

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°5

NOVEMBRE 2011

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°5

Tome 1

NOVEMBRE 2011

S O M M A I R E

Tome 1

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS	1
ACTIVITÉS DE LA CNE2	4

Chapitre 1 – SÉPARATION-TRANSMUTATION

1.1. CONTEXTE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE	6
1.2. TRANSMUTATION ET MULTIRECYCLAGE	7
1.2.1. Trois actinides importants potentiellement concernés par la transmutation.....	7
1.2.1.1. Plutonium.....	7
1.2.1.2. Américium.....	8
1.2.1.3. Curium	8
1.2.2. Vitesse de transmutation	9
1.3. OUTILS DE DÉMONSTRATION	10
1.4. ÉTUDES DE SCÉNARIOS	11
1.5. PROTOTYPE ASTRID	12
1.5.1. Cœur	12
1.5.2. Refroidissement-conversion.....	13
1.5.3. Conceptions et matériaux pour Astrid.....	13
1.6. RETRAITEMENT ET FABRICATION DU COMBUSTIBLE	14
1.6.1. Expériences et acquis	15
1.6.2. Pilote de retraitement associé à Astrid	16
1.7. TRANSMUTATION EN ADS	16
1.8. TRANSMUTATION ET STOCKAGE	17
1.8.1. Radiotoxicité de l'inventaire	17
1.8.2. Puissance thermique résiduelle des déchets HAVL.....	18
1.9. AUTRES SCÉNARIOS	19
1.10. CONCLUSION	20

CHAPITRE 2 – STOCKAGES ET ENTREPOSAGES

2.1.	INTRODUCTION	21
2.2.	INVENTAIRE	21
2.3.	ZIRA	22
2.3.1.	Apports de la nouvelle campagne géophysique 3D	23
2.3.2.	Connaissance des variations litho-stratigraphiques du Callovo-Oxfordien	23
2.3.3.	Connaissance sur l'hydrogéologie régionale et locale	24
2.3.4.	Situation de la modélisation hydrogéologique	25
2.4.	ZIIS – INTÉGRATION DES OUVRAGES DANS LE TERRITOIRE ET L'ENVIRONNEMENT	25
2.4.1.	Contraintes liées à la sûreté et la sécurité	26
2.4.2.	Contraintes environnementales	26
2.4.3.	Contraintes imposées par la réversibilité	27
2.4.4.	Inconvénients et avantages de la liaison fond/surface par descendrière	28
2.5.	VERS UNE RÉALISATION DU STOCKAGE GÉOLOGIQUE : LE CENTRE INDUSTRIEL DE STOCKAGE GÉOLOGIQUE, CIGÉO	28
2.5.1.	Analyse synthétique du projet STI	30
2.5.2.	Conception de la phase d'esquisse du projet Cigéo	32
2.5.3.	Évolution du projet Cigéo	34
2.6.	TRAVAUX SCIENTIFIQUES	34
2.6.1.	Thermique	34
2.6.1.1.	Perturbations thermiques	35
2.6.1.2.	Expérimentations thermiques	36
2.6.1.3.	Thermique et transmutation	36
2.6.1.4.	Conclusion	37
2.6.2.	Géomécanique	37
2.6.2.1.	Zone endommagée (EDZ), enjeu de sûreté	37
2.6.2.2.	Essais conduits dans les alvéoles HAVL	39
2.6.2.3.	Scelllements	40
2.6.2.4.	Modélisation géomécanique et conclusions	40
2.6.3.	Expériences en laboratoire souterrain	41
2.6.3.1.	Expériences dans le laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne	41
2.6.3.2.	Expériences visant à caractériser le champ proche	41
2.6.3.3.	Expérimentations visant à caractériser le champ lointain	42

2.7.	RÉVERSIBILITÉ	43
2.7.1.	Introduction.....	43
2.7.2.	Circonstances pouvant conduire à un retrait.....	45
2.7.3.	Evolution des alvéoles et des colis pendant la période de réversibilité	45
2.7.4.	Réversibilité et entreposage.....	46
2.7.5.	Exercices de réversibilité.....	46
2.7.6.	Conclusions	47
2.8.	MÉMOIRE DU SITE	47

Chapitre 3 – PANORAMA INTERNATIONAL

3.1.	DIFFÉRENTES OPTIONS DE GESTION DES DÉCHETS FA, MA ET HA	48
3.2.	CADRE LÉGAL INTERNATIONAL	49
3.3.	LABORATOIRES DE RECHERCHE ET SITES DE STOCKAGE SOUTERRAIN	50
3.4.	SOURCES D'IRRADIATION À SPECTRE RAPIDE	53
3.5.	E&R SUR LES ADS	53
3.6.	E&R SUR LE STOCKAGE GÉOLOGIQUE PROFOND	55
3.6.1.	Performances du stockage.....	55
3.6.2.	Impact environnemental du stockage.....	56
3.6.3.	Gouvernance et participation des parties prenantes.....	57
3.7.	NOUVELLES FILIÈRES POUR LA SÉPARATION-TRANSMUTATION	57
3.7.1.	E&R sur la séparation-transmutation	58
3.7.2.	Bases de données nucléaires	60
3.7.3.	Aspects économiques et géopolitiques	61
3.8.	ENSEIGNEMENT, FORMATION ET GESTION DES CONNAISSANCES	61

ANNEXES

Annexe I – COMPOSITION DE LA COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION - NOVEMBRE 2011.....	i
Annexe II – ORGANISMES AUDITIONNÉS PAR LA CNE2	ii
Annexe III – LISTE DES DOCUMENTS TRANSMIS À LA COMMISSION.....	iv

Tome 2

ANNEXES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

Selon les dispositions de la loi, la gestion à long terme des déchets de haute activité et à vie longue comporte deux aspects qui ne s'excluent pas : la séparation-transmutation des actinides présents dans le combustible usé des réacteurs nucléaires et le stockage géologique des déchets de haute et moyenne activité à vie longue.

Séparation et transmutation

Les études sur la séparation-transmutation sont aujourd'hui conduites en relation avec celles menées pour la conception du prototype Astrid¹ de réacteur nucléaire à neutrons rapides (RNR) de quatrième génération. La faisabilité scientifique et technique de la séparation des divers actinides est maintenant démontrée. Un RNR², à condition d'être associé à un pilote de retraitement, permettrait de tester la faisabilité industrielle du multirecyclage du plutonium et de démontrer la possibilité de transmutation industrielle des actinides mineurs. La faisabilité industrielle du multirecyclage du plutonium conditionne le développement d'un parc de RNR. Il deviendrait alors possible de gérer le plutonium comme une ressource de matière fissile et non comme un déchet qui serait à mettre en stockage géologique. La faisabilité industrielle de la transmutation des actinides mineurs permettrait d'envisager de nouvelles options pour la gestion des déchets.

La transmutation des actinides est envisageable avec un parc de réacteurs à neutrons rapides, couplé au réseau, ou avec des réacteurs à neutrons rapides sous-critiques pilotés par accélérateur (ADS) encore à l'étude.

1

Un parc de réacteurs à neutrons rapides de 430 TWh/an, isogénérateurs et transmutant l'américium, nécessiterait – en fonctionnement permanent – la manipulation d'environ 900 tonnes de plutonium et 100 tonnes d'américium réparties dans les réacteurs et les usines du cycle. Ces masses représentent les quantités qui seraient à gérer à l'arrêt du cycle. A titre de comparaison, le fonctionnement d'un parc de Rep³ moxés fournissant la même quantité d'électricité produirait des masses croissantes de plutonium (1 300 tonnes en 2150), non recyclables en Rep et qui seraient à mettre en stockage géologique.

Actuellement la recherche française est bridée par l'absence d'un réacteur à neutrons rapides accessible à la communauté scientifique en charge de l'étude de la transmutation, ce qui interdit d'exploiter pleinement l'avance scientifique, technique et technologique française en ce domaine. Or, des efforts de recherche importants sont à mener pour démontrer qu'Astrid peut fonctionner en recyclant son propre plutonium, et apprécier les avantages et les inconvénients des différentes stratégies envisageables pour transmuter les actinides mineurs.

La Commission souligne que la logique scientifique ne se confond pas avec la rationalité industrielle. Le projet scientifique associé au réacteur Astrid doit d'abord servir un programme complet d'E&R passant en revue différentes stratégies de transmutation et permettre de pousser la recherche jusqu'à une évaluation complète des possibilités d'industrialisation.

¹ Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration.

² Réacteur à neutrons rapides.

³ Réacteur à eau pressurisée (réacteur à neutrons thermiques).

Entreposage et stockage des déchets radioactifs

L'année 2010-2011 a constitué une étape très importante pour le stockage géologique profond des déchets radioactifs qui, après une phase préparatoire d'E&R, entre dans la phase de réalisation industrielle. En septembre 2010, l'Andra a présenté une organisation et une stratégie industrielles pour le projet de stockage, appelé Cigéo (centre industriel de stockage géologique).

Or, de leur côté, les producteurs de déchets, EDF, Areva et le CEA, ont proposé pour cet ouvrage des options de conception alternatives, rassemblées dans un dossier appelé STI, transmis à l'Andra en novembre 2010. Comme l'a souligné l'Opecst, cette démarche des producteurs "*engagée en dehors des cadres de concertation prévus par la loi*"⁴ semble avoir été avant tout motivée par l'annonce faite par l'Andra d'un accroissement conséquent de son estimation du coût du projet de stockage géologique profond. La Commission rappelle que la loi du 28 juin 2006 confie à l'Andra la mission de "*concevoir, d'implanter, de réaliser et d'assurer la gestion [...] des centres de stockage de déchets radioactifs...*"⁵

La Commission estime que le travail effectué par les producteurs contient des éléments techniques qui méritent l'examen. La proposition d'architecture d'ensemble qui les organise participe d'une logique de réduction des coûts ; or, ce projet satisfait moins bien que le projet 2009 de l'Andra, l'objectif prioritaire d'impact radiologique le plus réduit possible, compatible avec les conditions techniques et économiques.

La DGEC⁶ a demandé à l'Andra d'évaluer les propositions des producteurs ; elle a mis en place en avril 2011 une revue du projet Cigéo. Cette revue visait à formuler, avant le lancement de tout appel d'offres de maîtrise d'œuvre, un avis sur la robustesse du programme industriel, et à préciser quels pourraient être le cahier des charges du stockage et les pistes d'optimisation technico-économique à explorer.

Le 11 octobre 2011, l'Andra a présenté à la Commission le document "Exigences applicables au projet Cigéo" qui constitue le cahier des charges pour la conception d'esquisses de stockage et leurs spécifications techniques. L'Andra a précisé avoir "*choisi de retenir une maîtrise d'œuvre pour les études de conception de la période 2011-2017*" et souligné que la maîtrise d'œuvre devra apporter "*une réponse architecturale, technique et économique*" (cf. Cigéo.SP.ADPG.11.0020.B).

L'Andra, maître d'ouvrage, a donc décidé, après la revue de projet Cigéo, de procéder à un appel d'offre en vue de confier la "*maîtrise d'œuvre système*" à une entreprise extérieure. La Commission n'a pas eu le temps nécessaire pour analyser en détail le contenu de l'appel d'offres et la forme de gouvernance du projet que crée cette maîtrise d'œuvre. Toutefois, elle s'inquiète de ce que, sans avoir fait figurer un schéma conceptuel explicite dans son appel d'offres, l'Andra ait délégué la "*maîtrise d'œuvre système*" à une entreprise extérieure qui aura la charge de finaliser l'esquisse détaillée de la première tranche du stockage, les méthodes et le chiffrage des coûts de réalisation, tout cela en moins d'un an. La Commission demande que l'Andra assume pleinement toutes les responsabilités qui lui ont été confiées par la loi.

⁴ Cf. rapport Opecst 19 janvier 2011 "Déchets nucléaires : se méfier du paradoxe de la tranquillité".

⁵ Idem.

⁶ Direction générale de l'énergie et du climat, au sein du ministère chargé de l'écologie.

L'Andra a mené à bien l'élaboration des dossiers 2005 et 2009 et la proposition de Zira⁷. Le passage d'une réflexion à base d'E&R à une élaboration industrielle engendre des difficultés nouvelles. La Commission souligne aussi que les producteurs (EDF, CEA et Areva) ont développé depuis de nombreuses années une très grande expertise en termes d'installations nucléaires, d'ouvrages souterrains, et de maîtrise des risques associés. La Commission recommande que, tout au long de la réalisation du projet industriel, les producteurs y soient effectivement associés et leur contribution mise à profit, à travers un processus qui reste à mettre en place mais où l'Andra conserverait toutes ses prérogatives de maître d'ouvrage.

La Commission rappelle que dans moins de douze mois, le dossier préparatoire au Débat public devra porter à la connaissance du public les éléments essentiels du projet, notamment le schéma du stockage, les modalités de la réversibilité, le schéma des installations de surface, puits et descenderies, l'inventaire des déchets qui iront au stockage et une estimation du coût de l'installation suite à la remise du rapport de la Cour des Comptes sur le coût du nucléaire.⁸

Dimension internationale

La Commission juge favorablement l'ancrage international d'une bonne partie des recherches effectuées par l'Andra, le CEA et le CNRS. Elle a apprécié particulièrement l'importance accordée à cette dimension lors des auditions.

Quatre pays (Chine, Inde, Japon, Russie) développent des projets de RNR.

La directive européenne Euratom du 19 juillet 2011 a conclu que *"Le stockage géologique constitue actuellement la solution la plus pérenne et la plus durable"*.

Trois pays ont un calendrier qui prévoit l'ouverture en 2025 d'un stockage profond de déchets radioactifs de haute activité à vie longue : la Finlande, la France et la Suède. En Suède, en mars 2011, SKB a déposé son dossier de demande d'autorisation de construction. La Suède est donc le premier pays à avoir franchi cette étape.

