de l'électricité. Ce scénario de déploiement de RNR a fait l'objet d'études concertées (Areva, CEA, EDF) qui tiennent compte du parc actuel et de ses évolutions possibles. Il retient une transition en plusieurs étapes :

- le renouvellement des tranches actuelles de Rep, au rythme de leur durée de vie, par des Rep de plus en plus performants tels que les EPR assurant le mono-recyclage du plutonium (environ 15 % du plutonium issu du retraitement) et de l'uranium de retraitement ;
- le déploiement vers 2040 d'un premier palier de 8 RNR de 1 500 MWe qui, tout en étant électrogènes, permettraient d'assurer le multi-recyclage du plutonium issu du traitement des combustibles Rep Moxés accumulés à cette date, soit environ 172 tonnes de plutonium fissile ;
- dans ce scénario, les produits de fission sont séparés et vitrifiés pour aller au stockage profond, le plutonium et l'uranium de retraitement sont des ressources et les actinides mineurs sont placés en piscine pour refroidissement en attente d'une décision concernant soit leur transmutation, soit leur conditionnement pour mise en stockage profond ;
- les Rep Moxés continuant à fonctionner, le traitement de leur combustible irradié produit au maximum 3,5 tonnes de plutonium par an ; il faut donc ajouter un RNR tous les 6 ans pour utiliser le plutonium ainsi produit, ce qui conduit à une douzaine de tranches en 2080.

À l'horizon 2080, on pourrait alors utiliser le plutonium et l'uranium appauvri comme des ressources pour produire de l'électricité durant plusieurs siècles, sans recourir à l'importation d'uranium et à son enrichissement. Si au contraire la décision était prise d'utiliser les RNR pour arrêter la production d'électricité avec l'énergie nucléaire, alors les RNR seraient susceptibles de fonctionner en condition sous-générateur avec un combustible de type Capra¹¹ pour consommer du plutonium.

La Commission recommande que cette possibilité soit étudiée soigneusement.

¹¹ En effet, pour répondre à la réduction de la part du nucléaire introduite dans notre mix énergétique et éventuellement à sa suppression à l'horizon 2080, le palier d'une douzaine de tranches de RNR déployées à cette date permettrait, avec un fonctionnement de type Capra (Consommation Accrue de Plutonium dans les Rapides), de mettre en œuvre la résorption progressive de l'essentiel des matières nucléaires accumulées jusque-là.

Chapitre 2

STOCKAGES ET ENTREPOSAGES

2.1 INTRODUCTION

Pour l'élaboration de son rapport de l'année 2012, la Commission a travaillé sur la base des avancées scientifiques réalisées par l'Andra dans son Dossier 2009 et jusqu'à mi-2012 en intégrant dans sa réflexion les éléments et questionnements nouveaux apportés par la publication du projet STI par les producteurs et par la première revue de projet de Cigéo réalisée en 2011.

Pour fin 2012, l'Andra prépare le dossier pour le Débat public préalable à la demande d'autorisation de construction d'un stockage. Elle a démontré l'aptitude de la couche géologique du Callovo-Oxfordien à confiner les radionucléides sur le long terme. Les préoccupations portent maintenant sur les options de conception du stockage et sur les réponses technologiques à des questions qui se poseront pour la construction et l'exploitation de la tranche 1 du projet Cigéo.

La Commission n'a pu prendre en compte les concepts qui résulteront de la phase d'esquisse de Cigéo, n'ayant pas reçu d'informations définitives sur le sujet à ce jour.

Les résultats de son évaluation dans ce cadre sont présentés dans ce chapitre comme suit : l'inventaire de Cigéo, la caractérisation de la Zira, les travaux scientifiques (expériences en laboratoire souterrain, connaissances de l'environnement géologique, modélisation hydrogéologique, comportement mécanique à long terme, thermique, dégagement de gaz) et les avancées technologiques (alvéoles HA, scellements).

Par ailleurs la Commission a analysé, sous l'angle des conséquences sur la mise en œuvre de la réversibilité, le retour d'expérience de la situation de Stocamine, site de stockage de déchets industriels dangereux dans une couche de sel, dont la fermeture est à l'étude (*cf. annexe V*).

Enfin, la Commission s'est exprimée, à la suite de questions du Clis de Meuse/Haute-Marne, sur le rapport d'expertise de l'IEER¹² concernant les travaux de recherche réalisés par l'Andra (*cf. annexe IV*).

2.2. INVENTAIRE DE CIGÉO

Dès maintenant, 2 700 m³ de déchets HAVL¹³ vitrifiés et 41 000 m³ de déchets MAVL¹⁴ ont été produits. Dans l'hypothèse d'une durée de vie de 40 ans du parc de Rep actuel, ces chiffres seront portés à 8 000 m³ de déchets HAVL vitrifiés et 65 000 m³ de déchets MAVL qu'il conviendra de gérer.

¹² Institut américain pour la recherche sur l'énergie et l'environnement.

¹³ Haute activité et à vie longue.

¹⁴ Moyenne activité et à vie longue.

L'inventaire des colis de déchets à prendre en compte pour dimensionner le stockage Cigéo a été élaboré conjointement par l'Andra, Areva, le CEA et EDF. C'est sur lui que sera fondée la demande d'autorisation de création (DAC) en 2015.

Cet inventaire comprend les déchets produits ou à produire par les installations relevant de l'industrie nucléaire, ceux générés par les activités de recherche et ceux qui seront produits par les réacteurs en construction (EPR de Flamanville, Iter). Il est calculé pour des durées d'exploitation prises conventionnellement à 50 ans. Les déchets produits par un éventuel nouveau parc de réacteurs ne sont pas pris en compte. L'inventaire a été établi en considérant que les combustibles usés issus des Rep sont retraités. Si le retraitement devait être arrêté, tous les combustibles usés deviendraient des déchets HAVL à mettre, en l'état, au stockage profond.

Les producteurs des déchets ont défini des marges destinées à couvrir les incertitudes sur le volume des déchets anciens à conditionner ou à reprendre, sur les stratégies industrielles et notamment sur les conditionnements des diverses catégories de déchets.

2.2.1. Cas des combustibles usés

Pour la DAC 2015, la totalité des combustibles usés est supposée traitée, à l'exception de ceux du réacteur EL4 de Brennilis.

Cependant, conformément au PNGMDR 2010-2012, l'Andra, dans le cadre d'un partenariat CEA-EDF-Andra, met à jour les études sur le comportement à long terme de combustibles usés qui seraient éventuellement stockés à l'avenir sans retraitement préalable¹⁵. En outre, l'Andra vérifie que les dimensions de la descenderie, des puits et des galeries sont compatibles avec le transport au fond des combustibles usés. La conception des alvéoles et le choix de leur espacement nécessiteront des études approfondies complémentaires. Compte tenu du fort dégagement de chaleur des combustibles usés, leur stockage n'interviendrait pas avant plusieurs dizaines d'années d'entreposage après leur déchargement des réacteurs. L'Andra considère que le projet Cigéo pourra évoluer vers la réalisation de modules destinés à l'accueil des combustibles usés. Leur prise en charge devrait alors faire l'objet d'une enquête publique préalable à la modification du décret d'autorisation.

17

2.2.2. Colis prévus dans la première tranche de Cigéo

L'Andra a établi un tableau de bord permettant de suivre l'état des connaissances sur les différentes familles de colis de déchets dont le stockage est prévu durant la première phase d'exploitation de Cigéo de 2025 à 2029 définie dans le Programme industriel de gestion des déchets (PIGD).

La Commission considère que :

- *le niveau d'information sur certaines familles de colis (tels les coques et embouts, les conteneurs standards de déchets compactés, les colis de déchets vitrifiés de Marcoule) est suffisant pour envisager leur stockage en première tranche ;*
- *les incertitudes ou manques de connaissances sur les autres types de colis doivent être levés dans les cinq prochaines années pour permettre de mener l'analyse de sûreté préalable à leur stockage ;*

¹⁵ Une tonne de combustible usé contient 940 kg d'uranium, 10 kg de plutonium et 4 kg de produits de fission et d'actinides mineurs.

- *les colis de boues bitumées, prévus en option lors de la première période d'exploitation de Cigéo, soulèvent de nombreux problèmes spécifiques. Compte tenu des connaissances actuelles, les incertitudes sur leur comportement, notamment à court terme en cas d'incendie, conduisent à recommander de ne pas les prévoir pour la première phase d'exploitation d'un stockage.*

Pour se prononcer de manière définitive, la Commission exige de recevoir pour décembre 2014 une démonstration en vraie grandeur avec une analyse de sûreté du comportement en stockage du colis primaire et de son conteneur, dans les conditions les plus pénalisantes. La Commission demande expressément que le protocole d'essai lui soit présenté au préalable. L'analyse de sûreté doit être faite conjointement par le CEA et l'Andra.

Si la démonstration n'était pas convaincante, la Commission recommanderait d'étudier, avant toute décision, des modes de traitement qui pourraient être appliqués aux bitumes pour les transformer en déchets ultimes dont le comportement serait moins complexe à modéliser. Le type de conditionnement, qui devra répondre aux exigences de la sûreté, sera établi en fonction du mode de traitement retenu.

2.3. CARACTÉRISATION DE LA ZIRA

L'Andra et ses sous-traitants ont pu mener à son terme en 2012 le traitement (inversion stratigraphique et conversion en profondeur) et l'interprétation du bloc de sismique 3D dont l'acquisition sur le terrain avait été réalisée en 2010. Les résultats préliminaires basés sur les premiers traitements, incluant une migration avant sommation, ont déjà fait l'objet d'un résumé dans le rapport n° 5 de la CNE de 2011.

L'inversion stratigraphique a été mise en œuvre en utilisant plusieurs techniques d'inversion des données géophysiques. Son but était, après conversion des amplitudes sismiques en impédances acoustiques et calibration sur 3 puits de calage situés en périphérie de la Zira, d'évaluer de façon précise et continue la porosité des horizons situés au toit (Oxfordien carbonaté) et au plancher (Dogger) du Cox. Cette inversion stratigraphique a ainsi permis de détecter une structure récifale de faible extension horizontale (2 km x 300 m) dans l'Oxfordien carbonaté, et de préciser l'extension des constructions récifales d'orientation N210 déjà identifiées dans le Dogger (Bajocien), ces anomalies locales de porosité n'ayant aucune influence sur la couche d'argile du Cox, laquelle apparaît dépourvue de telles hétérogénéités.

La Commission considère que l'Andra a tiré parti au maximum des informations livrées par la sismique 3D sur la Zira. L'étude sismique a permis d'affirmer l'origine sédimentaire des hétérogénéités existant en dessous et au dessus de la couche : ces hétérogénéités, par nature, ne peuvent se propager dans le Cox. Ces informations confirment la régularité de la géométrie du Cox, sa très faible variabilité lithologique et, au niveau des interfaces avec l'encaissant, l'absence de failles pouvant traverser le Cox. La Commission estime que de nouvelles informations sur la Zira ne pourront être acquises que pendant la phase de creusement des accès au stockage, en profitant des forages verticaux prévus dans l'axe des puits d'accès. Ceux-ci permettront alors de conforter le modèle géologique 3D avant les étapes ultimes de creusement des galeries horizontales.

2.4. TRAVAUX SCIENTIFIQUES

2.4.1. Expérimentation en laboratoire souterrain

Le programme expérimental dans le laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne s'est poursuivi en 2011-2012 en mettant l'accent sur les essais technologiques ; ils sont prévus de manière à acquérir des données utiles à l'établissement de la DAC en 2014.

Des expériences sur la construction des galeries sont en cours. Un premier type d'essai vise à tester le comportement de galeries de conception rigide (expérience GCR) en auscultant des tronçons d'ouvrage équipés de différents types de soutènement : béton projeté avec cales compressibles ou béton projeté sans cales compressibles. Le revêtement est équipé, au moment de sa construction, de capteurs permettant de suivre sa mise en charge et ses déformations. Un second essai du même type, mais réalisé dans une galerie de conception souple (GCS), est programmé et permettra par comparaison avec le premier d'appréhender la relation entre déformation du terrain et chargement du revêtement.

Un alvéole HA de 40 m de longueur a été creusé avec succès dans la galerie GAN et équipé d'un chemisage instrumenté étanche à l'eau. Les buts poursuivis sont l'obtention de données sur l'évolution de l'interface argilite-chemisage (convergence du massif, vitesse de remplissage de l'annulaire par l'eau) ainsi que le test de méthodes d'auscultation notamment au moyen de capteurs à fibre optique. Une tentative de réalisation de l'insert de 10 m de longueur prévu en tête d'alvéole n'a pu être menée à son terme (arrêt à 7,5 m) à cause d'une machine de forage inadaptée.

L'essai TSS1 dans la galerie GET a consisté à tester la faisabilité et le comportement d'une saignée radiale de 30 cm de large et de 2,5 m de profondeur, qui est une des composantes des scellements en galerie. Les mesures de déformations réalisées pendant et après le creusement montrent que les parois sont restées stables.

Concernant la caractérisation de l'argilite du Cox, les expériences ont porté sur des tests de mise en charge d'un tubage de faible diamètre (~140 mm) sous l'effet de la fermeture de l'espace annulaire d'un forage orienté selon la contrainte horizontale majeure. Les résultats montrent un chargement radial en 50 à 100 jours sans impact sur la déformation du tubage. Un essai du même type est en cours mais avec un tubage chauffant pour étudier le comportement thermomécanique à 90 °C, température susceptible de régner dans la roche en présence de colis de déchets exothermiques.

Les expériences POX à Bure et HT au Mont Terri ont commencé à produire des résultats après une phase, débutée en 2009, de stabilisation et d'observation de l'eau et des gaz dégagés par la roche. L'expérience POX a pour but de tester la disparition de l'oxygène contenu dans une atmosphère en contact avec l'argilite. Les premiers résultats montrent que cet effet est obtenu en quelques jours et qu'il est accompagné d'une augmentation de la concentration en sulfate dans l'eau porale ; elle peut être attribuée à l'oxydation de la pyrite. La cinétique élevée de la disparition de l'oxygène suggère cependant que d'autres phénomènes entrent en jeu. L'expérience HT porte sur le devenir de l'hydrogène ; les résultats montrent une consommation de ce gaz largement supérieure à ce que prédisent la diffusion et la dissolution dans l'eau porale ; des tests sont en cours pour examiner la possible intervention de micro-organismes.