⁷ Zone d'intérêt pour une reconnaissance approfondie.

⁸ Rapport PNGMDR 2010-2012, p. 97.

ACTIVITÉS DE LA CNE2

La période de juillet 2010 à octobre 2011 est la 4^{ème} année de plein exercice de la CNE2 ; elle fait l'objet du présent rapport n° 5. De fin juin à décembre 2010, la Commission a présenté le rapport n° 4 à différentes instances, au premier rang desquelles l'Opecst et les départements ministériels. Une délégation de la Commission s'est rendue à Bar-le-Duc pour présenter ce travail aux membres du Clis de Meuse/Haute-Marne.

* * *

Cette 4^{ème} année est aussi celle du renouvellement par moitié de la composition de la Commission en juillet 2010 (*cf. annexe I, tome 1*). A l'intention des membres nouvellement nommés, des visites et des séances particulières de travail ont été organisées avec l'aide de l'Andra et du CEA.

* * *

La Commission a suivi la même méthode de travail que les années précédentes. Procédant à 13 auditions, dont 8 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 88 personnes de l'Andra et du CEA, mais également des institutions universitaires et industrielles, françaises et étrangères. A ces auditions, qui regroupaient 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. La Commission a consacré une demi-journée à auditionner les diverses actions de recherche fondamentale du programme Pacen⁹ du CNRS (*cf. annexe 1, tome 2*).

Cette année, la Commission a visité le site de Stocamine ainsi que les installations Masurca et Leca-Star au CEA de Cadarache.

Au cours d'un voyage d'études en Allemagne, la Commission a visité les sites de Asse et de Gorleben. Au Bundestag, elle a rencontré deux députés du parti écologiste ("Die Grünen"). Celles-ci ont rappelé qu'elles considéraient le stockage géologique des déchets nucléaires comme la solution de référence. Leur préoccupation actuelle est la recherche d'un ou plusieurs sites de bonne qualité géologique pour assurer le stockage. Elles considèrent le site de Gorleben comme un candidat potentiel dans lequel les études scientifiques devraient être poursuivies.

Pour préparer ce rapport, la Commission a tenu un pré-séminaire de 2 jours à l'occasion de sa visite au CEA de Cadarache, et 4 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 (tome 1)*.

* * *

⁹ Programme sur l'aval du cycle et la production d'énergie nucléaire.

Le présent rapport est organisé selon les deux volets d'E&R complémentaires de la gestion des matières et des déchets radioactifs : la séparation-transmutation (*cf. chapitre 1*), et l'entreposage et le stockage des déchets HAVL¹⁰ et MAVL¹¹ (*cf. chapitre 2*). Cette année, la Commission s'est attachée à approfondir le thème de l'impact d'une éventuelle transmutation des actinides, sur le stockage des déchets qui seraient produits à l'avenir, dans un parc adapté au multirecyclage. Cette question est abordée dans les deux chapitres de son rapport.

La Commission continue son observation du panorama international (*cf. chapitre 3*), avec cette année une audition entière consacrée aux différentes visions du cycle nucléaire de par le monde. Cette audition a eu lieu quelques semaines avant l'accident de Fukushima.

Enfin, certains points scientifiques et techniques plus détaillés sont exposés dans le *tome 2* de ce rapport.

* * *

¹⁰ Haute activité et à vie longue.

¹¹ Moyenne activité et à vie longue.

Chapitre 1

SÉPARATION-TRANSMUTATION

1.1. CONTEXTE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

Comment optimiser la gestion des matières et des déchets radioactifs ? Une des voies possibles est de transmuter les radionucléides à vie longue qu'ils contiennent, afin de réduire la durée de leur radiotoxicité. De fait, la loi du 28 juin 2006 dispose que *"Les études et recherches correspondantes [sur la séparation et la transmutation] sont conduites en relation avec celles menées sur les nouvelles générations de réacteurs nucléaires mentionnés à l'article 5 de la loi n° 2005-781 du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique ainsi que sur les réacteurs pilotés par accélérateur dédiés à la transmutation des déchets, afin de disposer, en 2012, d'une évaluation des perspectives industrielles de ces filières et de mettre en exploitation un prototype d'installation avant le 31 décembre 2020."*

En effet, les radionucléides à vie longue contenus dans les déchets sont responsables de la persistance de la radioactivité pendant des centaines de milliers d'années, voire des millions d'années. Réduire la quantité de ces radionucléides dans les déchets peut donc permettre de donner des marges supplémentaires pour réduire le terme "source", accroître la sûreté du stockage, diminuer de façon significative sa durée, voire son empreise. Ces points ne sont pas à négliger, notamment en regard de l'acceptabilité, dans la mesure où la radiotoxicité devrait alors décroître fortement. En revanche, ils ont des implications fortes sur la stratégie industrielle, tant sur le type de réacteurs à mettre en œuvre, que sur le moment de leur mise en œuvre.

Les E&R conduites dans plusieurs pays, notamment en France, ont montré que la stratégie de séparation-transmutation pourrait être efficacement mise en place en recyclant le plutonium et tout ou partie des actinides mineurs dans des réacteurs à spectre de neutrons rapides.

Ainsi, on peut montrer que dans le cas où l'on recyclerait le plutonium et les actinides mineurs, il ne faudrait que 500 ans pour que la radioactivité des déchets produits par le parc retrouve le niveau de celle de l'uranium naturel qui aurait servi à l'alimenter.

En excluant des déchets le plutonium, l'américium et accessoirement le curium, la puissance thermique des déchets à stocker deviendrait beaucoup plus faible après environ un siècle d'entreposage.

La mise en œuvre d'une telle stratégie, dans l'état actuel des connaissances, conduirait à des ensembles plus complexes et plus lourds que ceux qui sont mis en œuvre actuellement : en particulier, une augmentation sensible du nombre des étapes dans les opérations du cycle et des contraintes de radioprotection. Il resterait par ailleurs nécessaire de préciser l'évaluation économique de cette nouvelle approche.

Toutes ces études sont encore théoriques, ou reposent sur des travaux expérimentaux menés sur des réacteurs de recherche ; la faisabilité industrielle doit être examinée avec l'objectif d'optimiser la nature des déchets ultimes qui seront mis au stockage. La construction d'un prototype de réacteur à spectre de neutrons rapides, tel qu'Astrid, est prévue par la loi rappelée ci-dessus ; un tel prototype doit permettre de réaliser une partie des études nécessaires.

La Commission considère que l'effort de recherche déjà engagé doit être maintenu et approfondi. A cette condition, les décisions de déploiement qui seront à prendre en 2030-2040 - futurs réacteurs, usines du cycle, entreposages et stockages - pourront alors être fondées sur les meilleures études scientifiques et techniques.

Dans le présent chapitre sont exposés les principaux acquis des E&R que pilote le CEA dans le cadre de nombreux partenariats (Andra, Areva, CNRS, EDF, institutions étrangères,...), ainsi que les questions actuellement posées.

1.2. TRANSMUTATION ET MULTIRECYCLAGE

La question qui se pose est de savoir si un réacteur capable de transmuter (par exemple un RNR ou un ADS¹²) permet effectivement de consommer l'ensemble des actinides qu'il produit. Un tel cycle fermé suppose que l'alimentation du réacteur en matière fissile est réalisée à partir de la matière fissile produite par le réacteur lui-même, après une étape de retraitement pour extraire cette matière et la reconditionner sous forme de combustible (cf. rapport n° 4).

La faisabilité scientifique de la transmutation a été prouvée par l'analyse de quelques aiguilles contenant des actinides mineurs, irradiées dans différents réacteurs européens (Phénix, Halden, Petten). Mais la démonstration de la capacité d'un système transmutateur à brûler tous les actinides qu'il produit n'a pas encore été faite.

Aujourd'hui, en France, le plutonium est partiellement recyclé en réacteur à neutrons thermiques (Rep) en utilisant des combustibles Mox¹³ qui permettent de brûler une fraction du plutonium produit¹⁴. Ces combustibles sont ensuite entreposés en attendant d'être, soit retraités, soit stockés, mais ils contiennent encore des proportions importantes de plutonium et d'actinides mineurs.

7

1.2.1. Trois actinides importants potentiellement concernés par la transmutation

1.2.1.1. Plutonium

Le plutonium 239, noyau fissile, est produit à partir de l'uranium 238 (noyau non fissile) par capture neutronique ; il constitue la matière énergétique associée à l'uranium 238. Le plutonium peut donc être la matière fissile d'un parc de réacteurs à neutrons rapides, ce qui, pour plusieurs siècles, rendrait la France indépendante de la ressource en uranium.

¹² Accelerator Driven System - Les systèmes sous-critiques dédiés à la transmutation sont pilotés par accélérateur et comportent trois éléments : un accélérateur linéaire, une cible de spallation et un réacteur nucléaire sous-critique.

¹³ Oxydes mixtes d'uranium et de plutonium (Mixed oxydes).

¹⁴ Environ 3 tonnes/an sur les 10 tonnes/an produites.

1.2.1.2. Américium

L'américium 241 est, comme le plutonium, produit dans le réacteur, ou bien il résulte de la décroissance β du plutonium 241 ; l'américium présente deux propriétés importantes :

- Il contribue significativement à la radiotoxicité des colis de déchets du parc de réacteurs actuels (Rep) ;
- Il contribue significativement à la production de chaleur par les colis de déchets, ce qui entraîne une géométrie et des espacements adaptés pour réduire la température maximale dans le stockage.

1.2.1.3. Curium

Le curium est produit par capture neutronique sur l'américium ; il contribue lui aussi à la radiotoxicité et à la production de chaleur par les déchets.

Le curium comporte essentiellement 5 isotopes dont les masses vont de 242 à 246. Seuls les isotopes supérieurs sont des radionucléides à vie longue, mais tous comportent dans leur schéma de décroissance un radionucléide à vie longue, voire très longue. Du fait de leur courte période radioactive, le ^{242}Cm (163 jours) et dans une moindre mesure le ^{244}Cm (18,1 ans) présentent une forte radioactivité et une puissance thermique élevée. Par ailleurs, les isotopes pairs du curium subissent également des fissions spontanées et sont des émetteurs de neutrons importants. Toutes ces caractéristiques rendent la manipulation du curium particulièrement délicate.

Les différents isotopes du curium sont produits par captures neutroniques successives à partir de l'américium, lui-même formé à partir du plutonium. De ce fait, la production de curium est d'autant plus importante que la quantité de ses précurseurs est plus élevée : c'est particulièrement le cas pour les combustibles au plutonium (Mox) ou pour des combustibles qui seraient fortement chargés en américium (CCAm¹⁵).

Les procédés de séparation mis au point au CEA sont suffisamment souples et élaborés pour permettre la séparation dite "groupée" des actinides mineurs (procédé Coex¹⁶) ou encore isoler chaque élément et en particulier l'américium et le curium.

La transmutation du curium seul permettrait :

- de diminuer sa présence dans les déchets. Cependant, cette diminution est peu significative par rapport à l'inventaire des autres actinides présents. A l'inverse, l'inventaire du curium dans le cycle augmente, tout en demeurant faible par rapport à celui des autres actinides mineurs, et encore plus par rapport à celui du plutonium ;
- de diminuer d'un facteur 10 la radiotoxicité des colis sur l'intervalle 1 000-10 000 ans ;
- de réduire la puissance thermique et permettre ainsi de densifier le stockage. Cependant, si cela s'avère vrai pour des colis entreposés 70 ans avant stockage, ce bénéfice disparaît presque entièrement après un entreposage de 120 ans dans la mesure où la composante thermique du curium s'est alors pratiquement éteinte naturellement ;

¹⁵ Couvertures chargées en américium.

¹⁶ Procédé de co-extraction de l'ensemble des actinides mineurs.

- de diminuer d'un facteur 15 la dose de désintégrations α reçue par le verre en situation de stockage. Néanmoins, cela n'a aucune conséquence sur le nombre de colis produits puisque cette dose est déjà sensiblement inférieure à la limite actuellement retenue.

Cependant l'émission neutronique du curium nécessite des dispositifs renforcés de radioprotection ; la thermique ou les risques de criticité¹⁷ rendent difficiles les opérations de fabrication et de transport des combustibles, dans l'hypothèse de la manipulation du curium isolé.

Ces différents constats laissent penser que les inconvénients de la transmutation du curium dépassent largement ses avantages ; s'ajoute à des difficultés techniques importantes, la nécessité de protection spécifique des personnels.

Aussi dans le cadre de l'approche technique actuelle de la transmutation, celle-ci ne peut pas être envisagée pour le curium, sauf à réaliser de nouvelles avancées scientifiques et techniques.

Le reste de l'exposé sera donc centré sur l'actinide majeur, le plutonium, et l'actinide mineur, l'américium, qui l'un et l'autre offrent des intérêts respectifs pour une stratégie de séparation-transmutation.

1.2.2. Vitesse de transmutation

Le système transmuteur (RNR ou ADS) consomme des actinides en même temps qu'il en produit. Dans un parc de RNR fonctionnant pendant plusieurs décennies, l'inventaire en actinides se stabilise. L'efficacité de transmutation, et donc le niveau de stabilisation, dépendent du flux de neutrons dans le système et des sections efficaces de transmutation.

Le paramètre qui, au premier ordre, influe sur l'efficacité et la vitesse de la transmutation, est le flux de neutrons disponibles. Ceci explique l'importance de la géométrie du système "*réacteur et cibles de transmutation*".