Le programme expérimental jusqu'en 2014 prévoit la poursuite des essais technologiques avec le creusement d'une galerie de grand diamètre (chambre de montage du tunnelier) et d'une galerie de 80 m au tunnelier pour tester la mise en place de voussoirs. Ces essais seront tout d'abord réalisés

dans la direction de la contrainte majeure puis reproduits en 2015 selon la contrainte mineure. La faisabilité d'un alvéole HA de 80 m de longueur sera également testée ; l'ouvrage sera ensuite équipé pour reproduire le comportement hydro-thermo-mécanique d'un alvéole en vraie grandeur dans le cadre du projet européen LUCOEX.

Concernant les recherches sur les scellements, seuls des tests de composants séparés (noyau d'argile gonflante, saignées hydratées) sont envisagés dans le laboratoire souterrain ; l'essai de mise en œuvre d'un scellement complet étant programmé ailleurs pour des raisons de limitation du diamètre des ouvrages dans le laboratoire.

L'expérience CDZ de compression mécanique de l'EDZ sera poursuivie pour examiner le comportement de l'EDZ après imbibition à l'eau de la zone fracturée. De nouvelles expériences de diffusion visant à étudier des transferts sur des distances pluri-décimétriques sont en cours d'examen de faisabilité et nécessitent la mise au point de méthodes de détection *in situ* des traceurs. Elles auront une durée plus longue (10 ans) que les expériences DIR déjà réalisées.

La Commission se félicite que l'Andra construise d'ores et déjà un programme de recherches qui vise à conforter les acquis scientifiques des quinze années passées. Elle note avec satisfaction que les essais dans le laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne commencent à produire des résultats utiles pour la DAC ; elle recommande la poursuite de telles expériences qui tendent à se rapprocher des conditions en vraie grandeur. Elle est également sensible à la programmation d'expériences de longue durée, qui ne pourront être réalisées que dans le stockage lui-même.

2.4.2. Comportement différé

Le comportement différé du massif doit être correctement apprécié, les ouvrages qu'on y creusera devant rester ouverts pendant 100 ans au moins. En particulier le chemisage des alvéoles HAVL et les soutènements en béton des alvéoles MAVL et des galeries de liaison doivent être, dès l'origine, correctement dimensionnés pour supporter les efforts qui s'y appliqueront à terme et permettre la réversibilité.

L'étude du comportement différé est délicate car l'argilite est un matériau complexe : hormis le fluage proprement dit, la désaturation sous l'effet de l'air de ventilation, l'évolution de la pression de l'eau contenue dans les pores, les transformations physico-chimiques et les variations de température peuvent y jouer un rôle important.

L'identification des mécanismes à l'origine du fluage, que l'Andra a confiée à un Groupement de laboratoires, a donné lieu à des travaux expérimentaux et théoriques qui utilisent des techniques à la pointe de la recherche ; beaucoup de données sur l'influence de la microstructure ont été rassemblées ; les rôles respectifs du fluage de la matrice argileuse et de la propagation des microfissures apparaissent encore mal hiérarchisés. La Commission encourage la poursuite de ces travaux.

Des essais de laboratoire en compression simple et drainés, sous des charges de 5 à 18 MPa, ce qui recouvre une grande part de la gamme des contraintes qui pourraient régner dans un stockage, mettent en évidence une décroissance initiale des vitesses de déformation qui tendent vers les valeurs de 10^{-11} s^{-1} à 10^{-10} s^{-1} (si cette tendance persistait à long terme, la déformation cumulée serait respectivement de 3 % à 30 % en un siècle, et le revêtement devrait porter une large fraction du poids des terrains). Au-delà d'une charge de 12 -13 MPa, l'endommagement est vraisemblablement couplé avec le comportement différé du massif. Les questions de la présence d'un seuil

viscoplastique, de l'influence de la contrainte moyenne, de la température et de l'existence d'un fluage secondaire à vitesse constante restent ouvertes. Un programme expérimental additionnel important est en cours.

Les observations et mesures en place dans le laboratoire souterrain constituent un ensemble impressionnant. L'Andra a montré que la technique d'excavation, la vitesse de creusement, la raideur et l'instant de pose du revêtement (expérimentation dite BPE) influencent les déformations différées. Une pose tardive entraîne une mise en charge lente du revêtement. C'est un argument dans la discussion sur l'instant de pose optimal.

Les comportements différés des galeries tracées dans les directions de la contrainte majeure et de la contrainte mineure sont très distincts. L'Andra estime que cette différence doit être mise en rapport avec la forme géométrique particulière que prennent dans chacun des deux cas les zones fracturées et endommagées. Le comportement de ces zones paraît largement responsable des déformations différées observées à la paroi. L'écart entre les convergences horizontale et verticale, bien plus important que ne le laisserait attendre l'anisotropie des contraintes naturelles, pourrait avoir la même origine. Les propriétés mécaniques globales de la zone fracturée sont par ailleurs étudiées par application d'une charge ponctuelle sur la paroi. On dispose donc de données remarquables.

Les alvéoles HAVL paraissent se déformer au moins aussi vite que les galeries, malgré un diamètre bien moindre, ce qui doit conduire à examiner soigneusement le dimensionnement des chemisages en acier destinés à faciliter l'introduction et, éventuellement, le retrait des colis.

L'Andra (avec son partenaire Ineris) et EDF ont constitué un groupe de travail pour comparer leurs modèles de comportement mécanique de l'argilite dans la perspective du dimensionnement des ouvrages. Les résultats des calculs prédictifs effectués au moyen des logiciels de l'Ineris et d'EDF présentent encore des écarts qui sont associés à des différences dans les modèles de comportement. Une difficulté supplémentaire tient à ce que la notion de modèle raisonnablement majorant, qui permet dans d'autres domaines de pallier les incertitudes résiduelles, est plus délicate à définir ici.

En conclusion, la Commission estime que le dimensionnement du revêtement des ouvrages doit reposer sur des bases scientifiques robustes. Elle apprécie positivement les travaux expérimentaux effectués par l'Andra, la collaboration établie avec EDF, et le souci de dégager une synthèse. Cependant, le comportement différé s'avérant complexe, il faut poursuivre activement les observations et leur modélisation pour progresser au plus vite, avant la DAC, en raison du rôle que doit jouer le modèle en soutien de l'ingénierie.

2.4.3. Hydrogène et chaleur dégagée

L'existence du stockage profond entraîne à très long terme (plusieurs centaines de milliers d'années) la sortie de radionucléides hors de la couche hôte du Callovo-Oxfordien. L'Andra a montré que la quantité en sera très faible. Deux autres conséquences de grande échelle de l'existence du stockage sont l'augmentation de la température de la formation géologique et la diffusion d'hydrogène dans la couche hôte.

Le calcul de l'augmentation de température dans les ouvrages souterrains et leur voisinage a gagné en précision. L'augmentation est surtout importante dans les premières centaines d'années. Le critère de température maximale de l'argilite à l'interface avec les colis (90 °C) reste inchangé. Le critère de 30 °C maximum pour les colis d'enrobés bitumineux ne laisserait pas beaucoup de marges s'ils devaient être mis en stockage profond. Les incertitudes et les marges, dans la perspective de

l'analyse de sûreté, sont mieux appréciées. La Commission a noté une tendance possible à l'allongement de la durée d'entreposage des colis les plus chauds.

L'Andra a aussi précisé l'analyse des effets thermomécaniques jusqu'à la surface du sol, dans le sens d'un vœu de la Commission exprimé dans son rapport n° 4. La chaleur produite a essentiellement pour origine (98 %) les déchets HAVL. Le modèle de calcul, réalisé avec l'hypothèse d'un comportement poro-élastique linéaire, met en évidence des soulèvements faibles de la surface du sol en raison de la dilatation thermique réduite des argilites (0,2 m après 600 ans), des contraintes de cisaillement qui n'excèdent pas 3 MPa, donc peu susceptibles d'engendrer des désordres à la verticale du pourtour des zones les plus chaudes, mais des surpressions interstitielles (dues à la dilatation thermique de l'eau contenue dans les pores et à la faible perméabilité du milieu) de l'ordre de 5 MPa. Globalement, ces résultats sont conformes à ce qu'on peut attendre ; l'Andra continue à améliorer le modèle pour réduire les incertitudes.

De l'hydrogène est engendré par certains colis MAVL et par corrosion de l'acier dans l'ensemble du stockage et notamment dans les alvéoles HAVL. L'Andra a calculé les mouvements des fluides et des radionucléides "en grand" à l'échelle du milieu géologique jusqu'à 1 million d'années au moyen d'une description enrichie des phénomènes physiques qui influencent ces mouvements. Les pressions d'hydrogène dans les alvéoles atteignent des niveaux assez élevés. A 1 million d'années, 80 % de l'hydrogène produit (de l'ordre de 6.10^9 moles) reste contenu, sous forme dissoute, dans l'eau du Callovo-Oxfordien et 1 % aurait atteint la surface après dilution dans les niveaux aquifères au-dessus du Callovo-Oxfordien.

2.4.4. Modélisation hydrogéologique

La modélisation hydrogéologique a considérablement évolué depuis le dossier 2005. L'Andra a confié en 2008 à l'Université de Neuchâtel en Suisse la tâche de construction d'un modèle mathématique de l'écoulement des eaux souterraines au sein des aquifères du Bassin parisien, qui prene en compte simultanément les transferts de fluides à l'échelle régionale du bassin tout entier et à l'échelle d'un secteur plus petit centré sur la zone de transposition. Des avancées significatives ont été présentées à la Commission en 2012.

Suivant les recommandations des évaluateurs, le modèle intègre à présent dans un outil de simulation unique le modèle régional et le modèle de secteur. Il prend en compte l'ensemble de l'information lithostratigraphique rassemblée par l'IFP pour le dossier 2005 et a été enrichi en intégrant l'information plus détaillée désormais disponible sur la zone de transposition, notamment pour ce qui concerne les niveaux perméables de l'Oxfordien supérieur. Le modèle intègre également les failles avec un niveau de détail très important sur cette zone et permet de simuler leur rôle hydraulique en distinguant les failles parallèles à la contrainte horizontale principale, *a priori* hydrauliquement conductrices, et les failles fermées orthogonales à cette contrainte, qui peuvent jouer le rôle d'écran hydraulique pour les écoulements latéraux. L'outil de modélisation construit s'appuie sur une méthode numérique en éléments finis et comprend 27 couches discrétisées en plus de 6 millions de mailles, la plupart triangulaires, dont la taille s'échelonne entre 150 m à l'échelle du secteur et 5 000 m à l'échelle régionale. L'ensemble, code de calcul et sa base de données, constituent l'outil de simulation hydrogéologique le plus élaboré jamais mis en œuvre sur le Bassin parisien.

En se référant à la situation piézométrique actuelle, l'Université de Neuchâtel a procédé à un recalage minutieux du modèle en régime permanent jusqu'à obtenir un ajustement de référence restituant avec une précision de quelques mètres les niveaux d'eau souterraine sur l'ensemble des points de contrôle disponibles, sur la zone de transposition et dans les aquifères de l'Oxfordien et du Dogger encadrant le Callovo-Oxfordien. Il s'en suit des différences assez notables sur la structure de l'écoulement par rapport au dossier 2005. Cette différence ne se manifeste que modestement dans l'Oxfordien pour

lequel l'ordre de grandeur des vitesses de transfert d'éléments en solution à partir de la Zira n'est pas modifié (1 km en 100 000 ans), mais pour lequel la position des exutoires est décalée de l'ouest vers le nord, impliquant ainsi la vallée de l'Ornain. Les différences sont plus importantes pour le Dogger pour lequel la prise en compte de nouveaux points de mesure et de l'hétérogénéité lithologique a conduit à faire converger les écoulements vers le sud en direction d'un exutoire situé dans la vallée de la Marne. Les vitesses d'écoulement ont été du même coup augmentées d'un facteur 10 (quelques kms en 100 000 ans contre 1 km en 1 000 000 ans estimé en 2005).

Le modèle après ajustement a été mis en œuvre pour tester la sensibilité au rôle des failles de la structure de l'écoulement, exercice dont il ressort que ce rôle est limité au voisinage des structures, sans effet significatif sur les directions d'écoulement et les gradients hydrauliques.

Le modèle a ensuite été utilisé pour prévoir les modifications de l'écoulement à l'échéance de 1 million d'années en fonction de l'évolution géomorphologique du bassin. Il ressort des simulations que les directions d'écoulement comme les vitesses ne devraient que très peu changer sur cette durée.

L'Andra a également exploré l'influence sur l'écoulement, de cycles climatiques incluant l'apparition d'un permafrost au moyen d'un modèle de secteur mis en œuvre par Golder Associates qui s'appuie sur des conditions aux limites extraites du modèle régional. Les résultats montrent des changements peu importants des directions d'écoulements et des modifications de l'ordre de 20 % des temps de transfert à l'exutoire (réduction pour l'Oxfordien et augmentation pour le Dogger).

L'Andra tire comme enseignement de ces simulations qu'il n'y a pas d'emplacement défavorable sur le plan hydrogéologique pour implanter un stockage dans la Zira, et que le débit molaire d'un élément très mobile comme l'iode 129, calculé au toit du Cox avec le modèle actualisé en 2012, reste proche de celui calculé lors du dossier 2005, avec même une légère diminution.

La Commission considère que, dans sa situation de 2012, le modèle hydrogéologique est parvenu à un degré de maturité très élevé. Les résultats des simulations de l'écoulement dans l'Oxfordien et le Dogger permettent d'affiner les conclusions du dossier 2005 sans les remettre fondamentalement en cause. La Commission recommande que ce modèle soit valorisé pour étudier dans la mesure du possible la migration de traceurs naturels, dans l'objectif de valider les vitesses de transfert actuellement prédites au sein des aquifères encaissants du Cox. La Commission recommande que les concepts et les résultats de ce modèle soient pleinement utilisés pour l'analyse de sûreté de Cigéo.