L'efficacité la plus grande serait obtenue en plaçant les actinides au centre du cœur du réacteur, là où le flux neutronique est le plus grand, mais ce n'est pas une configuration dans laquelle il est possible de piloter, de manière sûre, un RNR. Deux configurations sont donc à l'étude : le mode homogène et le mode hétérogène. Le mode homogène correspond à une dilution en faible quantité (3 à 5 %) des actinides mineurs dans l'ensemble des éléments combustibles du réacteur. Le mode hétérogène est une configuration où le cœur du réacteur est inchangé, mais des assemblages à fortes teneurs en actinides mineurs (au moins 10 %) sont positionnés à sa périphérie (concept CCAM¹⁸). Cette dernière option offre l'avantage de ne pas perturber la configuration classique du cœur, elle permet des teneurs plus élevées d'actinides mineurs mais elle est moins favorable en termes de flux neutronique.

¹⁷ Par exemple, 59 g pour le curium 245.

¹⁸ Couvertures chargées en actinides mineurs.

Le nombre de cycles dépend de l'efficacité du système. La durée du cycle est donnée par la durée de passage en réacteur à laquelle s'ajoute la durée du traitement des combustibles (extraction des produits de fission pour être vitrifiés et des actinides pour fabriquer de nouveaux combustibles) ; elle est d'environ 14 ans pour le mode homogène et 21 ans pour le mode hétérogène.

Quelle que soit la technologie mise en œuvre, la transmutation est un processus lent ; il faudra plusieurs dizaines d'années pour stabiliser l'inventaire en plutonium et en actinides mineurs dans le cycle. Mais cette stabilisation est possible.

Le raisonnement s'applique à tous les actinides : le plutonium et les actinides mineurs. Mais de fait, l'option de la transmutation des actinides mineurs pour optimiser le bilan radiotoxique des déchets n'a de sens que si l'on envisage d'abord de gérer le plutonium, dont les quantités sont 10 fois plus importantes que celles des actinides mineurs.

1.3. OUTILS DE DÉMONSTRATION

Les E&R que pilote le CEA, en partenariat avec EDF et Areva, s'appuient sur des analyses de scénarios, le développement d'un programme appelé Astrid qui comprend le prototype et les installations associées, et enfin, une étude de l'impact de la transmutation sur le stockage.

Le prototype Astrid est l'installation maîtresse du dispositif qui devra permettre de conduire les démonstrations, en vraie grandeur, de la transmutation. Ce prototype est un réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium, électrogène, intégrant le retour d'expérience de Phénix et Superphénix, mais répondant aux critères de la 4^{ème} génération.

10

Comme elle l'a rappelé dans ses deux précédents rapports, la Commission estime urgent de disposer d'un réacteur à neutrons rapides accessible à la communauté scientifique en charge de l'étude de la transmutation.

Dans son dernier rapport, la Commission avait, en outre, attiré l'attention sur la nécessité d'un pilote de retraitement associé à Astrid qui seul pourra permettre de faire la démonstration que le réacteur peut être alimenté en boucle par ses propres déchets. Astrid et son pilote de retraitement associé constituent le système pour démontrer la capacité d'un système transmutateur à brûler les actinides qu'il produit.

Il existe de par le monde plusieurs équipes scientifiques qui étudient la transmutation du plutonium et des actinides mineurs dans des RNR (cf. chapitre III du présent rapport). La Commission souligne qu'un effort de recherche soutenu est indispensable pour permettre à la France de garder son avance scientifique et technique.

Les différents volets d'E&R actuellement pilotés par le CEA, en lien ou partenariat avec l'Andra, Areva et EDF, vont être examinés dans ce qui suit.

1.4. ÉTUDES DE SCÉNARIOS

Dans le cadre du programme Astrid, les études de scénario sont développées conjointement par le CEA, EDF et Areva. Elles permettent d'établir une méthodologie d'estimation du bilan des matières et des déchets radioactifs sur un parc électrogène de 430 TWhe/an correspondant au cas français ; l'ensemble des chiffres constituent des ordres de grandeur.

L'une des hypothèses est le remplacement progressif du parc de Rep actuel, par des réacteurs à neutrons rapides pour diminuer la production de déchets, ce qui correspond à étudier l'évolution d'un parc de 3^{ème} génération vers un parc de 4^{ème} génération, avec un nouveau type de déchets associés. La comparaison des bilans de matière entre les deux types de parc est présentée en annexe (cf. *annexe 2, tome 2*).

Dans une étude réalisée par le CEA, EDF et Areva, trois versions de parcs électrogènes de 430 TWhe/an ont été approfondies :

- Un parc constitué de Rep qui produirait annuellement 10 tonnes de plutonium, 1 tonne d'actinides mineurs et 7 000 tonnes d'uranium appauvri issu de l'enrichissement de l'uranium 238. Le fonctionnement d'un tel parc conduirait en 2150 à l'accumulation d'environ 1 900 tonnes de plutonium.
- Un parc constitué de Rep utilisant du Mox (mono-recyclage du plutonium) ce qui diminue le flux de plutonium. Ceci conduirait en 2150 à l'accumulation d'environ 1 300 tonnes de plutonium.
- Un parc constitué de RNR qui, annuellement, produirait 2 tonnes d'actinides mineurs et nécessiterait 50 tonnes d'uranium appauvri. Ce parc utiliserait le multi-recyclage du plutonium et permettrait d'utiliser l'uranium appauvri, en petites quantités eu égard au stock existant de plus de 220 000 tonnes. Il permettrait de s'affranchir de l'opération d'enrichissement en uranium 235. Il conduirait en 2150 à la stabilisation de l'inventaire en plutonium à hauteur de 900 tonnes.

Les deux premiers scénarios mettent en œuvre des réacteurs dont la technologie est mature. Cependant, ils impliquent la poursuite de l'industrie minière et des opérations d'enrichissement en uranium 235. Si l'on poursuit cette stratégie, le plutonium du combustible utilisé est un déchet qui continue de s'accumuler. *In fine*, les verres destinés au stockage contiendraient du plutonium.

Le troisième scénario fait appel à une technologie plus innovante mais qui s'appuie sur le retour d'expériences des RNR. Elle ne nécessite plus d'enrichissement en uranium 235, le stock de 900 tonnes de plutonium produit constitue une ressource continuellement recyclable jusqu'à l'arrêt de cette filière, même si elle dure plusieurs siècles. Ce stock sera alors à gérer comme un déchet.

Un scénario qui n'a pas encore été présenté est celui de l'arrêt précoce du nucléaire qui poserait la question de la gestion de toutes les matières nucléaires devenues *de facto* des déchets.

Pour la Commission, l'analyse de ces scénarios démontre la nécessité, en matière de stratégie nucléaire industrielle, d'avoir une vision à très long terme. La filière RNR prend son sens dans une stratégie de poursuite du nucléaire électrogène avec une préoccupation d'économie de la ressource (cf. annexe 2, tome 2) et de diminution de la production de déchets.

1.5. PROTOTYPE ASTRID

La démonstration de faisabilité industrielle exigera que deux utilisations simultanées du réacteur à neutrons rapides Astrid aient été validées :

- Réacteur électrogène : le combustible irradié provenant du cœur du réacteur devra subir, en vraie grandeur, les opérations de dissolution, de séparation des divers éléments, et de recyclage du plutonium, auquel sera ajouté de l'uranium appauvri, pour constituer le combustible du nouveau cœur.
- Réacteur pour la transmutation : Il faudra isoler l'américium dans la phase de séparation et le conditionner pour fabriquer le combustible adéquat, selon que la transmutation est réalisée en mode homogène (quelques % d'américium) ou hétérogène (environ 10 % d'américium).

Ce réacteur est conçu pour développer une puissance de 600 MWe dans sa version électrogène. Il bénéficie de l'expérience acquise avec les réacteurs Phénix et Superphénix ainsi que des E&R conduites dans le cadre du forum GEN IV dans le monde.

1.5.1. Cœur

Des avancées significatives concernant la sûreté ont été obtenues avec une nouvelle conception du cœur assurant un comportement amélioré lors de situations accidentelles conduisant à un échauffement global du cœur. En particulier, le coefficient de réactivité lors d'une éventuelle dilatation du sodium, est négatif en cas de perte globale du débit primaire, ce qui, dans le cas où une phase d'ébullition généralisée du caloporteur serait atteinte, correspondrait à un effet de vide global négatif.

Cette spécificité nouvelle par rapport à des cœurs standards¹⁹ semble susceptible d'être extrapolée à des cœurs de forte puissance. Les premières études de transitoires accidentels de perte de débit ou de source froide, sans chute des barres, montrent un comportement naturel favorable du cœur. Ces caractéristiques intéressantes restent à confirmer dans la suite des études.

¹⁹ Les trois partenaires (CEA, EDF et Areva) ont déposé un brevet en 2010.

1.5.2. Refroidissement-conversion

Les innovations concernant les circuits de refroidissement et de conversion visent à améliorer la sûreté en évitant partiellement ou totalement tout contact sodium-eau en situation accidentelle. Deux approches sont ainsi explorées :

- Des échangeurs sodium-eau "segmentés" qui, en cas de rupture de circuit, limiteraient l'extension et la propagation d'un feu et permettraient de le juguler.
- Un circuit intermédiaire entre le circuit secondaire sodium et le circuit d'eau. Ce circuit intermédiaire pourrait être un circuit gaz (hélium-azote) ou métaux fondus (plomb-bismuth).

Ces circuits intermédiaires sont conçus de telle sorte qu'ils puissent être ajoutés ultérieurement au prototype Astrid "sodium-sodium-eau" actuel, sans nécessairement provoquer de retard dans la construction de l'ensemble, sous réserve que le choix du cycle thermodynamique ait été décidé suffisamment tôt.

1.5.3. Conceptions et matériaux pour Astrid

La conception d'Astrid correspond à un compromis entre un prototype industriel de production d'électricité, un réacteur permettant de tester les options de transmutation, et un réacteur d'irradiation des matériaux. Cette nécessité de réaliser à la fois la flexibilité exigée de réacteurs d'étude d'options innovantes, et la fiabilité attendue d'un outil de production d'électricité, impose un cahier des charges complexe, et un choix de gamme de puissance de 600 MWe avec des choix de conception devant être extrapolables à 1 500 MWe.

Les choix de conception s'appuient sur le retour d'expérience des RNR en France (concept intégré), et sur des innovations motivées par une sécurité accrue. Le récupérateur de corium est directement inspiré des EPR. Les échangeurs sodium/eau de Phénix sont remplacés par des échangeurs sodium/sodium/eau qui doivent permettre en principe d'éviter la pollution radiologique en cas d'interaction entre le sodium et l'eau. Comme vu au paragraphe 1.5.2., ces échangeurs pourront évoluer vers des échangeurs sodium/sodium/gaz sans « re-conception » majeure, ni changement de matériaux ; ce qui ne serait d'ailleurs pas envisageable dans les délais actuels. Le choix de la température de sortie de 550 °C permet de rester dans des gammes de choix de matériaux "classiques" (aciers inoxydables 316L(N), 304L et aciers Cr-Mo). La réflexion d'ingénierie sur le fonctionnement (manutention des assemblages pour minimiser les temps d'arrêt, inspectabilité des structures en milieu sodium), l'organisation du programme dont le CEA est maître d'œuvre, avec des collaborations explicitées d'EDF et d'Areva, donnent une logique de projet bien structuré, tout à fait adaptée à la réalisation d'un prototype.

Le sodium, choisi comme fluide caloporteur dans le cœur et le circuit primaire, est peu agressif d'un point de vue chimique vis-à-vis des matériaux : ce type de réacteur est pratiquement exempt du problème de corrosion sous contrainte et d'irradiation, ce qui est un problème des Rep, en particulier pour les éléments internes de cuve. Le circuit secondaire et les échangeurs de vapeur ont des cahiers des charges similaires à ceux des Rep : on peut s'appuyer sereinement sur l'expérience acquise. Compte tenu des délais très serrés avant la réalisation d'un prototype, ce choix de matériaux éprouvés apparaît comme tout à fait judicieux.

Le choix des matériaux de structure qui seront mis en œuvre initialement dans Astrid, s'appuie sur l'expérience acquise dans les différents RNR qui ont fonctionné dans le passé. Les solutions innovantes, notamment les matériaux de gainage, nécessitent de nouvelles études, en particulier en ce qui concerne leur comportement sous irradiation.

Les problèmes de vieillissement des structures qui sont au cœur de la problématique "matériau" du parc actuel, doivent être anticipés pour le parc de RNR. Les études peuvent s'appuyer en partie sur l'expérience acquise dans les composants de Rep en 316 et 304 (matériaux des internes de cuve). Toutefois, les conditions d'irradiation dans les réacteurs RNR sont notablement différentes de celles des Rep, et le comportement sous irradiation des aciers inoxydables 316 et *a fortiori* des matériaux de gainage (Ferrite martensitiques, ODS²⁰) peut être différent. Les études ne pourront pas s'appuyer seulement sur les expertises déjà acquises. Ces études de fond doivent faire partie de la mission d'Astrid. Il serait judicieux d'inclure dans la conception d'Astrid la présence d'échantillons témoins qui permettraient de suivre le vieillissement de la cuve. Des recherches sont à décliner en termes de conception et d'innovation (cf. annexe 4, tome 2).

La Commission juge indispensable que, non seulement les choix de conception, mais encore le fonctionnement effectif du réacteur, permettent son utilisation comme outil de recherche sur les matériaux et sur la transmutation, et que cet aspect de la fonction d'Astrid ne disparaisse pas derrière la nécessité de disposer d'un prototype de réacteur producteur d'énergie.

Les exposés qui ont été présentés sont convaincants comme travail de « bureau d'études » et tracent les lignes d'un projet qui semble réaliste. La Commission demande que lui soit présenté le plan de réalisation industrielle d'Astrid. Ce plan devra expliciter l'existence et la disponibilité des moyens de fabrication, ainsi que le calendrier et les délais nécessaires aux différents acteurs pour réaliser dans des délais raisonnables les composants d'Astrid.

La Commission rappelle la nécessité de disposer d'Astrid au plus près du délai imparti et que tout retard risque de s'accompagner d'une perte des compétences encore présentes. Elle souligne aussi que le programme scientifique, dont le réacteur Astrid sera l'outil principal, devra comporter un volet important de recherches. Celui-ci est en effet indispensable à l'obtention des innovations nécessaires à ce type de réacteur.

1.6. RETRAITEMENT ET FABRICATION DU COMBUSTIBLE

Pour valider le multirecyclage des actinides en réacteur à neutrons rapides, il faudra disposer du réacteur Astrid et d'un pilote de retraitement qui permettent de tester les différentes opérations liées au recyclage du plutonium et de l'américium, après irradiation du combustible.

²⁰ Aciers ferritiques renforcés par dispersion d'oxydes.

En effet, au-delà des aspects de physique au cœur du réacteur, si l'on veut mettre en œuvre et évaluer la faisabilité technique de la transmutation, il est nécessaire de réaliser et de valider plusieurs opérations successives relevant de la chimie des solutions, des sciences de la séparation et des sciences des matériaux. Il s'agit de démontrer que l'on maîtrise la dissolution du combustible irradié, la séparation des divers éléments, puis le reconditionnement du plutonium et des actinides sous forme d'un combustible avec des teneurs en actinides bien plus élevées que dans les combustibles Rep. L'objectif d'un pilote de retraitement, tel que préconisé par la Commission dans son rapport précédent, est d'être en mesure de décliner toutes les opérations que devra subir un combustible irradié provenant d'Astrid, afin de démontrer qu'il est industriellement possible de recycler le plutonium, c'est-à-dire de mettre en forme les actinides en vue de leur transmutation, pour, *in fine*, alimenter Astrid avec ses propres actinides.

1.6.1. Expériences et acquis

Le programme en cours au CEA, qui doit se poursuivre jusqu'en 2013, a déjà permis de valider la dissolution de 4 kg de combustible irradié. Les étapes de concentration des raffinats qui permettront la mise en œuvre du procédé ExAm²¹ pour la séparation et le conditionnement de l'américium se poursuivent. Plusieurs opérations majeures sont d'ores et déjà validées :

- l'endurance des procédés : des essais d'irradiation des systèmes d'extraction d'une durée de 1 000h (simulant 1 à 2 années d'exploitation) dans une boucle d'irradiation montrent la stabilité des divers composants ;
- le pilotage des procédés : l'utilisation de la spectrophotométrie directe (américium, néodyme) en laboratoire, permet le suivi et le pilotage du procédé ;
- les essais de co-conversion U-actinides mineurs (solutions synthétiques) : elles ont pour but de reconditionner les actinides mineurs, et conduisent à des produits avec les bonnes caractéristiques requises.

La faisabilité scientifique des opérations permettant de réaliser la séparation de l'uranium, du plutonium, des produits de fission et des actinides a été validée. Des recherches approfondies ont permis de créer des molécules capables de reconnaître spécifiquement l'uranium, le plutonium, le neptunium, l'américium et le curium, et de résister à la radiolyse²². Plusieurs procédés ont été mis au point pour choisir les groupes de métaux ou les éléments que l'on souhaite séparer à partir de la solution obtenue par dissolution du combustible irradié.

La Commission souligne l'importance des acquis obtenus par le CEA à travers l'ensemble des E&R qu'il a conduites dans le domaine de la séparation. La question la plus délicate qui reste à résoudre, est celle de l'industrialisation de l'analyse en ligne, nécessitant le développement de capteurs et de senseurs.

²¹ Extraction de l'américium.

²² Décomposition d'un corps chimique par les rayonnements ionisants.

1.6.2. Pilote de retraitement associé à Astrid

Pour établir la faisabilité industrielle de la gestion du combustible irradié, et la capacité du réacteur à être alimenté par ses propres actinides, il va falloir tester les performances d'une chaîne complète de retraitement intégrant séparation et fabrication, au-delà de l'échelle du laboratoire.

Un pilote de retraitement doit permettre de gérer des concentrations d'actinides en augmentation sensible, comparées à celles rencontrées lors du retraitement de combustible irradié provenant des Rep actuels. Il doit également démontrer que l'américium pourra subir un traitement adéquat pour son conditionnement et sa transmutation. En effet, basée sur des assemblages non "classiques", à haute teneur en actinides mineurs (au moins 10 %), la gestion des couvertures chargées en américium (CCAm), est nécessairement découplée de celle du cœur. De plus, soumis à un flux moindre en raison de leur situation en périphérie, les assemblages des CCAm doivent rester dans le réacteur un temps beaucoup plus long que dans le cas du mode homogène. Cela entraîne une augmentation de l'inventaire en actinides mineurs.

S'agissant du plutonium, il conviendra d'optimiser la séparation de telle sorte que les déchets vitrifiés issus du retraitement du combustible usé d'un RNR ne contiennent que des quantités infimes de plutonium. Ceci est techniquement réalisable avec les procédés mis au point en ajustant le nombre d'étages dans l'unité de séparation, afin d'obtenir la teneur souhaitée en sortie.

L'intérêt d'une stratégie industrielle reposant sur Astrid ne peut être totalement établi sans un pilote de retraitement (cf. rapport n° 4 de la CNE2), une unité de fabrication du combustible et une ligne spécifique pour gérer le retraitement des couvertures chargées.

Le CEA semble avoir intégré cette idée ; mais il conviendra de s'assurer de sa concrétisation dans des conditions permettant de gérer des quantités d'actinides mineurs industriellement représentatives (quelques kg d'américium).

1.7. TRANSMUTATION EN ADS²³

Les systèmes sous-critiques dédiés à la transmutation (ADS) sont pilotés par accélérateur et comportent trois éléments : un accélérateur linéaire, une cible de spallation et un réacteur nucléaire sous-critique.

La transmutation est réalisée dans un système spécialement dédié, disjoint du réacteur producteur d'électricité. Le cœur, en mode sous-critique, permet en principe un fort chargement en actinides mineurs. Pour fonctionner, comme il est sous-critique, le réacteur doit être alimenté en neutrons par une source externe composée d'un accélérateur de protons et d'une cible de spallation.

²³ Accelerator Driven System.

Un tel système est un objet technologique très complexe et nombre d'incertitudes restent à lever quant à sa faisabilité et aux pilotage et contrôle de sa sûreté. Les E&R sur les ADS sont conduites dans le cadre du programme européen Eurotrans, mais le retour d'expériences sur ce type de machine est à ce jour encore inexistant ; un point d'ensemble est proposé en annexe (cf. annexe 5, tome 2).

La Commission note l'important effort de recherche du CNRS-Pacen (cf. annexe 1, tome 2) concernant l'accélérateur et le faisceau, ainsi que les travaux du CEA axés sur le combustible, à haute teneur en actinides, et les matériaux. Les autres recherches technologiques se font principalement à l'étranger, dans le cadre de projets européens ou nationaux.

1.8. TRANSMUTATION ET STOCKAGE

L'intérêt de réduire la quantité d'actinides mineurs dans les déchets peut s'apprécier selon au moins deux critères : la radiotoxicité de l'inventaire et l'emprise du stockage. L'Andra, associée au CEA, a présenté une étude d'un certain nombre de scénarios pour estimer l'impact de la transmutation sur le stockage qui serait mis en œuvre pour un nouveau parc électronucléaire, dans une situation géologique similaire à celle de Meuse/Haute-Marne.

1.8.1. Radiotoxicité de l'inventaire

La radiotoxicité de l'inventaire caractérise la nocivité intrinsèque des déchets. Elle est définie comme la dose qui serait reçue en cas d'exposition interne à la totalité de la matière radioactive contenue dans les déchets (terme "source").

Dans un cas théorique favorable où l'on pourrait ne mettre que les produits de fission au stockage – après séparation-transmutation de tous les actinides (plutonium et actinides mineurs) - la radiotoxicité par ingestion serait réduite d'un ou deux ordres de grandeur, passé 500 ans.

Dans le cas où l'on transmuterait l'américium seul, on aurait une réduction d'un ordre de grandeur au cours du premier millénaire, mais qui s'atténuerait ensuite en raison du plutonium 240, produit par décroissance radioactive du curium 244.

A production d'électricité nucléaire constante, la transition vers un parc constitué uniquement de RNR ne peut être réalisée sans la constitution d'un stock de plutonium, à partir de réacteurs à eau pressurisée (existants ou à construire) dont les déchets seront des verres identiques à ceux de l'inventaire actuel. En conséquence, à l'échéance par exemple de 2150 où tout le parc serait RNR, comme les actinides mineurs de ces déchets Rep n'auront pas été recyclés, la radiotoxicité des déchets ainsi engendrés resterait proche de son niveau sans transmutation.

En tout état de cause, sauf à pouvoir éliminer des déchets la totalité des actinides (plutonium compris), le gain sur la radiotoxicité reste modeste en raison, d'une part des déchets déjà produits sans transmutation, d'autre part de la présence de certains actinides à vie très longue.

L'Andra a mis en évidence la forte rétention des actinides en milieu géologique réducteur. Par conséquent, dans un tel milieu, l'impact dosimétrique des actinides est nul. La transmutation des actinides n'aurait donc pas d'influence sur l'impact radiologique du stockage, sauf en cas d'intrusion.

1.8.2. Puissance thermique résiduelle des déchets HAVL

La puissance thermique résiduelle des déchets HAVL après retraitement et entreposage, donne lieu à une élévation de température dans le stockage. Les conditions de sûreté à long terme ont conduit l'Andra à calculer une limite à 90 °C de la température au contact de la roche.

Les produits de fission (césium 137 et strontium 90) ont une contribution significative pendant 120 ans. Au-delà, la puissance thermique des colis HAVL est essentiellement due à l'américium 241. C'est pourquoi, la transmutation de l'américium et une durée d'entreposage adaptée pour laisser décroître la puissance des produits de fission et du curium, pourraient offrir une réduction de l'emprise souterraine du stockage.

En comparaison du cas où les colis HAVL, produits par le parc de RNR, contiennent les produits de fission et les actinides mineurs (mais ne contiennent pas de plutonium, comme les verres actuels), la transmutation de l'américium seul offre les gains suivants :

- une réduction d'un facteur 2 à 2,5 de l'emprise de la zone de stockage des HAVL et de 30 % du volume excavé, après entreposage de 70 ans ;
- une réduction d'un facteur 4,6 de l'emprise de la zone de stockage des HAVL et de 50 % du volume excavé, après entreposage de 120 ans.

18

Le gain est donc significatif sur l'emprise et le volume excavé, même dans le cas de la transmutation de l'américium seul. Cependant c'est un gain limité à la zone de stockage des déchets HAVL. Il convient aussi de noter que le seul allongement de la durée d'entreposage des colis ne diminue que de 23 % l'emprise de la zone HAVL. L'américium 243 a une période de plus de 7 300 ans qui ralentit la décroissance du dégagement thermique et limite la possibilité de réduire l'emprise du stockage.

La transmutation de l'américium permet également de réduire la durée de la phase thermique – période où l'interface entre l'acier et la roche est à une température supérieure à 50 °C - qui passe de 2300 ans à moins de 200 ans.

S'il y a bien un impact, sur le futur stockage, de la séparation-transmutation de l'américium seul, compte tenu de sa contribution à la charge thermique du stockage, la Commission note que celui-ci ne porte que sur l'emprise du stockage et les volumes excavés. Elle souligne que ce futur stockage pourrait requérir de nouvelles conceptions pour mieux tirer parti des possibilités offertes par la transmutation.

Théoriquement les actinides mineurs restant immobilisés dans l'argile aux propriétés réductrices, les laisser dans le stockage ne présente pas d'inconvénients majeurs du point de vue des calculs de sûreté, hors le cas d'intrusion humaine. Par contre, la réduction significative de l'emprise, la réduction des volumes excavés et celle de la radiotoxicité pour une partie du terme source, constituent des avantages assez marqués pour être pris en compte par les décideurs.

1.9. AUTRES SCÉNARIOS

A ce jour, la gestion du plutonium dans le cas de la poursuite de la production d'électricité par des réacteurs de type Rep, ainsi que la gestion de l'uranium appauvri, n'ont pas été prises en compte dans les projets de stockage envisagés.

D'autres scénarios devraient également être explorés :

- Serait-il judicieux de conditionner l'américium et le curium isolément pour les stocker dans un compartiment spécifique ? Cela conduirait à un stockage des seuls produits de fission, d'une emprise réduite, et dont la radioactivité, après quelques siècles, reviendrait au niveau de la radioactivité d'un minerai d'uranium. Ce scénario impliquerait d'étudier le conditionnement spécifique des actinides en utilisant les connaissances acquises lors de la mise au point de matrices pour la transmutation dans Phénix, HFR, Halden. Pour fixer les idées, aujourd'hui la production européenne d'actinides mineurs est de quelques tonnes par an.
- Faut-il retraiter le combustible utilisé après un temps d'entreposage court ? La diminution significative de la quantité d'américium aurait une incidence forte sur la thermique des déchets et donc sur l'emprise du stockage (mode de transmutation "endogène" car elle se ferait en amont du processus de décroissance des actinides ; cf. annexe 6).

La Commission souhaite que le CEA lui présente une stratégie de recherche pour explorer le retraitement du combustible utilisé après un temps d'entreposage le plus court possible.

En conclusion, la problématique de l'impact sur un stockage futur de la séparation-transmutation, fait émerger des questions liées aux flux nouveaux de matières et de déchets à considérer. Dans ce contexte, il conviendrait que l'optimisation de l'utilisation du site fasse l'objet d'une réflexion, sans a priori, au vu des différentes options dont on voit bien qu'elles modifient, dans des proportions significatives, les paramètres d'espace et de temps du stockage.