2.4.5. Résultats sur le forage profond

L'Andra a réalisé en 2008 le forage EST-433, implanté au cœur de la zone de transposition, avec pour objectif de mieux comprendre le rôle des formations profondes dans les transferts (transferts de fluides actuels et paléo-fluides, transferts chimiques et thermiques) et d'évaluer le potentiel géothermique du Trias.

La Commission a rendu compte des observations effectuées dans ce forage dans ses rapports précédents. Depuis, les travaux d'accompagnement menés par diverses équipes de recherche françaises (CNRS et universités) sur les échantillons de ce forage profond ont permis de mieux décrire la colonne lithostratigraphique à l'aplomb de la zone de transposition, depuis la surface jusqu'à la base du Trias, les forages de reconnaissance antérieurs n'ayant pas dépassé le Dogger.

Certains des sujets abordés n'ont pas de relation directe avec la caractérisation du site de stockage en termes de transferts et de sûreté, mais présentent néanmoins un intérêt scientifique et culturel venant en complément des informations déjà disponibles sur la géologie locale présentées de manière pédagogique dans le pavillon d'accueil du laboratoire de Bure.

Les apports des GNR Forpro et Trasse en termes de paléothermicité et paléo-enfouissement sont en revanche fondamentaux pour la connaissance du site. Les équipes des universités de Paris XI et de Lorraine ont ainsi déployé toute une panoplie de techniques de pointe (inclusions fluides, T_{max} de pyrolyse, traces de fission, etc...) pour évaluer la température maximale atteinte par les différents horizons carottés et l'âge de l'enfouissement maximum. Tous ces paléo-thermomètres convergent pour dire que le Trias, aujourd'hui à 65 °C, a enregistré des températures plus importantes par le passé, avec un pic thermique de l'ordre de 90 °C. Ces données profondes sont cohérentes avec les observations à moindre profondeur, impliquant que c'est l'ensemble de la colonne sédimentaire, et pas seulement le Trias, qui a été affecté par des températures plus importantes que les températures actuelles. Ceci permet donc d'exclure une hypothèse hydrothermale, dans laquelle des fluides exotiques chauds auraient envahi à un moment donné les réservoirs triasiques. L'explication retenue pour cette différence de 25-30 °C entre les températures anciennes et actuelles est l'érosion au cours du Tertiaire d'une épaisse série de craies du Crétacé supérieur, dont l'épaisseur aurait de fait atteint plusieurs centaines de mètres dans cette portion du Bassin de Paris.

Le Toarcien a des teneurs en Carbone organique (TOC) comprises entre 5 et 15 %, qui lui confèrent les caractéristiques d'une excellente roche mère, néanmoins encore immature pour la génération d'hydrocarbures (la profondeur du début de la fenêtre à huile étant identifiée vers 1 400 m de profondeur d'après les valeurs de la température maximale de pyrolyse). Des traces de méthane sous le sel du Keuper indiquent par contre l'existence d'un flux d'hydrocarbures plus profond, sans doute associé à la forte maturité des séries carbonifères sous-jacentes.

L'équipe de l'IRSN a aussi pu montrer l'existence de 2 systèmes fluides distincts de part et d'autre du sel triasique, tous les aquifères ayant été alimentés par des eaux météoriques, il y a quinze millions d'années pour les plus profonds, contre six millions d'années pour les moins enfouis. Cette différence d'âge peut éventuellement traduire la disparition plus ancienne de la couverture crayeuse en périphérie du bassin, où le Trias a été mis en contact de façon plus précoce avec les eaux météoriques qui ont pu le charger par rapport à son centre. Au vu des analyses géochimiques, l'essentiel des transferts élémentaires verticaux est donc bien contrôlé, dans ce secteur situé au cœur de la zone de transposition, par de la diffusion, et non de la convection.

La Commission souligne que, outre leur intérêt scientifique indéniable, les interprétations des observations dans le forage profond atteignant la base du Trias contribuent à démontrer l'absence de transferts verticaux de fluides sur la zone de transposition depuis plusieurs millions d'années, ce qui est un argument en faveur des propriétés de confinement du Cox.

2.5. AVANCÉES TECHNOLOGIQUES

2.5.1. Alvéoles HAVL

L'alvéole de stockage des colis HAVL est un trou borgne horizontal de diamètre 70 cm et d'une longueur de plusieurs dizaines de mètres. Du côté de la galerie d'accès, le trou est équipé d'un insert en acier non allié, d'une dizaine de mètres de long et de diamètre légèrement inférieur à celui du trou initial. Une fois l'alvéole fermé, l'insert contiendra un bouchon d'argile gonflante de 3 m de long, mis en place 6 ans après le dépôt des colis, et qui aura une fonction d'étanchéité. Du côté galerie, le bouchon d'argile s'appuiera sur un bouchon en béton adossé à un remblai disposé dans la galerie, l'ensemble béton et remblai ayant pour rôle de reprendre les efforts de poussée engendrés par le gonflement. De l'autre côté, emboîté dans l'insert, un chemisage métallique maintiendra le trou ouvert ; il aura permis l'introduction et permettrait le retrait éventuel des colis. A partir de sa jonction avec l'insert et en allant vers le fond de l'alvéole, le chemisage contiendra d'abord un bouchon métallique, en contact avec le bouchon d'argile, puis les colis avec le cas échéant des intercalaires pour mieux répartir la chaleur dégagée, et enfin, au fond de l'alvéole, un bouchon métallique.

La conception des alvéoles est encore en discussion et depuis 2005 elle a connu plusieurs modifications importantes :

- L'insert, qui devait être enlevé, est désormais maintenu après fermeture, ce qui présente certains avantages (il n'est pas solidaire du chemisage, ce qui rend plus autonome le comportement thermomécanique de ce dernier ; le jeu initial insert-terrains est moins épais que le jeu chemisage-terrains, ce qui limite le développement de l'EDZ en tête d'alvéole) et des inconvénients possibles (l'insert constitue une interface métallique entre les terrains et le bouchon d'argile, qui pourrait retarder la saturation du bouchon ou engendrer une perturbation chimique susceptible d'en réduire l'efficacité).
- La longueur de référence des alvéoles a été portée à 80 m, au lieu de 40 m, suite à la revue de projet Cigéo effectuée après la publication, fin 2011, du projet STI alternatif à celui de l'Andra. Cet allongement, dont la faisabilité n'est pas encore testée, comporte un risque accru de perte d'alignement qui rendrait plus difficile le retrait éventuel des colis. Ce risque doit être analysé.
- Le rôle premier du chemisage en acier allié, actuellement de 25 mm d'épaisseur, est de faciliter le placement (ou le retrait) des colis munis de patins. L'Andra a examiné la possibilité de lui donner des fonctions supplémentaires explicitées ci-dessous :

L'Andra a d'abord envisagé de lui donner une fonction d'étanchéité, au moins pendant la durée de la phase d'exploitation, pour retarder l'arrivée d'eau au contact des surconteneurs et le début de leur corrosion anoxique. La corrosion initiale, en présence d'oxygène, étant rapide, la Commission suggère d'étudier l'inertage de l'atmosphère de l'alvéole avant de le fermer. Par ailleurs, il est apparu que l'étanchéité à l'eau sur une longue durée n'est pas facile à assurer. Une étanchéité parfaite aurait l'inconvénient de créer une possible différence de pression entre intrados et extrados du chemisage, dont la résistance mécanique serait ainsi plus fortement sollicitée. L'Andra a renoncé à cette fonction.

En revanche l'Andra envisage de donner une fonction mécanique accrue au chemisage qui, dans la nouvelle conception, devrait être dimensionné pour qu'un jeu continu entre chemisage et surconteneur perdure sur toute la longueur utile de l'alvéole pendant une période longue, de l'ordre de la durée de l'épisode thermique (2 000 ans environ). Tout contact métal-métal entre chemisage et surconteneur serait ainsi évité et le surconteneur ne supporterait qu'une pression d'eau ou de gaz. Cette modification lèverait certaines contraintes, notamment relatives aux soudures, qui pèsent sur la

conception des surconteneurs. Toutefois, en tirer argument pour réduire l'épaisseur d'acier non allié des surconteneurs ne pourrait être envisagé sans des études approfondies.

Pour l'Andra, le risque de rupture du chemisage métallique est principalement associé aux efforts exercés à l'extrados par les terrains. En fait, les phénomènes qui affectent l'alvéole sont complexes. La température reste élevée pendant un millier d'années. Les essais récents montrent que le jeu initial terrain-chemisage pourrait être très vite fermé. Dans ce contexte le retour de l'eau du massif vers l'alvéole est compliqué à décrire, d'autant que la pression de l'hydrogène produit par corrosion anoxique peut atteindre des valeurs élevées et s'opposer à l'arrivée de l'eau. Même si elle est lente, il faut prendre en compte la corrosion du chemisage, plus rapide à l'extrados. Le chargement appliqué au chemisage est donc marqué d'incertitudes. L'Andra a examiné si ce chargement pourrait être à l'origine d'une instabilité du chemisage (flambage). Le calcul de l'apparition du flambage dépend considérablement des hypothèses faites sur les pressions de fluide (ou sur les contraintes transmises par le massif) à l'intrados ou à l'extrados. Le premier dimensionnement au flambage s'appuie sur des règles classiques mais il faudrait qu'il soit mieux précisé, d'autant qu'on peut bénéficier de l'expérience pétrolière où ce problème est classique.

La Commission observe que la conception des alvéoles HAVL n'est pas définitivement fixée. Elle estime qu'il est normal, à ce stade du projet, que des réflexions se poursuivent, d'autant que les premiers alvéoles ne devront être opérationnels que dans plusieurs dizaines d'années. Elle rappelle son opposition à certaines idées, comme l'ouverture de l'alvéole des deux côtés. En raison de leur impact sur la sûreté et la réversibilité, la Commission examinera attentivement les options de conception qui seront présentées dans la phase d'esquisse. Elle estime que le programme de travaux théoriques doit se poursuivre, mais que des essais à l'échelle 1, comme celui commencé dans le cadre du projet européen LUCOEX, seront nécessaires pour asseoir complètement la compréhension des phénomènes.

2.5.2. Scellements

La sûreté d'un stockage géologique repose sur trois barrières emboîtées : la barrière géologique ; la barrière ouvragée ; le colis avec son surconteneur. La barrière ouvragée utilise de l'argile gonflante, qui retarde la circulation de l'eau et retient durablement beaucoup de radionucléides, dont tous les actinides. Dans certains concepts, l'argile gonflante est placée autour des colis et constitue aussi le noyau de bouchons placés dans les puits d'accès (ou descenderies), dans les galeries et aux extrémités des alvéoles. Dans le projet français de 2005, comme dans le projet belge, on ne place pas d'argile autour des colis puisque le massif lui-même est composé d'argile.

La barrière ouvragée est donc constituée, dans le projet Cigeo, d'une part, de bouchons d'argile gonflante de 3 mètres de long placés dans les inserts en tête d'alvéole HAVL entre un bouchon métallique (côté colis) et un bouchon de béton (côté galerie) et de 50 m de long placés aux deux extrémités des alvéoles MAVL entre deux massifs d'appui. D'autre part, pour les puits verticaux, la descenderie et les galeries de liaison, elle est constituée de bouchons d'argile gonflante (scellements) de 40 m de long, de diamètre sans doute plus grand qu'envisagé en 2005, bloqués par du béton et un remblai. Pour ces dernières, les scellements sont placés de sorte à isoler notamment les deux sous-zones de stockage MAVL et la vingtaine de modules d'exploitation HAVL. Pour sortir de la couche du Cox en empruntant le réseau de galeries et puits, un radionucléide devrait donc traverser plusieurs scellements. Pour ces scellements, une perméabilité globale équivalente de 10^{-18} m² est visée (la perméabilité du massif intact est encore plus petite, de deux à trois ordres de grandeur).

La plupart de ces scellements, à l'exception des bouchons d'alvéoles, ne seront mis en place que dans une centaine d'années, ce qui laisse le temps de les perfectionner. Le principe de constitution d'un bouchon et le type de matériaux qui doivent le composer sont connus. Beaucoup de pays les étudient et contribuent à la base de connaissances. Enfin les calculs de sûreté effectués en 2005 avaient montré que, même dans l'hypothèse très pessimiste d'une défaillance généralisée des scellements, la diffusion des radionucléides par le massif du Callovo-Oxfordien restait le mode privilégié de transfert des radionucléides hors de la couche hôte.

Les bouchons assurent une certaine redondance du point de vue de la sûreté du stockage. Or, diverses modifications au concept présenté en 2005 et certaines observations faites dans le laboratoire – accroissement du diamètre des galeries de liaison, abandon du concept d'alvéole MAVL borgne, possible dégroupage de certains puits, choix d'une descenderie en plus des puits d'accès, présence d'une EDZ plus étendue que prévu – impliquent que la contribution potentielle des ouvrages au transfert des radionucléides pourrait être plus importante, tout en la maintenant à un niveau inférieur à celle du transfert par le Callovo-Oxfordien.

Une grande variété de phénomènes physiques¹⁶ sont potentiellement importants pour le fonctionnement d'un scellement. Il est donc essentiel que, au-delà des calculs et modélisations, des essais en conditions aussi proches que possible de l'échelle 1 soient réalisés. Ces essais prennent beaucoup de temps en raison de la durée de la resaturation de l'argile gonflante, de l'ordre de la dizaine d'années. De plus le laboratoire souterrain ne permet de réaliser que des essais à l'échelle ½ car les galeries sont de diamètre limité (5 m au lieu de 8 à 9 m pour les alvéoles MAVL, par exemple). Des essais, dans une zone dédiée du stockage même, seront nécessaires.

La Commission a demandé une note de conception et de dimensionnement d'un scellement, comprenant la position du problème, les objectifs, les performances attendues, des premiers éléments de modélisation et des indications sur une stratégie d'optimisation – une première étape d'ébauche, classique dans l'industrie ou le génie civil pour des ouvrages de cette importance. Des essais technologiques partiels ont été effectués par l'Andra dans le laboratoire souterrain ; certains résultats (resaturation lors de l'essai KEY) ont apporté des enseignements intéressants mais ne sont pas à eux seuls à la mesure de ce qui paraît souhaitable.

Un programme expérimental plus consistant est en préparation :

- L'essai dit SET, réalisé en surface en 2012, vise à analyser les modalités de remplissage d'une saignée (échelle ½) ; il sera suivi de TSS2, commençant à la mi-2013 et devant durer plusieurs années ; réalisé dans le laboratoire souterrain, TSS2 vise à étudier le remplissage d'une saignée complète avec resaturation artificielle ;
- L'expérience dite NSC de performance d'une portion de noyau de scellement (échelle ½), conduite dans une galerie dédiée du Laboratoire, commencera à la fin de l'année 2012 ; elle durera vraisemblablement jusqu'en 2020 et vise à suivre la resaturation de l'argile gonflante et *in fine* à estimer la perméabilité équivalente de l'ensemble du bouchon ;
- L'essai dit FSS, d'une durée de 18 mois et commençant en 2013, est orienté vers les modalités de mise en œuvre d'un scellement complet dans des conditions proches des conditions industrielles et à l'échelle 1 en diamètre ; il sera réalisé en surface ou en souterrain,

¹⁶ Existence de l'EDZ, présence possible de pressions de fluides, interactions chimiques, dont la perturbation alcaline entre l'argile, l'acier et le béton température élevée dans le cas des bouchons d'alvéoles HAVL, longue durée du processus de saturation de l'argile gonflante, nécessité d'enlever le revêtement sur plusieurs mètres, ou au moins au droit de zones dans lesquelles des saignées d'interruption de l'EDZ auraient été ménagées.

mais hors du laboratoire de Meuse/Haute-Marne. Il s'inscrit dans le cadre du programme européen DOPAS ;

- L'essai dit USC de dépose de voussoirs (enlèvement du revêtement au droit du futur bouchon) sera réalisé au premier semestre 2014 dans la galerie à -445 m.

Cet ensemble marque la volonté de l'Andra de progresser sur la question des scellements, qui constituait jusqu'ici un point faible du dossier. Un essai complet à échelle 1 tel que celui souhaité initialement par les évaluateurs ne pourra être mené à bien que dans Cigéo, et donc après réalisation de la première tranche des travaux, au-delà de 2025. L'examen du dossier de la DAC permettra d'évaluer si, en 2015, des éléments suffisants ont été apportés du point de vue de la faisabilité et des performances des scellements. En tout état de cause les incertitudes sur l'efficacité des scellements, qui subsisteront encore inévitablement, devront être prises en compte dans les calculs d'analyse de sûreté.

2.6. COÛT DU STOCKAGE

Dans son rapport de juillet 2012, la CNEF¹⁷ note que l'Andra a communiqué en 2009 aux producteurs sa nouvelle évaluation du site de stockage : 35,9 milliards d'euros. Les producteurs ont contesté l'évaluation de l'Andra ; ils ont présenté le projet STI reposant sur une approche différente et dont le coût est estimé à 14,4 milliards d'euros. L'écart entre les deux chiffrages porte à la fois sur les coûts d'investissement, les coûts de fonctionnement et le poste "divers" (impôts et taxes, R&D, assurances). Certaines divergences relèvent de considérations fiscales ou économiques, d'autres de considérations techniques ; la Commission souhaite recevoir des éclaircissements, chacun devant expliciter et justifier ses chiffres. La CNEF ne tranche donc pas entre les deux estimations mais elle se demande si les producteurs ne devraient pas, par précaution, réviser à la hausse leurs provisions. La DGEC devrait, en mars 2013, arrêter le chiffrage de l'esquisse retenue par l'Andra.

Même si, en pourcentage, le coût du stockage ne représente qu'une très faible proportion du prix de revient du kWh nucléaire, il est important que les chiffres soient connus de façon fiable au moment du Débat public car c'est un sujet très sensible pour l'opinion publique.

La Commission souhaite disposer de précisions sur la tarification qui sera mise en place pour récupérer ces coûts : tarification au moment de la réservation de capacité ? Tarification au moment du stockage ? Tarification à double composante (réservation de capacité et utilisation de la capacité souscrite) ?

La Commission souhaite avoir des informations précises sur la clef de répartition des coûts entre les différents producteurs de déchets et sur le coût d'une opération de retrait de colis en cas de mise en œuvre de la réversibilité du stockage.

¹⁷ Commission nationale d'évaluation du financement des charges de démantèlement des installations nucléaires de base et de gestion des combustibles usés et des déchets radioactifs (article 20 de la loi du 28 juin 2006).

2.7. OBSERVATION PÉRENNE DE L'ENVIRONNEMENT

L'observatoire pérenne de l'environnement que l'Andra met progressivement en place depuis plusieurs années, autour et dans la zone de transposition, a pour triple objectif de rassembler les données environnementales qui doivent être prises en compte pour la conception du stockage, dresser un état initial de l'environnement pour évaluer l'impact de la réalisation industrielle et préparer le plan de surveillance environnemental du site pour le long terme. La base de données ainsi acquise constituera une référence essentielle pour détecter toute perturbation mais aussi valider les modèles de fonctionnement de la biosphère.

Les travaux réalisés dans le cadre de cet observatoire comprennent déjà un suivi des écosystèmes de la région et du contexte climatique, une analyse de la pression anthropique sur les cours d'eau, les sols et la biodiversité, la réalisation de plusieurs sites expérimentaux, dans lesquels les études sont menées en collaboration avec des équipes scientifiques et associatives, et la création d'une écothèque assurant la conservation des échantillons dans des conditions contrôlées.

La Commission approuve et suit avec intérêt la réalisation de cet observatoire. Elle souhaite que ce remarquable effort expérimental soit valorisé par un effort soutenu de modélisations et de publications, notamment dans les domaines de la circulation atmosphérique et des cycles biogéochimiques. La Commission émet une recommandation très forte pour le soutien par les pouvoirs publics des efforts de l'Andra pour la réalisation de deux actions essentielles : une surveillance épidémiologique régionale et d'un site environnemental témoin hors de la zone d'impact du stockage.

29

2.8. ENTREPOSAGES ET INSTALLATIONS DE SURFACE

Si les recherches sur les modalités de stockage des différents déchets radioactifs dans la formation géologique profonde ont atteint, grâce en particulier au laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne, un très haut degré de sophistication, en revanche, les études sur la conception et l'implantation des installations de surface et sur les raccordements aux différents réseaux sont restées très largement embryonnaires.

Les installations de surface ne sont cependant pas un simple accessoire du stockage souterrain, elles font intimement partie du projet Cigéo, tant sur le plan de la conception technique que sur celui de l'acceptabilité du projet par les populations concernées.

Dans un environnement rural, très faiblement peuplé, elles constitueront en effet la partie visible de ce projet qui devra désormais cohabiter avec des installations industrielles, d'une ampleur inhabituelle dans la région et avec des exigences de raccordement aux différents réseaux (eau, électricité, assainissement, routes, voies ferrées...) comparables à ceux d'une agglomération de plusieurs milliers d'habitants.

Dans le cahier des charges définissant les missions confiées au Maître d'œuvre-système, en juillet 2011, il a été demandé à ce dernier de présenter, au terme de la phase d'esquisse, "une solution d'ensemble" du centre de stockage pour le début de l'année 2013. On peut donc espérer qu'à cette date sera connue une solution d'ensemble "surface" définissant avec précision, non seulement

l'implantation des installations de surface, mais aussi les principes techniques de conception et de maîtrise des risques.

Certaines ambiguïtés demeurent cependant.

Ainsi, dans le deuxième jalon des études d'esquisse, présenté par le Maître d'œuvre-système, en septembre 2012, il est indiqué qu'une zone d'implantation de la descenderie a été délimitée *"suite à l'analyse des contraintes environnementales"*.

Même s'il ne s'agit que d'une proposition, on voit mal comment le Débat public pourrait conduire à une implantation hors d'une zone qui aurait été définie selon des critères objectifs. Or, logiquement, la localisation des installations de surface aurait dû faire partie des options laissées ouvertes dans le cadre du Débat public. Il faut également noter qu'en 2009, un Comité de haut niveau avait demandé à l'Andra d'implanter la descenderie dans une zone interdépartementale de Meuse/Haute-Marne, ce qui réduit encore les possibilités de choix pour les populations concernées.

Autre difficulté qui risque d'apparaître lors du Débat public : les principes de zonage radiologique et de zonage déchets ne seront définis que lorsque les ébauches de solution d'architecture des installations de surface seront disponibles.

A l'heure actuelle, l'architecture générale de ces installations n'a toujours pas été définie et trois scénarios coexistent :

- un scénario "puits" où les installations de surface sont concentrées sur le site des puits de descente ;
- un scénario "descenderie" où ces mêmes installations sont regroupées à l'entrée de la ou des descenderies ;
- un scénario "équilibré" où les installations sont réparties entre les deux sites.

Ces trois scénarios seront présentés lors du Débat public, mais le site d'implantation devra être validé par le Gouvernement dans le courant de l'année 2013.

Les techniques d'entreposage et de manipulation qui vont être utilisées sont classiques et d'ores et déjà bien connues et éprouvées par tous les opérateurs du nucléaire ; elles nécessitent donc peu de recherches spécifiques. On peut dès lors regretter que ces aspects du projet n'aient pas été présentés par l'Andra, avant le recours au Maître d'œuvre-système, dans un schéma conceptuel qui en aurait défini les grandes lignes.

La réflexion aurait pu alors se concentrer sur les adaptations nécessaires à la desserte d'un centre souterrain de stockage telles que :

- les modalités et les caractéristiques de l'entreposage "tampon" permettant d'ajuster les arrivées de colis avec les disponibilités du stockage souterrain (lors de l'audition du 8 mars 2012 l'Andra a clairement indiqué qu'elle n'envisageait pas d'entreposage de décroissance thermique pour Cigéo) ;
- une installation destinée à recevoir les colis, les contrôler et si nécessaire, les reconditionner. Par ailleurs, cette installation, ou une installation jumelle, devra être conçue pour pouvoir reprendre des colis défectueux ;

- préserver les possibilités de mettre en œuvre, le moment venu, les modalités de manipulation et d'entreposage des colis qui devraient être retirés du stockage souterrain pour satisfaire des exigences de réversibilité ou de récupérabilité ;
- la compatibilité des installations de transfert et de descente des colis avec une éventuelle mise en stockage direct de combustibles usés.

La Commission demande à être informée sur les études d'impact et sur les coûts des installations de surface, intégrant les dépenses liées à l'alimentation en eau et en électricité et à l'adaptation des infrastructures routières et ferroviaires.

2.9. POUR UNE VUE D'ENSEMBLE DU PROJET CIGÉO

Pour réaliser le stockage géologique, il est nécessaire d'avoir une vue cohérente et systémique du projet.

Pour garantir la protection des citoyens, des travailleurs et de l'environnement, il est indispensable de clarifier la hiérarchie entre les problèmes, aussi bien pour l'entreposage, le transport, le stockage en période de réversibilité, que le stockage définitif des déchets radioactifs. La même exigence s'impose pour la transmutation des actinides qui ne seraient alors plus des déchets ultimes.

Les problèmes à considérer sont les suivants :

- De par la loi de 2006, le choix du stockage géologique profond est acquis ; la sûreté à long terme est assurée par la triple barrière "colis/ barrières ouvragées/ couches géologiques". Une connaissance approfondie des problèmes de transport des radionucléides au travers des trois barrières est indispensable. C'est elle qui permet *in fine* l'analyse de sûreté, dont le calcul de la dose à l'exutoire, garantissant que le stockage est sans danger pour le public ;
- Il est impératif d'explicitier les conséquences du choix d'une réversibilité au moins centenaire du point de vue de la sûreté, de l'ingénierie et des coûts ;
- Il faut assurer de même la protection et la sûreté pendant les phases d'entreposage et de transport. Elles appellent une prise en compte argumentée des exigences logistiques associées ;
- Il importe de peser les avantages et les risques associés à toute décision de report de tout ou partie du projet Cigéo.

Cette vision globale est indispensable à une compréhension de la cohérence du programme Cigéo et du réalisme du calendrier. Ce programme a plusieurs axes de réalisation qui doivent être traités avec le même soin :

- *Projet industriel* : l'ensemble du travail nécessaire pour réaliser les choix de conception et la construction des installations nécessaires, tant en surface qu'en profondeur, sur le site de stockage ;

- *Développement technologique* : le travail nécessaire d'industrialisation des technologies pour construire et préparer les alvéoles destinées à recevoir les colis de déchets, pour assurer la descente et le positionnement des colis, et pour, le moment venu, fermer les alvéoles, les galeries et les ouvrages d'accès. Dans le cadre de la loi, il faut aussi prévoir les techniques de récupération des colis qui seraient à mettre en œuvre pendant la période de réversibilité imposée ;
- *Support scientifique* : l'acquisition, le développement et le maintien des compétences scientifiques permettant d'assurer que, dans le long terme, les déchets ne poseront pas de problème. Cette démarche ne doit pas se contenter de recherche académique, mais accompagner étroitement le projet industriel. De plus, elles doivent intégrer les retours d'expériences du laboratoire de Meuse/Haute-Marne, des travaux de construction du stockage et des études internationales.

Ces trois axes du projet Cigéo (projet industriel, développement technologique, support scientifique) doivent être explicités et harmonisés en termes de besoins, de priorités, et de coûts, pour traiter les problématiques identifiées plus haut (sûreté à long terme, réversibilité, entreposage et transport, calendrier). Pour réaliser le projet Cigéo, il est impératif que ces trois axes soient intégrés dans un plan opérationnel et cohérent.

La Commission regrette de ne pas avoir disposé d'un schéma conceptuel, même sommaire, avant que le projet soit confié à un "maître d'œuvre-système chargé de la conception du futur centre industriel de stockage"¹⁸.