1.10. CONCLUSION

La séparation-transmutation n'a de sens que si elle s'applique d'abord au plutonium avec la mise en œuvre de RNR. La séparation-transmutation des actinides mineurs est scientifiquement possible. Elle est praticable pour l'américium, elle est très difficile pour le curium. Cette séparation-transmutation présente un certain nombre d'avantages qui sont de réduire la radiotoxicité des déchets et l'emprise du stockage, et peut contribuer à l'acceptabilité par le public.

Dans la décision à prendre par le législateur sur l'opportunité de cette stratégie, ces faits doivent être mis en regard des difficultés technologiques et des surcoûts probables.

Chapitre 2

STOCKAGES ET ENTREPOSAGES

2.1. INTRODUCTION

Pour l'élaboration du présent rapport, la Commission a travaillé avec le concept de stockage défini par le Dossier 2005 et précisé par le Dossier 2009, qui constituait le résultat d'une démarche scientifique et technique cohérente.

Les résultats de son évaluation, dans ce cadre, sont présentés dans le chapitre 2 du présent rapport à travers les points successifs suivant : l'inventaire de dimensionnement du stockage géologique, la Zira²⁴, les zones d'implantation en surface (ZIIS), les travaux scientifiques (thermique, géomécanique, expériences en laboratoire souterrain), la réversibilité, et enfin la mémoire du site de stockage. Par ailleurs, sur la base de documents reçus en fin d'exercice (de juin à octobre), la Commission donne une première et brève analyse du projet Cigéo²⁵ de l'Andra.

Les récents événements au Japon ont mis en lumière la sensibilité particulière des installations d'entreposage en surface, notamment en piscine. La Commission a prévu d'analyser en 2012 les études menées par les producteurs de déchets sur les modalités d'entreposage prévues sur leurs sites respectifs.

2.2. INVENTAIRE

Les déchets qu'il est actuellement prévu de prendre en charge en stockage géologique sont ceux de moyenne ou haute activité à vie longue qui auront été produits par le parc actuel. Leur liste sera établie dans un document intitulé "Programme Industriel de Gestion des Déchets" (PIGD) établi par l'Andra à partir des données remises par les producteurs. Il devra comprendre un inventaire enveloppe établi suivant un périmètre précis figé jusqu'au dépôt de la Dac²⁶. Il comportera des réserves pour prendre en compte les incertitudes d'inventaire et les déchets dont la production n'est pas certaine.

La gestion des flux de colis ne prévoit pas d'entreposage sur le site de Cigéo susceptible de se substituer à celui des producteurs, mais uniquement l'existence d'un entreposage "tampon" pour accueillir les colis de déchets qui seront stockés en flux tendu. Des chroniques prévisionnelles de livraison des colis seront établies pour s'assurer de la compatibilité entre les besoins des producteurs et les capacités instantanées de stockage.

²⁴ Zone d'intérêt pour une reconnaissance approfondie.

²⁵ Centre industriel de stockage géologique.

²⁶ Demande d'autorisation de création du stockage.

Si un stockage était ouvert en 2025, sa fermeture ne pourrait intervenir avant 2125. Avant cette date, la politique énergétique de la France peut connaître des évolutions importantes qu'il est difficile d'anticiper. Par exemple, notre pays peut décider de renoncer à la production d'énergie électronucléaire et/ou au retraitement des combustibles. Il est vraisemblable que, dans un tel cas, il faudrait stocker des quantités importantes de combustibles irradiés très exothermiques ; le Dossier 2005 de l'Andra examinait cette hypothèse, qui n'est plus retenue par la loi de 2006. A l'inverse, notre pays peut faire le choix de développer des réacteurs EPR et peut-être, au-delà de 2040, des réacteurs RNR qui engendreront à leur tour des déchets.

Dans ces deux hypothèses, deux options au moins se présenteraient. L'une serait de créer un nouveau stockage. L'autre serait d'agrandir le stockage existant dans la couche du Callovo-Oxfordien qui, dans l'état actuel des connaissances, paraît présenter des surfaces géologiquement favorables plus étendues que ce qui est nécessaire pour le stockage envisagé aujourd'hui. Le moment venu, ce choix devra être débattu dans un cadre défini par la loi.

La Commission souligne que, à dix huit mois du Débat public, il est indispensable que l'inventaire de dimensionnement du stockage qui figurera dans la Dac et qui constitue une forme de contrat avec l'ensemble des parties prenantes, soit arrêté de manière précise et limitative.

En ce qui concerne les déchets FAVL²⁷ (radifères et graphites), pour lesquels aucun site de stockage n'a pour l'instant été envisagé, l'Andra conduit une veille technologique sur les graphites pour étudier les modalités optimales de leur stockage.

2.3. ZIRA

Depuis 1995, de très nombreux forages ont été réalisés dans la région de Meuse-Haute Marne et de nombreux profils de "sismique réflexion" 2D et 3D ont été retraités (cas de l'ancienne sismique pétrolière) ou acquis par l'Andra (15 km de 2D en 1995, 4 km² de 3D en 1999) afin de reconnaître l'architecture du sous-sol et caractériser le degré d'hétérogénéité au sein des argilites callovo-oxfordiennes et de leurs encaissants. Ces données ont tout d'abord permis de définir une zone de transposition d'environ 250 km² où pourraient être identifiées une ou plusieurs zones d'intérêt pour une reconnaissance approfondie (Zira) d'une trentaine de km² destinées à l'implantation d'un stockage.

Ces données de sub-surface, complétées par des levés géologiques détaillés et les travaux menés dans le laboratoire souterrain, ont permis à l'Andra de sélectionner une Zira de 28,5 km², où pourrait être installé le futur stockage souterrain ; celle-ci a été approuvée par le Gouvernement, fin 2009. Cette Zira fait à présent l'objet de reconnaissances approfondies selon un programme scientifique établi par l'Andra, dont la composante essentielle en 2010 a été la réalisation et l'interprétation d'une campagne géophysique en trois dimensions.

Les éléments ci-dessous synthétisent les points essentiels des acquis géologiques et hydrogéologiques concernant la Zira ; des informations plus détaillées sont données en *annexe (cf. annexe 7, tome 2)*.

²⁷ Faible activité à vie longue.

2.3.1. Apports de la nouvelle campagne géophysique 3D

La campagne de géophysique 3D réalisée en 2010 sur 37,1 km², a permis de couvrir la totalité de la Zira (28,5 km²). Cette campagne a été un succès sur le plan de sa réalisation, grâce à une très bonne couverture de la zone de mesures et une excellente qualité des données recueillies. La rapidité du traitement a permis à l'Andra d'en réaliser les premières interprétations.

Le traitement des données a d'abord porté sur les corrections statiques. L'interprétation structurale est terminée et a produit des cartes qui n'ont pas encore été converties en profondeur. L'interprétation lithostratigraphique a commencé.

Les données géophysiques désormais disponibles sur la Zira démontrent qu'il n'y a pas d'objets structuraux identifiables par sismique - donc de rejet supérieur à 5 m selon l'Andra - au mur et au toit du Callovo-Oxfordien (Cox). Si de tels objets avaient été mis en évidence, ils seraient apparus après le dépôt de l'argilite du Cox et seraient donc susceptibles de traverser cette formation. En l'absence de marqueurs sismiques au sein du Cox, on ne peut toutefois exclure l'existence de fractures, de rejets moindres, qui seraient dues à des tassements différentiels au cours de la sédimentation. Mais de telles fractures devraient rester confinées dans les formations imperméables, sans risque de se prolonger dans les encaissants sus-jacents et *a fortiori* sous-jacents.

La nouvelle campagne sismique confirme l'excellente homogénéité de la Zira. A l'issue des premières interprétations des données sismiques, le modèle géologique 3D apparaît suffisamment robuste pour que l'on puisse exclure la présence de discontinuités structurales traversant la couche du Callovo-Oxfordien et capables d'assurer une liaison hydraulique avec les aquifères encaissants. La présence de discontinuités de faible extension au sein même de la couche ne peut, à ce stade, être totalement écartée. Il faut noter qu'aucun objet de ce type n'a été jusqu'à ce jour rencontré, ni dans les différents forages verticaux ou inclinés réalisés, ni dans le laboratoire souterrain. De tels objets ne seront visibles qu'au cours de la progression du creusement du stockage. Une décision d'entreprendre de nouveaux forages inclinés au sein de la Zira, avant le creusement du stockage, devrait être soigneusement argumentée car ceux-ci pourraient constituer des voies de transfert potentielles reliant le Callovo-Oxfordien à sa couverture.

2.3.2. Connaissance des variations litho-stratigraphiques du Callovo-Oxfordien

L'Andra a fait un très gros effort de compilation et de synthèse des données. Les propriétés pétro-physiques²⁸ des argiles du Cox acquises, d'une part dans les galeries du laboratoire souterrain et d'autre part dans les forages²⁹, sont ainsi reliées aux conditions de dépôt des sédiments du Cox et de ses encaissants.

²⁸ Minéralogie, conductivité thermique, perméabilité, porosité.

²⁹ Où les données sont obtenues par analyses macroscopique et microscopique des carottes et des cuttings, mais aussi par des diagraphies.

La très faible variabilité des propriétés pétrophysiques est désormais bien comprise sur une colonne verticale de Cox ; ces propriétés sont ainsi extrapolables en tout point de la couche à partir des données des puits réels. La variabilité horizontale de ces propriétés peut être anticipée en fonction des modèles paléo-géographiques régionaux et d'environnements de dépôt.

L'Andra dispose à présent d'un modèle géologique conceptuel justifiant la transposition à la Zira des données élaborées à partir des informations acquises dans le laboratoire souterrain.

2.3.3. Connaissance sur l'hydrogéologie régionale et locale

A l'échelle régionale, les argiles du Cox sont encadrées par les formations carbonatées du Bathonien et celles de l'Oxfordien-Kimméridgien-Tithonien, qui constituent des niveaux à plus fortes porosités et perméabilités, et sont donc susceptibles de constituer des drains horizontaux pour les fluides.

En bordure de la zone de transposition, à l'extérieur de la Zira, un ensemble d'accidents structuraux (failles sub-verticales traversant l'ensemble de la série mésozoïque) a été reconnu et carté grâce aux diverses campagnes géophysiques successives.

Les rejets verticaux de ces différents accidents bordant la zone de transposition, et qui sont d'ailleurs intervenus dans la définition de cette zone, sont inférieurs à 100 m et semblent, de ce fait, insuffisants pour perturber la continuité hydrogéologique des aquifères encadrant le Cox. Ces accidents peuvent toutefois constituer des passages privilégiés pour les circulations verticales entre ces aquifères influençant ainsi directement les conditions aux limites hydrogéologiques de la zone de transposition. Ceci justifie l'effort important, réalisé par l'Andra depuis de nombreuses années, pour les caractériser.

A l'échelle du secteur, les écoulements d'eaux souterraines d'origine météorique sont contraints par les niveaux carbonatés du Jurassique supérieur situés au-dessus du Cox, avec une zone de recharge au sud. Vers le nord-ouest, une mince couverture argileuse crétacée a été préservée de l'érosion, sa distribution étant directement contrôlée par le réseau hydrographique.

A l'échelle locale, sur l'emprise de la Zira ou dans son voisinage immédiat, les 19 forages destinés aux corrections statiques de la campagne de sismique 3D de 2010 ont été mis à profit pour acquérir une information complémentaire sur la structure et l'hydrogéologie des calcaires du Barrois qui constituent la formation aquifère affleurante.

Un programme de suivi piézométrique et du débit des sources a été mis en place. Ce point est important pour caractériser l'état initial et apprécier, éventuellement minimiser, l'impact futur des travaux souterrains, en particulier la descenderie qui traversera les calcaires du Barrois.

L'Andra dispose à présent de données hydrogéologiques, essentiellement d'origine bibliographique à l'échelle régionale de l'ensemble du bassin parisien, et de données issues de ses propres travaux de reconnaissance à l'échelle du secteur incluant la zone de transposition, aptes à contraindre un modèle hydrogéologique numérique de simulation des écoulements souterrains dans l'environnement proche et lointain du stockage.

2.3.4. Situation de la modélisation hydrogéologique

Différents outils de modélisation numérique ont déjà été mis en œuvre à l'échelle régionale pour simuler l'écoulement des fluides dans les couches géologiques du Bassin de Paris, à partir d'un bloc géologique 3D bien documenté permettant de décrire l'architecture des failles et des strates, calée sur les données sismiques et de forages. Cette architecture est décrite au moyen de codes de calcul mis au point à l'IFP³⁰, Dionisos pour le modèle litho-stratigraphique et Fraca pour les réseaux de failles.

La modélisation hydrogéologique a été reprise en 2008 par l'Université de Neuchâtel qui a entrepris, avec ses propres outils de simulation, la construction d'un modèle unique rassemblant la problématique régionale et la problématique de secteur. Les travaux sont toujours en cours de développement et aucune avancée significative n'a été présentée à la Commission en 2010.

La Commission considère qu'un effort doit être fourni pour faire aboutir au mieux et rapidement la modélisation hydrogéologique régionale et de secteur. Un tel outil de modélisation est en effet nécessaire pour préciser définitivement le rôle hydraulique des failles bordières de la zone de transposition qui pourraient jouer un rôle sur la définition et le comportement des exutoires de radionucléides susceptibles de diffuser, à très long terme, depuis le stockage vers les aquifères encaissants. L'outil de modélisation sera également incontournable pour prédire puis contrôler l'impact hydrodynamique du creusement des puits d'accès au stockage et de la descenderie. La Commission souhaite que lui soit présentées, avant la Dac, dans le détail, les hypothèses et les conclusions de la modélisation hydrogéologique.

25

2.4. ZIIS - INTÉGRATION DES OUVRAGES DANS LE TERRITOIRE ET L'ENVIRONNEMENT

Les installations de surface sont partie intégrante du projet de centre souterrain de stockage.

En raison de leurs dimensions, de leur impact sur l'environnement et de leurs conséquences socio-économiques, ces installations doivent être étudiées avec le même soin que les installations souterraines même si leur réalisation fera appel à des techniques bien connues depuis longtemps, et expérimentées dans toutes les entreprises où sont manipulés et entreposés des déchets et des matières radioactives.

Ces installations constitueront la partie la plus visible du centre de stockage et auront donc une influence déterminante sur l'acceptabilité du projet par les populations avoisinantes.

Lors de l'audition du 15 octobre 2009, l'Andra avait présenté un projet préliminaire répartissant les implantations de ZIIS :

- une zone nucléaire, de 25 ha environ, où seront réceptionnés, entreposés temporairement, puis reconditionnés les colis primaires ;

³⁰ Institut français du pétrole et des énergies nouvelles.

- une zone industrielle de 35 ha environ où seront implantés les ateliers techniques non nucléaires ;
- une zone administrative ;
- une zone de 120 ha environ où seront stockés et entreposés les déblais de creusement.

L'emprise totale de ces quatre zones devrait donc, en dehors des voies d'accès, représenter une surface de près de 200 ha.

Si le choix d'une liaison entre le fond et la surface par une ou deux descenderies est maintenu, il sera possible de déporter la majeure partie des installations de surface des structures de stockage, ce qui devrait faciliter leur implantation éventuellement dans un département différent. Il ne resterait en effet, à l'aplomb du stockage souterrain, que les puits nécessaires au transport de certains matériels et à la ventilation.

Si la définition d'une ou de plusieurs zones potentielles d'implantation des installations de surface (ZIIS) relève avant tout de négociations avec les autorités locales et les diverses parties prenantes, les critères techniques liés à la sûreté, à la géographie, la géologie et à l'environnement doivent rester déterminants.

2.4.1. Contraintes liées à la sûreté et à la sécurité

Une partie des installations de surface constituera une installation nucléaire de base (INB) où s'appliqueront toutes les contraintes réglementaires liées à ce type d'équipement.

Ainsi, bien que la région où devrait être implanté le centre de stockage ne connaisse qu'une faible sismicité, la règle fondamentale de sûreté, ASN 2006, impose néanmoins que certaines parties de l'INB soient dimensionnées en fonction d'un modèle forfaitaire majoré d'un coefficient de sûreté. Les installations d'entreposage peuvent, elles aussi, constituer une importante source de risque.

Les règles fondamentales de sûreté, édictées par l'ASN, conduiront à prendre en compte tous les autres risques tels que les chutes d'avions, les inondations ou les incendies.

Un des arguments les plus souvent mis en avant pour justifier les stockages souterrains de déchets radioactifs est leur capacité à résister aux agressions externes. Il ne faut toutefois pas oublier que, avant d'être placés en sécurité au fond, ces déchets séjourneront dans des installations de surface beaucoup plus accessibles, qui devront donc être conçues pour résister à toute tentative d'intrusion.

2.4.2. Contraintes environnementales

La possibilité, grâce à une descenderie, de séparer ZIIS et emprise en surface du stockage souterrain permet une assez grande flexibilité dans le choix d'implantation des installations de surface.

Il n'en demeure pas moins que des contraintes environnementales peuvent être de nature à interdire leur implantation sur certains sites tels que les zones habitées, les périmètres de captage des eaux, les zones inondables, les sites Natura 2000, les zones d'intérêt écologiques ainsi que les paysages remarquables.

L'Andra a réalisé, en 2009, une carte de synthèse des contraintes d'implantation en surface qui, bien que peu précise, a l'avantage de répertorier les zones de contraintes fortes où toute implantation est, *a priori* exclue.

L'arrivée dans une région essentiellement rurale d'installations industrielles, sur une surface de 200 ha, aura une influence certaine sur l'environnement et sur l'aménagement du territoire qu'il conviendra d'étudier pour tirer le meilleur parti de cette activité nouvelle.

La création, dès 2009, d'un Observatoire pérenne de l'environnement, et l'établissement d'un état de référence de la biodiversité et de la qualité des lieux, devraient permettre de suivre les éventuelles perturbations qui pourraient survenir aussi bien sur le site lui-même que sur ses accès.

2.4.3. Contraintes imposées par la réversibilité

La possibilité de retirer du stockage les colis de déchets constitue une composante essentielle de la démarche de sûreté. Dans l'éventualité de devoir remonter un colis, les installations de surface devraient être dotées d'équipements de décontamination et d'entreposage. Ce type d'opérations est d'ores et déjà bien maîtrisé par les producteurs de déchets, mais un problème de capacité se poserait si toute une série de colis devait y être entreposée pour une période plus ou moins longue.

La réversibilité, ou même la récupérabilité, ne peuvent donc se concevoir que si les installations de surface ont, dès le départ, été conçues et dimensionnées pour faire face à tous les incidents potentiels car il pourrait être difficile de renvoyer des colis défailants chez les producteurs d'origine.

L'Andra étudie la possibilité de se doter pour cela, dès 2050, d'un module d'entreposage de 100 à 500 m³. Ce volume sera-t-il suffisant pour effectuer les manipulations nécessaires ?

Si cet équipement peut être considéré comme faisant partie intégrante du projet de centre de stockage souterrain, en serait-il de même d'un module d'entreposage destiné à la décroissance thermique de colis de déchets HAVL ?

Ce projet, évoqué à plusieurs reprises dans des documents de l'Andra, permettrait d'accueillir, dans une structure de 725 à 2 000 m³, des colis dont la puissance thermique aurait déjà décru durant une première période d'entreposage à La Hague. Ne s'agirait-il pas d'un projet, distinct de celui du centre souterrain de stockage ? Auquel cas, il devrait faire l'objet d'une procédure spécifique clairement rendue publique.

2.4.4. Inconvénients et avantages de la liaison fond/surface par descenderie

Il est indéniable que le choix d'une liaison fond/surface grâce à une ou deux descenderies permettrait d'élargir la zone potentielle d'implantation des installations de surface, ce qui faciliterait les négociations avec les instances locales.

Ce type de liaison a été adopté pour les projets de centres souterrains de stockage en Suède et en Finlande, mais avec des creusements à réaliser dans des formations granitiques. En France, on devra traverser des terrains calcaires aquifères, éventuellement karstifiés. Il faudra s'assurer que les eaux de la formation ne viendront pas s'infiltrer dans les niveaux sous-jacents.

La Commission souhaite disposer, avant le Débat public, d'études lui permettant d'évaluer la pertinence, sur le plan scientifique et technique, des choix qui seront proposés à l'occasion de ce débat. En effet, si le dialogue avec les responsables politiques et les diverses parties prenantes constitue une donnée essentielle du processus de sélection des zones d'implantation des installations de surface, néanmoins le choix définitif de ces implantations devra s'appuyer principalement sur le résultat d'études objectives des contraintes géographiques, géologiques et environnementales des sites envisagés.

Dès que la localisation des zones d'implantation de surface sera précisée, la Commission estime indispensable de disposer d'une étude sur les perturbations hydrauliques et géologiques qui seraient éventuellement provoquées par le creusement de la ou des descenderies.

28

2.5. VERS UNE RÉALISATION DU STOCKAGE GÉOLOGIQUE : LE CENTRE INDUSTRIEL DE STOCKAGE GÉOLOGIQUE, CIGÉO

L'année 2011 a constitué une étape très importante pour tous les acteurs français du projet de stockage souterrain, en particulier pour l'Andra et les producteurs de déchets, puisque ce projet est désormais en voie de passer d'une phase exploratoire essentiellement consacrée à des travaux de R & D, à sa phase de réalisation industrielle, le projet Cigéo.

Alors que la loi de 2006 mandate spécifiquement l'Andra, et elle seule, pour élaborer le projet de stockage, un élément majeur apparu à la mi-2010, et pleinement concrétisé en 2011, a été la promotion par les producteurs de déchets d'un projet alternatif à celui de l'Andra. Ce projet a été élaboré par EDF, Areva et le CEA s'appuyant sur leur expérience en matière de réalisations dans les domaines nucléaires et de génie civil. Comme l'a souligné l'Opecst³¹ dans son rapport d'évaluation du PNGMDR³², cette démarche semble avoir été motivée par la perspective d'un accroissement important du coût du projet du stockage géologique de l'Andra.

³¹ Cf. rapport Opecst 19 janvier 2011 "Déchets nucléaires : se méfier du paradoxe de la tranquillité" – pp 37-38.

³² Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs.

Le coût du stockage souterrain avait été chiffré en 2005 à 14,1 milliards d'euros (2003) par la DGEMP³³ (actuelle DGEC), soit 16,2 milliards d'euros (2010). Les chiffres qui sont aujourd'hui avancés sont sensiblement supérieurs. On cite les chiffres de 20 à 35 milliards d'euros (2010). C'est l'autorité administrative qui, en vertu de la loi, devra trancher ; il est probable qu'elle attend pour cela la remise du rapport sur le coût de la filière nucléaire demandé à la Cour des Comptes. Ce rapport devrait être disponible en janvier 2012.

Il faudrait que l'on puisse disposer également d'une information sur la structure des coûts : part des coûts fixes, indépendants du rythme d'enfouissement des déchets, part des coûts variables qui sont liés aux quantités stockées. La date d'utilisation du site et le rythme d'enfouissement des déchets devraient avoir un impact sur la clef de répartition des coûts entre les différents producteurs de déchets.

La Commission fait observer qu'elle a demandé avec insistance depuis plusieurs années d'avoir communication des éléments relatifs au coût du stockage. Elle souhaite être tenue informée des chiffres qui seront retenus. Elle souhaite également avoir des informations précises sur la clef de répartition des coûts et sur le surcoût lié à la réversibilité du stockage. La Commission s'interroge sur le fait que le retard à la publication des coûts puisse être le reflet de divergences durables entre le point de vue de l'Andra et celui des producteurs, ce qui serait dommageable au déroulement du projet de stockage.

Jusqu'en mai 2011, la Commission n'a eu qu'une connaissance très réduite du projet des exploitants. Jugeant son information insuffisante, elle a décidé de reporter à la fin de l'année 2011 la publication de son rapport n° 5 dont la remise était initialement prévue en juin.

29

L'information de la Commission a été complétée depuis :

- par sa participation en tant qu'invité à la revue de projet Cigéo mise en place par la DGEC. Cette revue a formulé, début juin, un avis sur le référentiel de données nécessaires au lancement de la phase d'esquisse et sur les exigences qui seront imposées à la maîtrise d'œuvre du projet, ainsi que des recommandations susceptibles de faire converger certaines options des projets de l'Andra et des producteurs ;
- par l'accès au dossier technique du projet STI des producteurs ;
- par une audition privée d'EDF au cours de laquelle lui ont été présentées et justifiées les options de conception du projet STI ;
- par une audition de l'Andra au cours de laquelle lui ont été exposées les spécifications techniques du besoin préliminaire (STBp) du projet Cigéo. Celui-ci constitue l'ossature du cahier des charges de l'appel d'offres sur la maîtrise d'œuvre de la phase d'esquisse, lancé par l'Andra en juillet 2011.

La Commission estime être à présent suffisamment informée.

L'évaluation qui suit synthétise une analyse des principes et options de conception du projet STI, puis reprend les éléments essentiels des exigences techniques du projet Cigéo.

³³ Direction générale de l'énergie et des matières premières.

2.5.1. Analyse synthétique du projet STI

Le projet proposé par les producteurs présente un intérêt certain, car il permet, par différence, de préciser certains principes qui doivent présider à la conception d'un stockage.

Ce projet se place dans le cadre résultant de la reconnaissance géologique effectuée par l'Andra. Il pousse à leur limite, de façon parfois ingénieuse, des pistes de réduction des coûts déjà présentes dans les études de l'Andra. Il possède certaines qualités. Il adopte un point de vue d'ensemble sur le stockage et soumet le projet d'architecture à une étude de sa sûreté. Il met bien en exergue les problèmes difficiles posés par la génération de gaz dans les alvéoles. Il organise systématiquement le dimensionnement des ouvrages à partir d'un modèle de comportement géomécanique fondé sur des essais de laboratoire et les mesures de l'Andra. La Commission n'a toutefois été informée que très récemment du contenu détaillé de ce modèle.

Le projet des producteurs consiste, pour l'essentiel, à allonger sensiblement les alvéoles HAVL, en portant leur longueur de 40 à 130 m, même si cette dernière valeur résulte d'une optimisation technico-économique, dont les résultats paraissent pour le moins fragiles ; à accroître sensiblement le diamètre des alvéoles MAVL et à les allonger, de manière plus modeste ; et, à l'inverse, à raccourcir la longueur des galeries qui relient les alvéoles au pied des ouvrages d'accès au fond. La réduction de la longueur et du nombre de ces galeries de liaison conduit, en vue de simplifier le trajet de ventilation, à disposer les puits de retour d'air au plus loin des puits d'accès. Les accès au fond s'effectuent par deux descenderies distinctes, ce qui permet, dans la zone d'accès, de séparer les travaux de creusement et le transport des colis. Au-delà de la zone d'accès, en revanche, cette séparation est moins nette que dans le projet de l'Andra, en raison du nombre réduit de galeries.