La Commission demande à l'Andra qu'elle lui fournisse un document, jetant les bases d'un plan opérationnel qui fasse concourir les conclusions tirées de l'ensemble des études effectuées (y compris celles du maître d'œuvre-système) aux exigences que les quatre problématiques identifiées imposent aux trois axes de réalisation.

¹⁸ Cf. note Andra : "Cigéo – Cahier des charges de la maîtrise d'œuvre système" – Cigéo.CC.ASMO.11.0008 – 1/7/2011.

Chapitre 3

PANORAMA INTERNATIONAL

Ce chapitre ne décrit en 3.1 et 3.2 que les données nouvelles depuis la publication du précédent rapport de la Commission (rapport n° 5). Le panorama des E&R internationales en cours sur le stockage géologique, les nouvelles filières pour la séparation-transmutation et l'enseignement, est reporté dans l'annexe VI.

3.1. CADRE LÉGAL INTERNATIONAL

La gestion des déchets radioactifs, et par extension les E&R sur la gestion des déchets, se situe dans un cadre légal national et international. Au niveau européen, la publication de la directive 2011/70/Euratom du Conseil du 19 juillet 2011 établissant un cadre communautaire pour la gestion responsable et sûre du combustible usé et des déchets radioactifs, est certainement le fait majeur intervenu depuis le dernier rapport.

La directive vise à établir un cadre juridique concernant la gestion du combustible usé et des déchets radioactifs, de 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, de 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.

3.2. LABORATOIRES DE RECHERCHE OU SITES DE STOCKAGE SOUTERRAIN

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). La Lituanie, les Pays-Bas, la Slovaquie, la Slovénie/Croatie, la Tchéquie, ainsi que plusieurs autres pays européens ont des projets pour le stockage géologique, soit individuellement, soit en collaboration avec d'autres.

▪ Allemagne

Le stockage définitif des déchets de haute activité (exothermiques) est prévu à Gorleben dans un dôme salin à une profondeur de 800 m. Malgré les résultats satisfaisants des forages en profondeur, le Gouvernement envisage, avec les consentements des Länder, une évaluation de sites alternatifs. En effet, et suite à la décision de sortie du nucléaire, le Gouvernement a l'intention de proposer une nouvelle loi concernant la gestion des déchets nucléaires et le choix de sites de stockage. 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. Après la résolution des désaccords politiques et actions en justice, les travaux continuent pour que le site soit opérationnel pour accueillir les déchets en 2019.

▪ Belgique

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.

L'intérêt et la qualité des travaux de recherche, de développement et de démonstration (R&DD) en matière de gestion à long terme des déchets MAVL et HAVL, ont été initiés en 1974 par le Centre d'étude de l'énergie nucléaire (SCK•CEN) ; ils ont été confirmés à plusieurs reprises à partir de 1976 par différentes commissions et groupes de travail chargés de se prononcer sur les études en cours.

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**

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. A ce jour, une vingtaine de municipalités sont volontaires pour collaborer au choix d'un site sur leur territoire.

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, l'ouverture étant prévue avant 2020. Le site de stockage devrait voir le jour avant 2050.

35

▪ **États-Unis**

La "Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future", instituée sous le Président Obama, a publié une liste de recommandations au Gouvernement afin de proposer des alternatives au projet Yucca Mountain au Nevada. En voici quelques-unes :

- 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 en 13 ans, sans incidents, de stocker 83 000 m³ 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 1 000 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.

- **Finlande**

Posiva Oy, qui gère les déchets radioactifs finlandais, a entrepris les travaux de construction d'un laboratoire de recherche en 2004. Le site choisi est celui d'Olkiluoto où un EPR est en construction. La demande de construction du site de stockage, dont le laboratoire, est prévue pour fin 2012. Le site accueillera les combustibles usés des réacteurs actuellement en service, ainsi que ceux de deux réacteurs à construire dans le futur. L'exploitation est prévue à partir de 2020.

- **France**

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

- **Japon**

Le tsunami, suivi par l'accident de Fukushima, a provoqué une remise en question profonde, mais pas encore stabilisée, de la politique nucléaire japonaise. 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.

Pour mémoire, 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. Une profondeur de 250 m sur 500 m est atteinte. 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 sociétaux.

- **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. Une région potentielle est celle de West Cumbria, où une décision est attendue début 2013. La région de Shepard en Cornouailles (argile) a récemment décidé de retirer sa candidature.

- **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. 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.

- **Suède**

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 en 2025.

- **Suisse**

L'Office fédéral de l'énergie (Ofen) a désigné six régions d'implantation potentielle d'un site de stockage et qui feront l'objet d'études approfondies : Südanden, Zürich nord-est, North des Lägern, Jura Est, Pied Sud du Jura et Wellenberg. Les études sont en cours et dureront quatre ans. Pour mémoire, 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. L'Andra y participe à bon nombre d'expériences à cause de la similitude entre les argiles du Mont Terri et celles du laboratoire de Bure.

3.3. SOURCES D'IRRADIATION À SPECTRE RAPIDE

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 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.

- **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?), 50-70 MWt, permet d'irradier un faible volume (diamètre 1,5 à 3 cm) à haut flux en spectre rapide.

- **Chine**

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

- **France p.m.** Osiris et RJH (en construction).

Depuis l'arrêt de Phénix, il n'y a plus de réacteur à spectre rapide disponible.

- **Inde**

Depuis 1985, l'Inde dispose à Kalpakkam du FBTR, Fast Breeder Test Reactor, de 40 MWt. Un des buts est de démontrer 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 les deux réacteurs redémarrent un jour.

- **Pays-Bas**

Le HFR à Petten permet des irradiations limitées.

- **Russie**

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

3.4. 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'années 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 l'accélérateur, peut fonctionner aussi bien en mode critique qu'en mode sous-critique. Le projet Myrrha, source d'irradiation flexible à très haut flux et spectre rapide, est entré dans la phase de l'ingénierie détaillée d'avant-projet (le "FEED").

- **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).

▪ Etats-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 ; un ADS expérimental d'une centaine de MWt (national ou en collaboration internationale) ; un ADS industriel de 800 MWt.

3.5. CONCLUSION

En soutenant, en 2012, plus de 60 projets dédiés à optimiser les solutions techniques ou à la formation dans le domaine des déchets à vie longue ou celui des nouveaux concepts de réacteurs, l'Europe montre la grande importance qu'elle y attache. La France participe à 53 projets (cf. annexe VI), ce qui montre son rôle de leader européen en R&D nucléaire. Cette forte implication est assumée principalement par le CEA et le CNRS qui participent respectivement à 34 et 20 projets, suivi par Areva et EDF avec chacun 12 projets et l'Andra et l'IRSN avec 10 projets.

L'Andra se concentre logiquement sur les projets qui ont trait à la gestion et au stockage des déchets. L'organisme est présent dans les grands forums européens et y joue souvent un rôle moteur. Bien que de façon moins prédominante, le CNRS, le CEA, l'IRSN, Areva et EDF sont également fort présents dans les projets traitant des déchets.

Le CEA mène la recherche concernant les nouveaux concepts de réacteurs. Il participe principalement aux projets sur la conception de réacteurs rapides au sodium et sur les combustibles innovants ou dédiés à la transmutation d'actinides mineurs.

Le CNRS est particulièrement actif dans la recherche sur les systèmes sous-critiques refroidis au plomb et sur la conception de l'accélérateur qui les pilote.

On peut regretter le peu de participation française aux projets européens qui traitent des aspects sociétaux ou de l'implication des parties prenantes.

Annexe I

COMPOSITION DE LA COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION NOVEMBRE 2012

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 BIRKHOFFER^{*} – Professeur émérite à la Technical University de Munich.

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

Yves BRÉCHET – Membre de l'Académie des Sciences – Professeur de Science des Matériaux, Grenoble-INP - Phelma Membre senior IUF - "Physicochimie des matériaux de structure" Adjunct Professor McMaster Université.

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 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).

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

Claes THEGERSTRÖM – Président 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.

* Expert invité.

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

Annexe II

ORGANISMES AUDITIONNÉS PAR LA CNE2

1 ^{er} décembre 2011 :	CEA – R&D du CEA dans le cadre de la loi du 28 juin 2006.
19 janvier 2012 :	CEA - Multirecyclage du Pu : innover pour générer moins de déchets et matières (fabrication, traitement).
16 février 2012 :	Andra – Stratégie de gestion et R&D pour les déchets graphites et les déchets organiques.
22 & 23 février 2012 :	Andra – Thématiques ingénierie : creusement ; ventilation ; scellement ; réversibilité.
7 mars 2012 :	CEA – Astrid : le cycle des matières d'Astrid : atelier de fabrication ; pilote de retraitement (matin).
8 mars 2012 :	Andra – Entreposages.
4 avril 2012 :	CEA – Effluents et rejets des installations : quelle R&D pour les optimiser ? Programme radiotoxicologie – Un exemple de gestion : la décontamination de l'eau à Fukushima.
5 avril 2012 :	CEA – Etudes de scénarios : retraitement à court terme ; déploiement des RNR ; Fin de vie : grands principes ; parcs ADS ; HTR.
11&12 avril 2012 :	Andra – Visite à Bure – site de surveillance de l'environnement.
13 juin 2012 :	Andra – Termes sources.
14 juin 2012 :	Andra – Stratégie observation – surveillance – Technologie des capteurs.
27 & 28 juin 2012 :	CEA – Les ADS - Bilan 2006-2012 de la R&D sur la séparation-transmutation.

* * *

19 octobre 2011 :	Rencontre avec le Président de l'IEER et une délégation du Clis.
9 novembre 2011 :	Rencontre avec KNS.
18 janvier 2012 :	Andra – Audition restreinte – Suite au rapport n° 5.
15 février 2012 :	CEA – Audition restreinte – Astrid : quelles innovations concrètes ?
7 mars 2012 :	CEA – Réunion de travail sur les bilans matières.
11 mai 2012 :	Rencontre EDF/CNE.
21 septembre 2012 :	Rencontre EDF/CNE.

* * *

VISITES DE LA CNE2

11&12 avril 2012 :	Visite à Bure – Site de surveillance de l'environnement.
18 au 20 septembre 2012 :	Visite du Laboratoire de Mol (Belgique).

Annexe III

LISTE DES DOCUMENTS TRANSMIS À LA CNE2 2011-2012

Andra

- Note "problématique liées au stockage des colis de boues bitumées dès 2025" (Réf. DP:11-0228) – novembre 2011.
- Document établi par l'Andra à destination du Clis - Commentaires sur le rapport final de l'examen critique du programme de l'Andra sur les recherches effectuées dans le laboratoire souterrain de Bure et sur la zone de transposition pour définir une Zira, préparé par l'IEER pour le Clis (mars-avril 2011) – (Réf. C.RP.ADSD.11.0090/A) - 8 décembre 2011.
- Rapport d'autoévaluation en vue de l'évaluation par l'AERES – la gouvernance de l'Andra de 2008 à 2011 – 24 janvier 2012.
- Rapport d'autoévaluation en vue de l'évaluation par l'AERES – La recherche et développement à l'Andra de 2008 à 2011 – 24 janvier 2012.
- Projet Cigéo – Maîtrise d'œuvre système – Proposition technique – partie B – Chapitre 1 – Section 1.2 – Octobre 2011.
- Projet Cigéo – Maîtrise d'œuvre système – Proposition technique – partie B – Chapitre 4 – Section 4.4 – Octobre 2011.
- Cigéo – Cahier des Charges de la Maîtrise d'œuvre système – 1^{er} juillet 2011.
- Projet Cigéo – Liste des documents applicables et documents de référence – juin 2011.
- Programme industriel de gestion des déchets – projet Cigéo – janvier 2012.
- Les essentiels - Inventaire nationale des matières et déchets radioactifs – édition 2012.
- Rapport du groupe de travail Andra-Areva-CEA-EDF-Rhodia "Optimisation des filières" – (Réf. Z RP ADMR 12-0001/A) – 9 janvier 2012.
- Compositions de solutions au contact des déchets HA et MAVL en situations de stockage - (Réf. C.NT.ASTR.12.0008) – Avril 2012.
- La thermique grande échelle, gradients, effets (thermo-convection, modifications minéralogiques) – L. Calsyn (Réf. DRD/EAP/12-0127) – 29 mai 2012.
- Couplage thermo-hydraulique gaz à l'échelle du stockage – L. Trenty (Réf. DRD/EAP/12-0130) – 29 mai 2012.
- Effets thermo-Hydrromécaniques à grande échelle – A. Pasteau (Réf. DRD/EAP/12-0132) – 29 mai 2012.
- Rapport d'avancement au deuxième jalon des études d'esquisse de Cigéo – 11 juin 2012.
- Rapport "Evaluation du risque de flambement du chemisage en acier non allié d'une alvéole HA" - 9 mai 2012.
- Document technique "Tableau de bord des connaissances sur les colis prévus dans la tranche 1 de Cigéo – (Réf. C.NT.ADMR.12.0008) – Juin 2012.
- Document technique "Compositions des solutions au contact des déchets HA et MAVL en situation de stockage (Réf. C.NT.ASTR.12.0008) - Juin 2012.
- Cigéo – Chiffrage 2012 – Organisation et méthodologie d'évaluation des coûts proposées par l'Andra – 12 juillet 2012.