Cette architecture a le mérite d'une grande simplicité géométrique et l'inconvénient majeur d'une flexibilité moindre, la zone de stockage MAVL étant réalisée en une seule fois et la zone HAVL tout entière étant réalisée en deux étapes seulement, ce qui ne facilite pas une adaptation à des aléas ou à des évolutions de conception. Cette architecture conduit à réaliser un petit nombre de galeries de grande longueur, plutôt qu'un réseau rectangulaire ; elle permet l'emploi systématique du tunnelier, ce qui présente des avantages de coût, peut-être aussi de moindre développement de l'EDZ et de sécurité accrue des travaux de creusement, mais exige de grands rayons de courbure des galeries d'accès. Cette méthode de creusement présente une flexibilité bien moindre que la machine à attaque ponctuelle ; elle présente également des risques de coincement, que l'on peut probablement surmonter. Son emploi n'est pas classique dans le cas d'argilites à la profondeur du Cox, mais le pronostic de faisabilité est assez favorable ; d'ailleurs l'Andra avait envisagé son emploi.

Les puits sont réalisés en « *raise-boring* » c'est-à-dire de bas en haut.

L'abandon de la géométrie rectangulaire conduit STI à relativiser l'importance de l'orientation des alvéoles dans le champ de contraintes horizontales, pour laquelle l'Andra, sur la base des observations faites en place, avait choisi une orientation systématique dans la direction de la contrainte majeure, afin de réduire le développement de l'EDZ.

La sécurité vis-à-vis de l'incendie repose sur un principe de sectionnement des galeries par tronçon (portes coupe-feu tous les 400 mètres), très différent de celui prévu par l'Andra.

Des calculs de débit de dose individuelle efficace aux exutoires sont présentés, conformément aux exigences du Guide de sûreté édité par l'ASN³⁴. L'approche numérique est vraisemblablement plus simple que celle proposée par l'Andra dans le Dossier 2005 et l'interprétation reste parfois sommaire. Elle présente néanmoins plusieurs traits intéressants. Les résultats ne sont pas très distincts de ceux de l'Andra et constituent donc une forme de confirmation en partie indépendante de la validité des méthodes de calcul quand on part des mêmes données, au moins pour les ordres de grandeur. Les débits de dose sont faibles en comparaison du critère de 0,25 mSv/an fixé (pour le scénario normal) par le Guide de l'ASN. Cette cohérence des résultats des calculs n'est pas surprenante et confirme une conclusion déjà énoncée par l'Andra : compte tenu des propriétés favorables de la couche du Cox, les débits de dose sont relativement indifférents au choix de l'architecture du stockage. En fait, les débits trouvés par STI sont légèrement supérieurs à ceux obtenus par l'Andra. Il est vraisemblable que ce résultat tient pour une part à une longueur moindre des trajets des radionucléides depuis les alvéoles vers les puits, qui résulte du choix de faire des galeries moins longues. C'est ainsi que, de manière significative, les résultats de STI sont sensiblement moins bons dans le cas du scénario altéré "tous scellements défailants", scénario extrême dont l'Andra avait montré qu'il permettait encore de satisfaire assez largement le critère de 0,25 mSv/an ; avec STI, le débit molaire d'I¹²⁹ est sensiblement accru. En revanche, le choix d'alvéoles HAVL plus longues n'est pas défavorable du point de vue des critères de dose ; les problèmes qu'il pose sont plutôt relatifs à la facilité de la récupérabilité des colis et avant tout à la réalisation du creusement – l'Andra n'a établi pour l'instant, après quelques tâtonnements, que la faisabilité d'alvéoles de 40 m de longueur.

Le problème principal posé par le projet STI est qu'il limite la vérification des objectifs de sûreté à la seule question du respect d'un critère de dose qui, on l'a dit, est relativement indépendant de l'architecture du stockage. Ainsi on peut en apparence simplifier cette architecture, diminuer le nombre et la longueur des galeries, sans véritable effet sur le calcul de dose. Pourtant le Guide de sûreté énonce fortement un second principe : *"Hormis la comparaison des doses individuelles efficaces calculées aux valeurs indiquées, qu'il s'agisse de la situation de référence ou des situations altérées, l'appréciation du caractère acceptable de l'impact radiologique du stockage résulte avant tout de l'analyse des efforts faits par le concepteur du stockage pour que les expositions individuelles soient aussi faibles que raisonnablement possible, compte tenu des facteurs économiques et sociaux"*.

Cela signifie qu'au-delà de l'écriture d'un modèle mathématique du système de stockage, qui permet le calcul de doses, il faut vérifier que l'ouvrage et sa réalisation présentent, à un niveau suffisant, des qualités moins facilement quantifiables, notamment de robustesse, de redondance, de démontrabilité et de flexibilité. De ce point de vue, le projet des producteurs est moins flexible ; la réduction de longueur des galeries de liaison et leur organisation linéaire, qui a pour conséquence logique le dégroupement des puits, offre une sécurité moindre vis-à-vis des circulations de fluides à long terme dans le stockage ; en revanche l'allongement des alvéoles, hormis son impact éventuel sur la récupérabilité, n'a comme inconvénient que sa faisabilité industrielle qui est pour l'instant loin d'être démontrée.

³⁴ Autorité de sûreté nucléaire.

Cela signifie aussi que la qualité globale de l'ouvrage se mesure en évaluant l'ensemble des efforts réalisés pour réduire l'impact radiologique. Le projet STI considéré de manière isolée pourrait paraître présenter des mérites ; l'existence même du projet de l'Andra montre qu'un autre dessin est possible, et qu'il peut être crédité d'un effort supérieur de recherche de réduction de l'impact radiologique. C'est d'ailleurs sur la base de cet effort que ce projet avait été approuvé, pour l'essentiel, par l'ensemble des évaluateurs en 2006 et 2009. En conséquence, le projet STI prend moins bien en compte que celui de l'Andra l'ensemble des objectifs de sûreté prescrits au stockage géologique profond notamment ceux liés au principe Alara³⁵.

La Commission considère que le projet STI a fait apparaître des éléments de discussion propices à faire avancer la réflexion en vue de la réalisation industrielle du projet de stockage souterrain. Ce projet bénéficie de l'expérience d'entreprises rompues à la conception et à la gestion d'installations nucléaires. Cependant, il manque de flexibilité et n'a pas été soumis à un examen complet de la vérification d'objectifs de sûreté impératifs. La Commission regrette que la confrontation des points de vue n'ait pas été portée plus tôt et plus sereinement à la connaissance des évaluateurs.

2.5.2. Conception de la phase d'esquisse du projet Cigéo

Au stade d'avancement des travaux de recherche et des tests de forage d'alvéoles menés dans le laboratoire souterrain de Bure, et compte tenu des nombreuses connaissances acquises sur la géologie régionale, en particulier au niveau de la Zira, lors de campagnes de géophysique 2D et 3D) et de forages ciblés, l'Andra, maître d'ouvrage, a décidé, après la revue de projet Cigéo de procéder à un appel d'offres pour sélectionner le maître d'œuvre. Cette maîtrise d'œuvre devra l'aider en 2012 à finaliser l'esquisse détaillée du projet de stockage Cigéo et à en chiffrer de façon plus précise le coût de réalisation. Ces deux informations devront être disponibles de façon impérative à la fin 2012 pour permettre d'aborder le Débat public programmé pour 2013.

L'Andra a formalisé les spécifications de sûreté et le cahier des charges auxquels devront se conformer les propositions du maître d'œuvre. Ces spécifications reprennent de façon plus opérationnelle les recommandations exprimées en 2009 ; elles sont formulées, en premier lieu, sous forme de principes de conception imposés définissant le cadre général qui ne laissent place à aucune interprétation, en second lieu, sous forme d'options de conception imposées qui s'accompagnent d'une certaine flexibilité et peuvent évoluer sous justification et enfin sous forme de solutions de conception imposées ou interdites qui se réfèrent à un objet ou un équipement intervenant dans la conception.

On peut citer parmi les principales prescriptions :

- la préservation d'une garde de 60 m d'argilite de part et d'autre (au toit et au mur) des galeries et des alvéoles creusées dans le Cox ;

³⁵ Acronyme de "As Low As Reasonably Achievable".

- la conservation d'un espacement minimum entre ces dernières, privilégiant un stockage compact, et l'obligation, au moins dans les premières tranches de réalisation, d'orienter celles-ci dans la direction de la contrainte horizontale maximale ;
- l'obligation d'organiser chaque quartier de stockage de telle sorte qu'il soit borgne par rapport au reste de l'installation souterraine, pour réduire les circulations d'eau possibles,
- l'obligation de regrouper les puits et accès au Cox ;
- l'obligation de mettre en œuvre des moyens de creusement limitant l'endommagement de la roche (EDZ), tant pour les galeries que pour les alvéoles de stockage ;
- l'obligation de réaliser dans le cadre de la première tranche de construction, des alvéoles témoins HAVL et MAVL qui seront instrumentés et utilisés pour des tests de réversibilité en grandeur réelle ;
- l'obligation de réaliser dans le cadre de la première tranche deux démonstrateurs de scellements.

A ce stade, une certaine souplesse est laissée au maître d'œuvre pour explorer et chiffrer différentes solutions techniques pour le creusement et pour l'architecture détaillée du réseau de galeries, l'Andra se réservant d'en évaluer la conformité et d'en effectuer le choix définitif sur des critères de sûreté (première priorité) et budgétaires (l'optimisation des coûts ne devant s'appliquer que sur des solutions valides du point de vue de la sûreté). Des tests de creusement et de suivi du vieillissement des alvéoles sont envisagés dès la première tranche du stockage.

L'Andra est également soucieuse de ne pas lancer d'emblée la réalisation de l'ensemble des galeries, pour n'engager les dépenses d'infrastructure que de façon modulaire, étape par étape, afin de laisser plus de souplesse et de flexibilité au cours du temps, et de bénéficier des acquis technologiques d'une étape pour optimiser la suivante.

La Commission n'a pas eu le temps nécessaire pour analyser en détail le contenu de l'appel d'offre et la forme de gouvernance du projet que crée cette maîtrise d'œuvre. Toutefois elle s'inquiète de ce que, sans avoir fait figurer un schéma conceptuel explicite dans son appel d'offres, l'Andra ait délégué la maîtrise d'œuvre "système" à une entreprise extérieure, qui aura la charge de finaliser l'esquisse détaillée de la première tranche du stockage, les méthodes et le chiffrage des coûts de réalisation, tout cela en moins d'un an. La Commission demande que l'Andra assume pleinement toutes les responsabilités qui lui ont été confiées par la loi.

Par ailleurs, la Commission regrette l'introduction, au moins à titre de pistes de réflexion, d'options insuffisamment débattues, comme l'évolution possible vers des alvéoles HAVL passantes à la ventilation (c'est-à-dire ouvertes des deux côtés), et l'imprécision laissée à propos de l'objectif de température maximale du massif au contact des ouvrages après 1 000 ans.

2.5.3. Évolution du projet Cigéo

Les producteurs (EDF, CEA et Areva) ont développé depuis de nombreuses années une très grande expertise en termes d'installations nucléaires, d'ouvrages souterrains, et de maîtrise des risques associés (contamination, incendie, etc.). L'une des recommandations de la revue de projet Cigéo, à laquelle adhère la Commission, est d'assurer le dialogue entre l'Andra et les producteurs tout au long de la mise en place du projet industriel. Tout en gardant ses prérogatives de maître d'ouvrage et en évitant ainsi tout conflit d'intérêt avec les producteurs qui joueront un rôle consultatif de conseil et d'expertise, l'Andra a exprimé à la Commission son souci actuel de finaliser une convention d'échange avec EDF et le CEA afin de pouvoir intégrer à ses équipes propres des experts détachés d'EDF, du CEA, d'Areva pour bénéficier de leur expertise tout au long de la mise en place et des étapes clés du projet industriel Cigéo.

De façon générale, la Commission souligne que les diverses préoccupations qui président à la conception d'un stockage géologique profond doivent être clairement hiérarchisées. La sûreté à long terme, la sûreté en exploitation et la sécurité des travailleurs, la préservation de la santé et du bien-être des populations concernées doivent être les objectifs majeurs. Lorsque ces objectifs sont satisfaits au niveau qui est requis, la récupérabilité des colis de déchets et la réversibilité du stockage constituent des objectifs importants. La Commission reconnaît aussi l'importance des préoccupations de coût mais considère qu'elles doivent rester subordonnées aux objectifs précédents. De ce dernier point de vue, elle regrette une nouvelle fois de n'avoir été informée que très parcimonieusement de ces questions, alors que l'apparition d'une proposition des producteurs suggère qu'elles ont constitué un enjeu majeur de débats entre l'Andra et les producteurs. La Commission redoute que ces problèmes continuent à peser, sans la transparence souhaitable, sur les choix à effectuer, d'autant que cette question sera au cœur du Débat public de 2013.

2.6. TRAVAUX SCIENTIFIQUES

2.6.1. Thermique

Les déchets stockés dégagent de la chaleur. La puissance dégagée décroît au cours du temps. Pour les déchets les plus chauds, cette décroissance est d'abord due à la désintégration radioactive des produits de fission (césium et strontium). Après un siècle, la décroissance thermique est plus lente et dominée par la désintégration de l'américium. L'Andra a réalisé un bilan des effets à grande échelle de la charge thermique sur le stockage profond, tel qu'il est conçu dans son dossier 2009.

La Commission donne ci-dessous son analyse en quelques points principaux dont une présentation exhaustive est donnée en annexe (cf. annexe 8, tome 2).

2.6.1.1. Perturbations thermiques

L'élévation de température au sein de la couche du Cox entraîne plusieurs perturbations affectant notamment la pression de l'eau interstitielle et les contraintes mécaniques.

Du point de vue de la sûreté post-fermeture, le critère le plus contraignant concerne les déchets vitrifiés, parce que la dissolution du verre est nettement plus rapide au dessus de 50 °C. Il faut donc avoir la certitude que la température sera inférieure à 50 °C au moment où l'eau peut entrer en contact avec le verre. Pour que cette condition soit réalisée, l'Andra a calculé que la température maximale à respecter à court terme est de 90 °C à la paroi des alvéoles HAVL.