- Comportement différé du Callovo-Oxfordien dans l'Unité Argileuse (Réf. : DRS/MFS/12-0075) – 11 juillet 2012.
- Transitoire (thermo)hydraulique/air-hydrogène au cours de la phase d'exploitation stockage et champ proche (Réf. : DRD/EAP/12-0158) – 11 juillet 2012.
- Les réponses de l'Andra aux questions posées par Monsieur Bérest concernant la note technique intitulée d'évaluation du risque de flambement du chemisage en acier non allié d'une alvéole HA (Réf. : DRD/DIR/12-0115).
- Version intégrale de l'édition 2012 de l'inventaire national des matières et déchets radioactifs – Juillet 2012.
- Description du suivi radiologique – Réponse à la demande complémentaire de la CNE suite à l'audition du 13 juin 2012 (Réf. : C.RP.ASOS.12.0128) – 31 août 2012.
- Démarche de hiérarchisation des paramètres d'observation – surveillance (Réf. : C.RP.ASOS.12.0129) – 31 août 2012.
- Rapport d'avancement présentant les trois solutions d'ensemble retenues pour la suite des études d'esquisse de Cigéo (Réf. : CG.NSY.ADSD.12.0040) – 3 septembre 2012.
- Plan d'ensemble Terminaison Fond, solution 1, 2 et 3 – Septembre 2012.
- Document technique – Modélisation/simulation des comportements Hydraulique et Hydromécanique des scellements – Synthèse et analyse critique – Eléments de progrès en vue de la DAC (Réf. : CGNTAEAP120076) – Juillet 2012.
- Document technique - Les options de conception des scellements – Projet Cigéo (Réf. : CG.NT.ADPG.12.0010) – 5 juin 2012.
- Note sur les études de l'Andra relatives au stockage direct de combustibles usés – 25 septembre 2012.

CEA

- Les réacteurs nucléaires expérimentaux – Monographie de la Direction de l'énergie nucléaire – 9 février 2012.
- La lettre de l'I-Tésé n° 16 – Été 2012 – Juillet 2012.

Annexe IV

ANALYSE DU RAPPORT DE L'IEER

L'institut américain pour la recherche sur l'énergie et l'environnement (IEER) a, à la demande du comité local d'information et de suivi du laboratoire de Bure (CLIS), procédé à un examen critique des recherches menées par l'Andra dans le laboratoire souterrain et sur la zone de transposition. En prévision de sa réunion annuelle avec le CLIS le 13 mars 2012, la Commission a pris connaissance du rapport final de l'IEER et rencontré son directeur en octobre 2011. L'IEER a ainsi pu exposer sa démarche d'expertise, en souligner les conclusions importantes et répondre aux interrogations de la CNE. La Commission a alors fait part à l'IEER de questions additionnelles qui devaient faire l'objet d'une réponse écrite - non encore parvenue à ce jour. Lors de la réunion du 13 mars 2012 avec le CLIS, la Commission a donc proposé de différer au présent rapport ses commentaires sur l'étude de l'IEER.

La Commission a apprécié l'exposé des points de vue de l'IEER qui apporte un éclairage extérieur sur les travaux de l'Andra en se plaçant dans un cadre méthodologique différent de celui défini par la doctrine française. La Commission reprend ci-dessous en les commentant les points essentiels de l'expertise de l'IEER.

Calendrier trop tendu

L'IEER a estimé que, "compte tenu des recherches et caractérisations qui restent à faire", le calendrier actuel était "beaucoup trop tendu" (p.13).

Le calendrier défini par les deux lois de 1991 et 2006 relatives à la gestion durable des déchets radioactifs a été respecté à la lettre jusqu'à ce jour, de sorte que le programme français est dans un état d'avancement comparable à ceux de la Suède et de la Finlande. Le respect du calendrier est conforme à la politique de la France qui, en matière de protection de l'environnement, s'interdit de transférer des charges indues aux générations suivantes .

Il faut toutefois examiner, sur le fond, si les objectifs assignés ont été jusqu'ici remplis.

La formation géologique du Callovo-Oxfordien a été soigneusement reconnue par l'Andra. Elle présente un ensemble de caractéristiques favorables, dont une stabilité géologique depuis plus de 100 millions d'années, l'extrême lenteur qui y caractérise les circulations d'eau, et des propriétés chimiques favorables à la rétention de la totalité des actinides mineurs et de la plupart des autres radionucléides. À ce jour, les investigations n'ont mis en évidence aucun indice de quelle que nature que ce soit qui fasse craindre un risque rédhibitoire pour la sécurité du stockage.

La Commission juge aussi que l'Andra a abordé l'examen de tous les problèmes importants du point de vue de la sûreté d'un stockage. Des questions subsistent inévitablement. L'examen du dossier de demande d'autorisation de création du stockage profond, à instruire en 2015, offrira l'occasion de vérifier si des réponses satisfaisantes y ont été apportées. Si ce n'était pas le cas, la CNE conseillerait qu'on prenne le temps d'un approfondissement des études.

Certaines questions ne trouveront d'ailleurs une réponse plus complète que lorsque les travaux d'excavation auront atteint les niveaux Callovo-Oxfordiens sous la Zira, vers 2025. Il s'agira notamment :

- de vérifier si les propriétés observées dans le laboratoire sont bien transposables à la Zira, ce qui paraît très vraisemblable mais doit être confirmé par l'observation directe,
- et de réaliser certains essais à échelle 1, ce qui n'est pas possible dans le laboratoire souterrain.

La réalisation du stockage sera ponctuée d'étapes au cours desquelles le bilan des connaissances acquises sera effectué, conformément à la notion d'un stockage réversible. L'étape de 2015 n'est qu'un jalon ; elle ne vaudra pas approbation définitive de la conception et de la réalisation du stockage. La Commission ne voit donc pour l'instant aucun motif, bien au contraire, de modifier le calendrier prévu par la loi.

Sur le stockage du combustible usé

L'IEER rappelle que l'Andra s'est placée dans le cadre de la loi de 2006 qui ne prévoit pas le stockage direct des combustibles usés – sauf combustibles « historiques » pour de très faibles volumes. L'IEER a raison de souligner qu'une évolution de la loi pourrait entraîner des modifications dans la conception et la réalisation du stockage – et d'ailleurs dans l'évaluation de sûreté.

L'Andra dans son dossier 2005 avait envisagé le stockage des combustibles usés UOX et MOX et montré sa faisabilité. L'Andra a confirmé que la phase d'esquisse de Cigéo prendrait en compte des infrastructures (puits, descenderies et galeries) adaptées à la manutention de colis de CU et produirait des plans décrivant une évolution possible des installations de surface et souterraines permettant leur stockage. Toute modification de l'inventaire actuel, qui ne prévoit pas, au contraire de ce qui se fait aux USA, le stockage de ces combustibles usés, devra faire l'objet d'une nouvelle procédure complète comportant notamment une enquête publique.

Sur le risque sismique

Bien que la partie orientale du Bassin de Paris se trouve à l'écart des zones sismiques bien identifiées du fossé rhénan et de l'arc alpin, l'IEER consacre une grosse partie de son analyse au risque sismique, tout en estimant *in fine* que l'aléa sismique dans la zone proche du site était très faible. La Commission partage cette appréciation et s'assurera qu'en sus des archives historiques, toutes les méthodes contribuant à la définition du spectre maximal seront bien mises en œuvre afin de dimensionner les infrastructures du site de stockage de manière à résister aux plus forts séismes susceptibles d'affecter un jour cette partie de l'hexagone.

Sur l'existence de failles et de fractures dans le Cox

L'IEER apparaît convaincu de l'absence de failles de rejet important dans la Zira et souscrit à l'avis de l'Andra selon lequel les failles observées au toit du Trias ne se propagent pas au delà du Dogger ; il est plus réservé sur le rôle éventuel de la fracturation présente dans la partie supérieure plus carbonatée du Cox.

Les investigations de l'Andra dans le laboratoire souterrain et dans les forages montrent que ces fractures, si elles sont bien présentes, sont systématiquement colmatées par de la calcite et très rares en profondeur (fréquence horizontale hectométrique) ; elles sont le témoin de circulations anciennes de fluides. Tous les tests hydrauliques réalisés dans un forage incliné au droit de ces fractures ont de fait montré qu'elles n'étaient pas perméables. La question paraît donc résolue dans l'état actuel des connaissances et ne pourrait évoluer que par de nouvelles observations effectuées lors du creusement des puits et galeries du stockage. Si des fractures susceptibles d'être hydrauliquement conductrices devaient être rencontrées à cette occasion, l'Andra en étudierait les propriétés et en évaluerait le rôle et les conséquences sur la sûreté du stockage. Ceci suppose l'accompagnement des chantiers de creusement par des études géologiques et hydrogéologiques minutieuses.

Sur la caractérisation des processus de transfert au sein du Callovo-oxfordien

A très long terme, les radionucléides contenus dans une couche géologique très peu perméable peuvent migrer sous l'effet de la convection – ils sont alors transportés avec l'eau dans son mouvement – ou sous l'effet de la diffusion – ils se déplacent alors dans l'eau même si celle-ci est immobile. L'importance relative de ces deux mécanismes peut être appréciée au moyen d'un nombre dit « de Péclet ». Dans le cas du Cox, l'Andra estime que le mécanisme diffusif est prédominant, c'est à dire le moins lent des deux. L'IEER conteste cette conclusion en considérant l'éventail des valeurs que peut prendre le nombre de Péclet quand on utilise toutes les mesures locales faites par l'Andra. Pour la Commission, l'utilisation des valeurs extrêmes que peut prendre localement le nombre de Péclet est mal adaptée à une caractérisation globale des transferts dans une formation géologique.

Une hétérogénéité ou une anisotropie locale d'un paramètre de transport vertical n'aura qu'un rôle réduit pour le calcul de sûreté global – le seul qui compte – alors que son influence sur la distribution des valeurs du nombre de Péclet sera vraisemblablement considérable. La question n'est donc pas de faire une analyse de sensibilité sur le nombre de Péclet pour juger des performances mais bien d'évaluer les transferts au moyen d'un calcul global qui prenne en compte à la fois les mécanismes diffusifs et convectifs puis d'apprécier les conséquences de la variabilité des paramètres sur ce calcul. C'est la démarche adoptée par l'analyse de sûreté, que celle-ci relève d'une approche probabiliste ou déterministe.

L'important ici est donc que l'Andra examine bien les conséquences des valeurs extrêmes des paramètres dans des conditions non optimistes, ce à quoi la Commission sera attentive.

Sur l'évaluation des performances du Callovo-oxfordien vis-à-vis du transport des radionucléides

L'IEER note que l'Andra a bien caractérisé l'hétérogénéité et l'anisotropie des propriétés de la couche du Cox mais estime qu'il n'en est pas suffisamment tenu compte ensuite dans les calculs de sûreté. Cette remarque vise plus la façon dont sont utilisées ces valeurs que la démarche expérimentale qui a permis de les obtenir.

La doctrine américaine attribue une grande importance à la réalisation de calculs de sûreté à l'aide de méthodes probabilistes consistant à choisir les paramètres d'un calcul par tirage au sort grâce à des fonctions mathématiques représentant la distribution de probabilité des valeurs de ces paramètres. Il s'en suit un grand nombre de calculs qui n'écartent pas les combinaisons irréalistes de valeurs. L'approche française est différente ; elle consiste à définir sur avis d'experts des valeurs de référence constituant un scénario d'évolution normale, puis à compléter l'évaluation par des calculs qui utilisent des valeurs extrêmes, mais cohérentes entre elles, des paramètres, constituant des scénarios dégradés. Elle suit ainsi le Guide de Sûreté édité par l'ASN et qui recommande de rechercher les scénarios les plus pénalisants.

Ces deux approches ont leurs partisans. Elles semblent à la Commission résulter d'habitudes historiques. Elles sont l'une et l'autre pertinentes dès lors que la logique et les hypothèses sous-jacentes sont clairement connues des évaluateurs et que les résultats des calculs sont analysés de manière critique.

L'IEER a mis en œuvre une approche probabiliste en s'appuyant sur les données de l'Andra. La variabilité des doses totales calculées est beaucoup plus grande que celle obtenue par l'Andra (facteur 100 000 contre facteur 10) mais l'enveloppe supérieure qui correspond à une probabilité d'occurrence très faible, reste inférieure à 1 mSv/an après 1 million d'années. Toutefois, l'IEER précise que son calcul ne vise pas à obtenir une estimation réaliste de la dose mais à apprécier l'incertitude sur son estimation, dans l'esprit de l'approche américaine. Ceci est rassurant aux yeux de la Commission pour ce qui concerne la cohérence des résultats des deux approches, probabiliste et déterministe.

Comportement mécanique à très long terme

L'IEER évoque un "optimisme excessif et généralisé" de l'Andra et en donne pour "exemple frappant" le postulat suivant lequel, sur le très long terme, le massif se comportera comme un fluide idéal, les vides étant fermés et scellés (p.13).

La question de la restauration à long terme des propriétés initiales de la roche perturbée par les ouvrages est encore ouverte. L'expérience réalisée par l'Andra dans le laboratoire souterrain consistant à appliquer une pression à la paroi des galeries, simulant leur évolution à long terme après fermeture, a permis de mettre en évidence une cicatrisation partielle assez rapide, mais c'est un résultat encore insuffisant pour qu'il soit pris en compte dans les analyses de sûreté. Celles-ci indiquent par ailleurs que le transfert éventuel de radionucléides s'effectue principalement par le massif rocheux sain, plutôt que par les ouvrages et leur voisinage éventuellement endommagé. En ce sens, pour importante qu'elle soit, la question de la cicatrisation à très long terme n'apparaît pas aujourd'hui susceptible d'être rédhibitoire du point de vue de la sûreté.

Rôle de la barrière ouvragée

L'IEER suggère d'adopter une conception de l'ouvrage dans laquelle les barrières ouvragées (vraisemblablement, de l'argile gonflante placée autour des colis de stockage) fourniraient une capacité redondante d'isolement (p.17).

Une certaine redondance doit évidemment être recherchée. En fait, un stockage géologique met en jeu trois barrières : le colis de stockage ; les barrières ouvragées, souvent constituées d'argiles gonflantes, placées autour du colis mais aussi dans les ouvrages d'accès ; la barrière géologique. La nature de la barrière géologique détermine largement la conception des deux autres barrières.

x

Le concept français, conçu pour une roche différente de celles retenues par les Américains ou les Scandinaves, comporte un surconteneur épais en acier qui empêche longtemps le contact de l'eau avec le colis primaire de déchets haute activité vitrifiés. Au delà de la durée de vie du surconteneur, la lenteur de la dissolution du verre et les conditions chimiques réductrices rendent difficile la mise en solution de plusieurs radionucléides importants, notamment les actinides. A plus long terme encore, la barrière géologique argileuse, à la manière de l'argile gonflante, ralentit considérablement les mouvements d'eau et retient une partie des radionucléides qui pourraient migrer par diffusion. L'Andra a donc choisi de ne pas placer d'argile gonflante au contact des colis : le gain en matière de sûreté serait très réduit, alors que la mise en place de l'argile dans des ouvrages horizontaux serait compliquée. En revanche des noyaux d'argile gonflante sont placés dans les bouchons de galeries, puits et têtes d'alvéoles ; l'IEER a bien noté que leur nombre était suffisant pour assurer une redondance. En Belgique, l'Ondraf envisage aussi de stocker ses déchets dans un massif argileux, et ne met pas non plus d'argile gonflante autour des colis de déchets. La Commission juge que la contribution de tels dispositifs à la nécessaire redondance des barrières serait faible.

Annexe V

STOCAMINE

Introduction

Un stockage de déchets industriels a été ouvert en 1997 à 500 m de profondeur dans des galeries spécialement creusées à cette fin dans des couches de sel gemme situées à une vingtaine de mètres sous l'exploitation de potasse des Mines de potasse d'Alsace. Le 10 septembre 2002, des déchets qui n'auraient pas dû être descendus au fond, compte tenu de leur nature physico-chimique, ont pris feu. L'exploitation du stockage et l'exploitation de la dernière mine de potasse des MDPA qui l'accueillait ont été arrêtées après l'incendie. Un retrait complet des déchets, dont la possibilité était exigée par la réglementation, est demandé par une partie de l'opinion. Il s'avère après réalisation de plusieurs expertises que ce retrait serait très difficile. La CNE a visité l'installation de StocaMine et a examiné divers rapports qui lui ont été consacrés en s'efforçant d'en tirer les leçons utiles pour la conception et la mise en œuvre de la réversibilité dans un stockage géologique profond.

Législation sur la réversibilité des stockages de produits dangereux (hors déchets radioactifs)

La loi du 19 juillet 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement, modifiée à diverses reprises, prévoit dans sa rédaction actuelle¹ que :

"Le stockage souterrain en couches géologiques profondes de produits dangereux, de quelque nature qu'ils soient, est soumis à autorisation administrative. Cette autorisation ne peut être accordée ou prolongée que pour une durée limitée et peut en conséquence prévoir les conditions de réversibilité du stockage. Les produits doivent être retirés à l'expiration de l'autorisation.

A l'issue d'une période de fonctionnement autorisé de vingt-cinq ans au moins, ou si l'apport de déchets a cessé depuis au moins un an, l'autorisation peut être prolongée pour une durée illimitée, sur la base d'un bilan écologique comprenant une étude d'impact et l'exposé des solutions alternatives au maintien du stockage et de leurs conséquences....."

L'intention du législateur était très clairement que la réversibilité reste possible matériellement et financièrement pendant une durée suffisante et en tout cas pendant toute la durée de l'exploitation.

L'incendie de 2012 à StocaMine

En 1997, la société StocaMine était autorisée à exploiter un stockage souterrain - le seul à ce jour concerné par cette loi - de déchets industriels de classe C0 et C1, contenant notamment du mercure, de l'antimoine, du plomb, de l'arsenic et des déchets amiantés. Le stockage de substances radioactives était exclu. Le stockage a été réalisé à 500 m de profondeur dans des galeries souterraines creusées à cette fin dans une couche de sel à partir des infrastructures de la mine de potasse Amélie, exploitée à côté de Mulhouse par les Mines de potasse d'Alsace (MDPA). Le 10 septembre 2002, alors que 44 000 tonnes de déchets avaient déjà été descendues au fond, un incendie survenait dans le dernier bloc en cours de stockage. La cause immédiate de l'incendie tient à la présence de colis non conformes descendus quelques semaines plus tôt malgré diverses mises en garde, dont celles formulées par le personnel. Une

¹ Légifrance. Article L515-7 du Code de l'environnement, modifié par la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006.

cause plus profonde à l'origine de ce non-respect de la réglementation a pu résider dans la pression économique due à la concurrence des stockages allemands de déchets (non radioactifs) en mines de sel, alors même que la privatisation de StocaMine était déjà engagée. Ces stockages allemands, qui contiennent actuellement plusieurs millions de tonnes de déchets au total, ne sont pas soumis à l'obligation de réversibilité ni donc à l'obligation de constitution des réserves financière correspondantes.

Bien que les cavités de stockage non encore utilisées soient restées accessibles, toute opération de stockage ou de creusement de nouvelles cavités a cessé après l'incendie. En revanche, les opérations de surveillance et de maintenance ont été poursuivies par l'exploitant jusqu'à ce jour.

Le projet de stockage, qui offrait des perspectives de maintien d'une certaine activité dans le bassin potassique, avait été plutôt bien accueilli, mais l'incendie a engendré un sentiment de défiance. Une partie de l'opinion réclame la mise en œuvre de la réversibilité et le retrait des déchets.

La question de la mise en œuvre de la réversibilité à StocaMine

Après plusieurs années d'expertises consécutives à l'incendie, l'examen du stockage dans sa situation de 2011 montrait que, si le retrait restait possible, il était devenu très difficile et potentiellement dangereux. C'était évident pour le bloc contenant les déchets qui avaient brûlé : les colis et les galeries minières y sont très dégradés. Mais beaucoup d'experts jugeaient qu'il en était de même pour l'ensemble du stockage : les galeries accueillant les déchets s'étaient refermées plus vite qu'initialement prévu ; de plus certains colis, fûts métalliques ou big-bags (sacs), présentaient déjà des signes de dégradation qui risquaient de rendre périlleuse leur manipulation, sauf à prendre des précautions lourdes.

A la mi-2012, aucune décision n'avait été prise.

XII

Il n'entre pas dans les missions de la Commission d'évaluer la conception, la réalisation ni la situation présente de StocaMine. Toutefois cet ouvrage constitue un exemple des problèmes posés par la mise en œuvre du principe de réversibilité. Pour son information, la Commission a donc visité l'ouvrage au début de 2011, à l'aimable invitation des responsables actuels de StocaMine. La Commission a également examiné divers documents dont le rapport² destiné à la Commission locale d'information et de surveillance (Clis) et préparé en 2011 par un groupe d'experts dit Copil (Comité de Pilotage).

Le Copil constate que [pour ce type de stockage] "*les textes ne définissent pas de manière très précise la notion de réversibilité*". Il propose qu'un stockage "réversible" soit défini comme un ouvrage pour lequel le coût du retrait et ses risques (notamment pour les personnels chargés du retrait) sont comparables à ceux acceptés pendant le dépôt des déchets. Il propose une liste de conditions techniques qui permettent une mise en œuvre facile de la réversibilité :

"L'étiquetage et la localisation des déchets ne doivent laisser aucun doute. Les voies d'accès doivent conserver un état satisfaisant. On doit avoir ménagé entre les parois, le toit et les colis [...] un jeu suffisant pour permettre une prise facile des colis par les engins de manutention. Ce jeu doit avoir été calculé avec une marge, pour qu'il soit conservé malgré les mouvements inévitables des terrains pendant la période de réversibilité. L'emballage des déchets, big-bags ou fûts, doit avoir, pendant cette même période, gardé les qualités nécessaires à une manutention facile et sûre. Si on doit déstocker un grand nombre de colis, il faut autant que possible que les colis de déchets de même nature aient été placés au même endroit ; sinon, il faut disposer au fond ou au jour d'une capacité d'entreposage provisoire suffisante pour y opérer le tri des colis avant expédition. Enfin, lorsqu'il s'agit de retirer un grand nombre de colis sans intention de les re-stocker sur place, une autre solution de stockage doit exister pour les colis retirés. (p.19)"

² Comité de pilotage Stocamine. Rapport d'expertise. Juillet 2011. Ce rapport est disponible sur le site de la DREAL d'Alsace.

et le rapport du Copil conclut que :

"L'impression générale du Copil est que Stocamine a été géré dans la perspective d'un stockage illimité. Le Copil ne peut que constater que, même hors du cas particulier du bloc 15 [le bloc incendié], le stockage est devenu au cours du temps de moins en moins facilement réversible en raison, notamment, des mouvements de terrain mais aussi de la dégradation du conditionnement des déchets, légèrement visible sur le front des galeries du stockage, mais dont l'ampleur reste à évaluer. (p.20)"

Enseignements à tirer de l'exemple de StocaMine

Du point de vue de la mise en œuvre de la réversibilité dans un stockage, l'exemple de StocaMine met en évidence des dysfonctionnements graves mais aussi des éléments positifs, tels que la capacité d'intervention du personnel face aux urgences provoquées par l'incendie. Même s'il s'agit d'un ouvrage très différent de Cigéo, tant pour ce qui est de la nature de la roche "hôte" et des produits stockés que de la conception des cavités de stockage, on peut tirer de l'exemple de StocaMine des leçons qui complètent les points de vue déjà exposés par la Commission :

1. L'analyse des scénarios conduisant à envisager la mise en œuvre de la réversibilité doit couvrir un large champ d'hypothèses incluant le fonctionnement normal et incidentel du stockage. Lors de la conception de StocaMine, l'hypothèse d'un incendie provoqué par un feu d'engin avait été envisagée, mais un incendie se déclarant au niveau des colis avait été exclu. L'accident n'a été rendu possible que par une violation flagrante des règles relatives à la nature des produits à stocker.
2. En matière de stockage géologique de déchets radioactifs, la qualité de la procédure de réception et d'acceptation des colis de déchets est un élément essentiel de la sûreté du stockage. Cette procédure, indépendante de celle des producteurs de déchets, doit être assurée par des dispositions matérielles et organisationnelles drastiques.
3. Les notions de réversibilité et de récupérabilité doivent avoir fait l'objet avant la réalisation de l'ouvrage d'une réflexion approfondie du responsable du stockage. Il est précieux que cette réflexion bénéficie des apports d'expertises contradictoires et indépendantes. Le document de définition du projet StocaMine³ comportait 162 pages complétées par des annexes et études extérieures. Seules quelques dizaines de lignes (p.11, p.62 et p.30 pour la question des garanties financières) étaient consacrées à la réversibilité.
4. Les conditions matérielles de la mise en œuvre de la réversibilité doivent avoir été prévues et la conception de l'ouvrage doit la rendre facile. Il faut porter la plus grande attention à la sécurité des personnels qui réaliseraient le retrait. La Commission a esquissé dans son rapport n°5⁴ une liste de ces conditions analogue à celle proposée par le Copil et rappelée plus haut.
5. Il en est de même pour les conditions financières de la mise en œuvre de la réversibilité ; elles ne doivent pas faire obstacle à cette mise en œuvre si le principe en était retenu, en particulier si la décision résultait de considérations de sûreté.
6. La facilité de mise en œuvre de la réversibilité évolue au cours de la vie d'un stockage profond de déchets radioactifs et doit être évaluée rigoureusement à ses diverses étapes. Les conditions d'un suivi institutionnel (par les autorités chargées de la sûreté) et démocratique (notamment par les instances locales de suivi) de l'état de la réversibilité doivent avoir été mises en place. Ce suivi doit être effectivement mis en œuvre pendant toute la durée de vie du stockage.
7. La sûreté doit être la priorité des responsables du stockage, qui doivent disposer des moyens financiers et de l'autorité nécessaires. Il ne faut pas que se créent des conditions telles que la recherche de la rentabilité occupe la première place dans leurs préoccupations.

³ Groupe EMC. Projet de stockage en mine de déchets industriels, février 1996.

⁴ CNE. Rapport d'évaluation n° 5, Tome 2, p.41.

8. Il est nécessaire que, dans un stockage profond de déchets radioactifs, interviennent à tous les niveaux de responsabilité des personnels qualifiés, compétents et expérimentés dont le statut leur permette de faire valoir s'il y a lieu leurs points de vue sur la sûreté de l'exploitation de l'ouvrage.
9. Il est nécessaire que l'ensemble de ces préoccupations fassent l'objet d'un engagement de la communauté nationale qui présente la solennité souhaitable. La loi sur la réversibilité, dont la discussion par la représentation nationale est prévue en 2016, devrait constituer un jalon majeur dans ce sens.

Annexe VI

E&R INTERNATIONALES

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 ouvragées 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 en cours en 2012 est présenté.

BELBAR⁵ 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.

BIOPROTA⁶ L'objectif de Bioprota, 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...

CARBOWASTE⁷ 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.

CATCLAY⁸ 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 une diffusion plus profonde qu'attendue. Une explication scientifique est essentielle pour les études de sécurité des concepts de stockage en argile.

⁵ Bentonite Erosion: effects on the Long term performance of the engineered Barrier and Radionuclide Transport, 2012-2016, 7^{ème} PCRD, 7 pays, 14 partenaires.

⁶ 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.

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

⁸ Processes of Cation Migration in Clay Rocks; 2010-2013, 7^{ème} PCRD, 5 pays, 7 partenaires dont le CEA (coordinateur), Andra, BRGM.

CROCK⁹ 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 du 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.

ERDO¹⁰ 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.

FEBEX 11¹¹ 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.

FIRST-NUCLIDES¹² 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.

FORGE¹³ 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.

IGD-TP¹⁴ La plate-forme technologique européenne IGD-TP sur le stockage géologique des déchets nucléaires est l'aboutissement de travaux commencés durant le 6^{ème} 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 appliquer 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.

INSOTEC¹⁵ 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.

⁹ Crystalline Rock Retention Processes, 2011-2013, 7^{ème} PCRD, 6 pays, 10 partenaires.

¹⁰ 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.

¹¹ Full-scale High Level Waste Engineered Barriers, 1994-2012, 22 partenaires dont l'Andra, le BRGM et l'Institut National Polytechnique de Toulouse.

¹² Fast / Instant Release of Safety Relevant Radionuclides from Spent Nuclear Fuel, 2012-2014, 7^{ème} PCRD, 7 pays, 9 partenaires, dont le CNRS.

¹³ Fate of repository gases; 2009-2013, 7^{ème} PCRD, 12 pays, 24 partenaires dont l'Andra, le CEA, l'IRSN, le CNRS, EDF et l'Ecole Centrale de Lille.

¹⁴ 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).

¹⁵ International Socio-Technical Challenges for implementing geological disposal, 2011-2014, 7^{ème} PCRD, 11 pays, 14 partenaires dont le CNRS.

IPPA¹⁶ 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.

LUCOEX¹⁷ 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.

MODERN¹⁸ Le projet vise à fournir une référence décrivant les objectifs techniques, moyens et méthodes, permettant de concevoir un système de sondage et d'implication des parties prenantes pendant les différentes phases de stockage, en respectant les besoins et contraintes spécifiques à chaque pays.

NEA-MESA¹⁹ 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.

NWD²⁰ 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.

PEBS²¹ 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 usinées. 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 GROUP²² L'Andra et l'Union Internationale de Radioécologie ont lancé en 2002 un groupe de travail international afin de promouvoir la collaboration scientifique entre radioécologistes dans le domaine des déchets radioactifs.

RECOZY²³ 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.

REDUPP²⁴ 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.

¹⁶ Implementing Public Participation Approaches in Radioactive Waste Disposal, 2011-2013, 7^{ème} PCRD, 12 pays, 17 partenaires, dont Mutadis consultants.

¹⁷ Large Underground Concept Experiments, 2011-2014, 7^{ème} PCRD, 4 pays et partenaires, dont l'Andra (coordinateur), Nagra, Posiva et SKB.

¹⁸ Monitoring Developments for safe Repository operation and staged closure, 2009-2012, 7^{ème} PCRD, 12 pays, 17 partenaires, dont l'Andra, coordinateur.

¹⁹ Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, 2008-2012, Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) de l'OCDE.

²⁰ Nuclear Waste Disposal action, Euratom CCR, 11 pays, 21 partenaires, dont le CNRS et le CEA.

²¹ Long-term Performance of the Engineered Barrier System, 2010-2014, 7^{ème} PCRD, 8 pays, 17 partenaires dont l'Andra.

²² <http://www.iur-uir.org/en/task-groups/id-5-radioecology-and-waste> .

²³ Redox phenomena controlling systems, 2008-2012, 7^{ème} 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.

²⁴ Reducing Uncertainty in Performance Prediction, 2011-2014, 7^{ème} PCRD, 3 pays, 5 partenaires.

SITEX²⁵ 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.

SKIN²⁶ 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 II²⁷ 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.

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^{ème} et 3^{ème} 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 en cours en 2012 est présenté.

ACSEPT²⁸ 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 de cycles du combustible. La faisabilité scientifique par des procédés hydrochimiques (extraction et dés extraction sélectives et groupées d'actinides) et des évaluations préliminaires en pyrochimie (électrolyse et extraction liquide-liquide), prenant en compte les critères et contraintes de l'industrie, doit y être démontrée.

ACTINET-I3²⁹ Le but du projet est de permettre à la communauté scientifique européenne de bénéficier des infrastructures de laboratoire pour la recherche concernant les actinides.

²⁵ Sustainable network of independent technical expertise for radioactive waste disposal, 2011-2014, 7^{ème} PCRD, 10 pays, 15 partenaires, dont l'IRSN (coordinateur), le European nuclear safety training and tutoring institute, Mutadis consultants et le Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement.

²⁶ Slow processes in close-to-equilibrium conditions for radionuclides in water/solid systems of relevance to nuclear waste management, 2011-2013, 7^{ème} PCRD, 7 pays, 10 partenaires, dont ARMINE/SUBATECH (coordinateur).

²⁷ Projet Sorption II, 2000- ?, AEN, 11 pays, 20 partenaires dont l'Andra.

²⁸ Actinide recycling by separation and transmutation; 2008-2012, 7^{ème} 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.

²⁹ Actinet Integrated Infrastructure Initiative, 7^{ème} PCRD, 5 pays, 7 partenaires dont le CNRS, LGI et le CEA.

ANFC³⁰ Des cycles de combustible alternatifs basés sur la S&T seront étudiés et évalués. Des méthodes pour la récupération de radionucléides à longue demi-vie, 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 adressées.

ARCAS³¹ Une étude technico-économique de la performance des systèmes critiques et sous-critiques comme machines dédiées de transmutation de déchets radioactifs sera effectuée dans une approche à doubles strates.

ASGARD³² 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.

ASTRID³³ 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.

CDT³⁴ Le projet représente une suite des activités d'Eurotrans. CDT vise à obtenir un design d'engineering avancé pour Myrrha par 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 une opération de l'installation en mode critique.

CP-ESFR³⁵ 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.

EUFRA³⁶ 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 projet Nudame.

EVOL³⁷ 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. L'objectif est de proposer un projet en 2012.

ERINDA³⁸ 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.

³⁰ Alternative Nuclear Fuel Cycles; 2010-..., 7^{ème} PCRD, 6 pays, 14 partenaires dont le CEA.

³¹ ADS and fast reactor comparison study in support of SRA of SNETP; 2010-2012, 7^{ème} PCRD, 8 pays et 14 partenaires, dont le CNRS.

³² Advanced fuels for Generation IV reActors, Reprocessing and Dissolution, 2012-2015, 7^{ème} PCRD, 9 pays, 16 partenaires, dont le CEA.

³³ ASTRID, prototype de réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium, projet piloté par le CEA.

³⁴ Central Design Team for a Fast Spectrum Transmutation Experimental Facility, 2009-2011, 7^{ème} PCRD, 8 pays, 19 partenaires dont le CEA, le CNRS et Areva.

³⁵ Collaborative project on European sodium fast reactor; 2009-2012, 7^{ème} PCRD, 10 pays, 25 partenaires dont le CEA, Areva NP, IRSN et EDF.

³⁶ European facility for innovative reactor and transmutation neutron data; 2008-2012, 7^{ème} PCRD, CE-CCR.

³⁷ Evaluation and Viability of Liquid Fuel Fast Reactor System, 2010-2013, 7^{ème} PCRD, 8 pays, 11 partenaires dont le CNRS, Inopro et Aubert & Duval.

³⁸ European Research Infrastructures for Nuclear Data Applications, 2010-2013, 7^{ème} PCRD, 10 pays, 14 partenaires, dont le CEA et le CNRS.

FAIRFUELS³⁹ Le projet doit fournir une voie vers un usage plus efficient du matériel 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.

FAR⁴⁰ 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-BRIDGE⁴¹ 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^{ème} 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.

FREYA⁴² Bâtissant 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 de systèmes ADS.

GACID⁴³ 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.

XX

GETMAT⁴⁴ 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^{ème} génération, les systèmes de transmutation, et ceux dédiés à la fusion.

GIF/GEN-IV⁴⁵ 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.

GOFASTER⁴⁶ 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/m³, et un cœur contenant peu de plutonium. Il doit également être non-générateur de plutonium afin d'être non-proliférant.

³⁹ Fabrication, irradiation and reprocessing of fuels and targets for transmutation; 2009-2013, 7^{ème} PCRD, 6 pays, 10 partenaires dont le CEA et Lagrange-LCI.

⁴⁰ Fundamental and Applied Actinide Research; action CCR, 12 pays, 26 partenaires.

⁴¹ Basic research for innovative fuels design for GEN IV systems ; 2008-2012, 7^{ème} PCRD, 8 pays, 18 partenaires dont le CEA, le CNRS, Areva, Materials design, Nathalie Dupin et Lagrange-LCI Consulting.

⁴² Fast reactor experiments for hybrid applications, 2011-2015, 7^{ème} PCRD, 10 pays, 16 partenaires dont le CNRS et le CEA.

⁴³ Global Actinide Cycle International Demonstration; DOE, JAEA, CEA.

⁴⁴ Gen IV and transmutation materials; 2008-2013, 7^{ème} PCRD, 11 pays, 24 partenaires dont le CEA, le CNRS et EDF.

⁴⁵ Generation IV International Forum ; 2001- ?, Euratom + 12 pays dont la France.

⁴⁶ European Gas Cooled Fast Reactor, 2010-2013, 7^{ème} PCRD, 10 pays, 22 partenaires, dont l'IRSN, Areva et le CEA.

GUINEVERE⁴⁷ 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.

JASMIN⁴⁸ 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^{ème} génération.

JHR-CP⁴⁹ 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^{ème} 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^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} 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.

LEADER⁵⁰ 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.

MAX⁵¹ 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.

MYRRHA⁵² 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 de 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-MINWASTE⁵³ 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.

NURISP⁵⁴ Le projet s'inscrit dans la suite du projet NURESIM du 6^{ème} 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.

⁴⁷ Guinevere: Generator of Uninterrupted Intense Neutrons at the lead Venus Reactor ; 2006-..., collaboration avec le CEA et le CNRS.

⁴⁸ Joint Advanced Severe Accidents Modelling and Integration for Na-cooled fast neutron reactors, 2011-2015, 7^{ème} PCRD, 5 pays, 9 partenaires, dont l'IRSN (coordinateur), Areva et EDF.

⁴⁹ 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^{ème} PCRD, 5 pays et 6 partenaires dont le CEA, maitre d'oeuvre.

⁵⁰ Lead-cooled European Advanced Demonstration Reactor; 2010-2012; 7^{ème} PCRD, 12 pays et 17 partenaires dont le CEA
⁵¹ Myrrha accelerator experiment, research and development programme, 2011-2014, 7^{ème} PCRD, 6 pays, 11 partenaires, dont le CNRS (coordinateur), Thales Electron Devices, Accelerators and cryogenic systems et le CEA.

⁵² Multipurpose Hybrid Research Reactor for High-tech Applications; 1998-?, collaboration avec les partenaires d'Eurotrans dont le CNRS, le CEA, Areva, Advanced Accelerator Applications et ENEN.

⁵³ 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.

⁵⁴ Nuclear reactor integrated simulation project, 2009-2012, 7^{ème} PCRD, 14 pays, 22 organismes dont EDF, IRSN et le CEA.

PELGRIMM⁵⁵ Afin de soutenir l'agenda stratégique de la SNE-TP, le projet adresse le développement de combustibles contenant des actinides mineurs pour les réacteurs rapides. Aussi bien le recyclage homogène dans le cœur même, que le recyclage hétérogène en couverture sont considérés.

SARGEN-IV⁵⁶ 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.

SEARCH⁵⁷ 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.

SILER⁵⁸ 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.

SNE-TP⁵⁹ 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.

TDB⁶⁰ 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.

THINS⁶¹ Le projet prévoit la conception et réalisation d'expériences thermo-hydrauliques en support à différents systèmes innovants à base de métaux liquides.

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.

⁵⁵ PELlets versus GRanulates: Irradiation, Manufacturing & Modelling, 2012-2015, 7^{ème} PCRD, 9 pays, 10 partenaires, dont le CEA (coordinateur), EDF, Areva, Lagrange et le Réseau européen pour l'enseignement des sciences nucléaires.

⁵⁶ Harmonized European methodology for the Safety Assessment of innovative GEN-IV reactors, 2011-2013, 7^{ème} PCRD, 12 pays, 22 partenaires, dont l'IRSN (coordinateur), Areva, EDF et le CEA.

⁵⁷ Safe Exploitation Related Chemistry for HLM reactors and Lead-cooled Advanced Fast Reactors, 2011-2014, 7^{ème} PCRD, 7 pays, 12 partenaires, dont l'IRSN (coordinateur), Areva et EDF.

⁵⁸ Seismic-initiated events risk mitigation in lead-cooled reactors, 2011-2014, 7^{ème} PCRD, 8 pays, 18 partenaires, dont le CEA, Nuvia Travaux Speciaux et Areva.

⁵⁹ 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.

⁶⁰ Thermochemical Database project ; AEN.

⁶¹ Thermal-Hydraulic research for Innovative Nuclear Systems; 2010-2014, 7^{ème} PCRD, 11 pays, 24 partenaires dont le CEA et l'IRSN.

ALICE⁶² 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.

ENEN-III⁶³ 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.

HeLiMnet⁶⁴ 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.

PETRUS II⁶⁵ Le projet tend à permettre aux professionnels européens, actifs dans le domaine de la gestion des déchets radioactifs et quelques soient leurs études initiales, de suivre une formation sur le stockage géologique qui serait largement reconnu en Europe.

⁶² Access to Large Infrastructures in China and Europa , 2012-2016, 7^{ème} PCRD, 5 pays, 5 partenaires, dont le CEA.

⁶³ European nuclear education network training schemes, 2009-2013, 7^{ème} PCRD, 11 pays, 20 partenaires dont le Réseau européen pour l'enseignement des sciences nucléaires et le CEA.

⁶⁴ Heavy Liquid Metal network; 2010-..., 7^{ème} PCRD, 9 pays et 13 partenaires dont le CEA.

⁶⁵ Towards an European training market and professional qualification in Geological Disposal; 2009-2012, 7^{ème} 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'ÉVALUATION

Président : **Jean-Claude DUPLESSY**

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

Secrétaire général : **Maurice LAURENT**

Conseiller scientifique : **Claire KERBOUL**

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

www.cne2.fr

COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION

Membres de la Commission Nationale d'Evaluation :

Jean-Claude DUPLESSY

Jean BAECHLER

Pierre BEREST

Adolf BIRKHOFFER*

Yves BRECHET

Frank DECONINCK

Hubert DOUBRE**

Maurice LAURENT

Emmanuel LEDOUX

Maurice LEROY

Jacques PERCEBOIS

François ROURE

Claes THEGERSTRÖM

Conseiller scientifique :

Claire KERBOUL

Président honoraire :

Bernard TISSOT

Secrétariat administratif :

Chantal JOUVANCE et Florence LEDOUX

* Expert invité

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

COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION

Président : Jean-Claude DUPLESSY

Vice-Présidents : Emmanuel LEDOUX et Maurice LEROY

Secrétaire général : Maurice LAURENT

Conseiller scientifique : Claire KERBOUL

Secrétariat administratif : Chantal JOUVANCE et Florence LEDOUX

www.cne2.fr