Les contrastes de température entre les diverses zones du stockage proviendront surtout de la nature des déchets stockés. L'Andra a effectué de nombreuses simulations thermiques tri-dimensionnelles. Celles-ci montrent que le retour à l'équilibre est assez lent. On a encore plusieurs degrés d'écart à la température naturelle, après 10 000 ans, au centre de la zone HAVL qui a reçu les déchets les plus chauds.

Le fait le plus remarquable est sans doute l'apparition de surpressions dans l'eau interstitielle des argilites. Elles sont engendrées par la dilatation thermique de l'eau contenue dans les pores. Elles peuvent atteindre quelques MPa et se dissipent lentement en raison de la faible perméabilité du milieu.

L'Andra a estimé les contraintes mécaniques qui apparaissent dans la couche du Cox au moyen d'un calcul numérique effectué dans l'hypothèse d'un comportement élastique du milieu. L'ordre de grandeur des accroissements de contrainte moyenne et de contrainte déviatorique (qui mesure l'intensité des cisaillements) est de quelques MPa. Un calcul préliminaire suggère que cette augmentation des contraintes ne conduit pas à la rupture aux interfaces entre des couches géologiques de propriétés thermo-mécaniques différentes (Callovo-Oxfordien et Oxfordien carbonaté). Par ailleurs, après plusieurs dizaines d'années, une part significative de la chaleur des déchets est déjà produite et des contraintes de quelques MPa ont été engendrées. Il faudra s'assurer des conséquences possibles de la coexistence de parties encore en exploitation et de parties chauffées depuis quelques décennies.

La Commission estime que des recherches plus approfondies devraient être conduites sur ce problème thermo-mécanique ; elle souhaite que les résultats lui en soient présentés.

A la fin de l'exploitation du stockage, l'hydrogène produit par corrosion migre dans la couche. Le risque n'est pas l'explosion dans la couche, en raison de l'absence d'oxygène. Ces deux perturbations (température et hydrogène) ne sont pas très intenses, mais leur association est inhabituelle dans les ouvrages souterrains classiques. On ne dispose donc pas d'un retour d'expérience.

La Commission recommande que soient étudiés l'interaction réciproque de ces deux perturbations et leur impact éventuel sur le milieu.

2.6.1.2. Expérimentations thermiques

L'Andra a conduit ou envisage de conduire plusieurs essais thermiques dans le laboratoire souterrain afin de confirmer les valeurs de paramètres thermiques mesurées au laboratoire, de mettre en évidence et analyser les phénomènes hydrauliques et thermiques qui sont associés aux accroissements de température dans le massif et de préparer un essai de démonstration de concept pour les alvéoles HA les plus exothermiques.

Les leçons tirées de l'essai TER³⁶ achevé en 2009 ont été mises à profit pour concevoir et dimensionner un nouvel essai (TED³⁷), plus complexe, car il comporte trois sondes chauffantes parallèles. La chauffe a commencé en janvier 2010. Les interprétations seront vraisemblablement délicates en raison des effets complexes de l'augmentation de la température sur les propriétés thermo-hydro-mécaniques de l'argilite.

La Commission note que les essais en laboratoire souterrain, au cours desquels tous ces effets s'exercent simultanément, sont étroitement associés à des expérimentations en laboratoire de surface conduites dans des conditions plus simples. Elle recommande de poursuivre l'effort de modélisation qui permettra de tirer tout le profit souhaitable des expérimentations en place.

2.6.1.3. Thermique et transmutation

Une préoccupation de la Commission a été d'apprécier les avantages qu'apporterait la transmutation des actinides mineurs du point de vue de la charge thermique, en prenant comme exemple un stockage dans la couche du Cox. Il faut rappeler que cette transmutation ne pourrait s'appliquer qu'au-delà de 2040, en exploitant une nouvelle génération de réacteurs.

La transmutation des actinides mineurs, et notamment celle de l'américium, réduirait significativement la charge thermique qui est plus élevée dans les colis de déchets des réacteurs de 4^{ème} génération que dans les colis de déchets actuels. Cette diminution de la charge thermique serait un atout appréciable pour réduire l'emprise du stockage. Cette réduction de l'emprise présente plusieurs avantages : la probabilité d'intrusion involontaire serait diminuée et la distance à des accidents géologiques tels que des failles serait augmentée. On évoque aussi, dans un autre registre, la notion de "préservation d'une ressource rare" : la transmutation permettrait de stocker sensiblement plus de déchets et donc de tirer meilleur profit d'une zone favorable reconnue. La réduction de la charge thermique, sans pour autant pouvoir justifier à elle seule la mise en œuvre de la transmutation, apparaît comme un avantage réel de cette dernière.

³⁶ Expérience sur la réponse de l'argilite à des sollicitations thermiques.

³⁷ Expérience sur le champ de surpression dans les argilites autour d'un double/triplet de sources chauffants.

2.6.1.4. Conclusion

La Commission souhaiterait mieux apprécier l'état des recherches en matière de charge thermique, notamment parce que celle-ci entretient des relations étroites avec d'autres questions : étendue horizontale du stockage, avantages de la transmutation, choix de la durée de refroidissement avant stockage. Même s'il subsiste quelques incertitudes, l'acquisition des paramètres nécessaires aux calculs thermiques est en bonne voie.

L'analyse des effets thermomécaniques devrait faire l'objet de nouveaux efforts, suggérés plus haut. Le critère de 90 °C au maximum à la paroi des alvéoles joue un rôle important dans le dimensionnement du stockage ; il apparaît raisonnable au vu des choix faits par d'autres pays. C'est la réduction de l'emprise du stockage qui apparaît comme l'avantage le plus substantiel qu'apporterait une réduction de la charge thermique. Ce gain ne peut être évalué que lorsqu'un concept précis de stockage aura été défini.

Les progrès des connaissances passeront par des essais en vraie grandeur réalisés dans le laboratoire souterrain.

2.6.2. Géomécanique

Les études de géomécanique constituent un élément clé de la conception du stockage, parce qu'elles permettent de prendre en compte l'existence d'une zone endommagée par le creusement des galeries et des alvéoles et qu'elles gouvernent les possibilités de leur scellement. Les études ont nécessairement une composante empirique, mais elles doivent être complétées par une modélisation qui intègre l'ensemble des facteurs physiques et chimiques responsables du comportement mécanique de l'argilite du Cox.

La Commission en donne ci-dessous son analyse en quelques points principaux dont une présentation plus complète (cf. annexe 9, tome 2).

2.6.2.1. Zone endommagée (EDZ), enjeu de sûreté

Le creusement des galeries, puis la longue période pendant laquelle elles restent ouvertes, permettent le développement d'une zone endommagée (EDZ) dans laquelle les propriétés naturelles de la roche peuvent être profondément dégradées. Du point de vue de la sûreté à long terme, cette zone est le siège d'une fracturation ou d'une fissuration qui peuvent augmenter très sensiblement la conductivité hydraulique, avec le risque de former un court-circuit de la barrière géologique qui permettrait une circulation rapide des gaz, de l'eau, et des radionucléides le long des galeries et des puits.

L'Andra a conduit une caractérisation approfondie de l'EDZ comportant l'analyse structurale de l'état des parements et du front des galeries, l'examen de carottes, et des mesures de perméabilité à l'eau et au gaz.

La Commission juge remarquable cet effort de caractérisation.

Différents types de fractures ont été observées au voisinage des parois : fractures "en chevron" (indices de cisaillement), fractures obliques subverticales et fractures "en extension" au voisinage immédiat de la paroi. On peut ainsi distinguer depuis la paroi une zone contenant un réseau plus ou moins bien connecté de fractures, beaucoup plus perméable que la roche saine, une zone intermédiaire avec des fractures mal connectées, et enfin une zone faiblement fissurée mais qui reste plus perméable que la zone saine. L'étendue de ces zones dépend fortement de l'orientation de l'axe des galeries. Ces données établissent que, même si elles n'atteignent pas des proportions inquiétantes, l'extension et l'intensité de l'EDZ sont plus importantes que ne le laissait attendre le pronostic fait en 2005 par l'Andra. Ces nouvelles données devront être prises en compte dans les calculs de sûreté et montrent l'importance des scellements destinés à interrompre la continuité de l'EDZ.

La formation de l'EDZ est influencée par la méthode de creusement et de revêtement des galeries. Un premier choix est de poser très vite, immédiatement en arrière du front, un soutènement rigide pour maintenir la roche en place. Le choix opposé est de laisser venir les terrains en posant un revêtement provisoire léger, et de ne le compléter qu'après plusieurs mois. Pour évaluer ces diverses approches, l'Andra dispose d'un modèle de comportement à court terme du massif argileux mais il semble qu'il ne soit pas systématiquement utilisé pour la conception du revêtement. Les galeries devant rester ouvertes pendant un siècle environ, le choix de la meilleure méthode doit aussi être inspiré par l'estimation de l'ampleur et de la vitesse des mouvements à long terme. Une appréciation mieux établie de l'ampleur des mouvements différés, à l'échelle du siècle, serait précieuse pour la conception des galeries, le dimensionnement du chemisage métallique des alvéoles HAVL ou du soutènement en béton des alvéoles MAVL.

Les expérimentations GCS (Galerie de conception souple) et GCR (Galerie de conception rigide) ont pour objectif la comparaison de deux méthodes de soutènement du point de vue de la formation et de l'évolution de l'EDZ et de son influence sur le comportement hydromécanique. La réalisation de la galerie GCR a commencé en janvier 2011 et s'achèvera en janvier 2012 ; une comparaison avec GCS, déjà achevée, sera alors possible. Les mesures de déplacement sont interprétées au moyen de la méthode convergence-confinement dont l'emploi est classique dans les tunnels. Il faudrait aussi utiliser un modèle de comportement à court terme, élaboré par l'Andra, qui permettrait de s'affranchir de certaines simplifications et d'effectuer une analyse hydromécanique complète.

Un essai technologique de creusement au tunnelier avec pose de voussoirs à l'avancement sera conduit à partir de 2012. Il contribuera à évaluer l'impact sur l'EDZ du creusement par tunnelier et du soutènement par voussoir. L'essai comportera le creusement successif de deux galeries perpendiculaires réalisées dans les deux directions de contraintes horizontales principales. Il ne bénéficiera pas de l'approche progressive qui avait conduit l'Andra à retenir la machine à attaque ponctuelle comme option de référence et s'achèvera peu de temps avant le dépôt de la Dac.

Le Commission souligne que l'utilisation du tunnelier peut conduire à une modification assez radicale de la conception du stockage et qu'il restera peu de temps pour l'analyser. Elle suivra avec attention les résultats de cet essai.

De nombreuses observations suggèrent que la formation d'une EDZ pourrait être un phénomène partiellement réversible. En effet, après fermeture, la resaturation de l'argilite, accompagnée de l'application prolongée d'une pression croissante, pourrait avoir un effet de cicatrisation.

La Commission approuve la poursuite de recherches sur les phénomènes d'auto-colmatage, dont une bonne compréhension peut fournir une marge supplémentaire du point de vue de l'analyse de sûreté à long terme.

2.6.2.2. Essais conduits dans les alvéoles HAVL

L'Andra a conduit des essais de creusement d'alvéoles de 40 m de long, 70 cm de diamètre, chemisées par un tube d'acier de diamètre un peu inférieur. Ce chemisage a pour fonction principale de permettre une introduction et, le cas échéant un retrait, faciles des colis HAVL.

Le premier risque est que les mouvements du terrain qui vient rapidement au contact du chemisage, engendrent son ovalisation, conduisant à un frottement additionnel, peut-être même à un coincement du colis à retirer. Les calculs d'ovalisation effectués en vue de dimensionner l'épaisseur d'acier du chemisage comportent encore des incertitudes. La réversibilité exige que ces problèmes trouvent leur solution.

La Commission n'a pas entendu d'exposé complet sur ce sujet. Elle demande que le cahier des charges des fonctions que doit remplir le chemisage soit précisé quantitativement.

Le second risque concerne l'alignement des tubes le long de l'alvéole. L'Andra a vérifié avec son démonstrateur de surface que le retrait pouvait se faire même avec une courbure importante, mais il reste à estimer si les marges sont suffisantes dans tous les cas.

Mi-2011, l'Andra mettra en place une instrumentation du chemisage d'une alvéole, pour suivre l'évolution de l'interface argillite/chemisage. Une deuxième phase, commençant mi-2012, comportera un essai des procédés d'obturation de la tête d'alvéole et un essai en vraie grandeur sur une alvéole muni de son insert et de sa plaque de fond. Dans ce dernier essai, une source de chaleur reproduira les conditions des colis HAVL (C0)³⁸ qui devraient être les premiers stockés. Cet essai doit durer une dizaine d'années.

La Commission apprécie très favorablement ce programme mais estime qu'il est indispensable d'observer également, pendant une longue durée, une alvéole HAVL sans chemisage, dans la direction la plus adaptée au projet proposé par l'Andra. La présence du chemisage complique les observations et rend difficile leur interprétation compte tenu des interactions que cette présence engendre. On pourrait ainsi observer directement les déplacements des parois en fonction du temps, les ruptures locales, la perte éventuelle d'alignement, l'évolution de l'EDZ.

³⁸ Verres "anciens" et Atalante.

2.6.2.3. Scellements

Le scellement des ouvrages n'interviendra vraisemblablement que dans un siècle ou plus. Il peut constituer une barrière efficace dans les scénarios de court-circuit de la barrière géologique.

L'Andra a indiqué très récemment à la Commission qu'elle procédait à une révision en profondeur de son programme relatif au concept de scellement. La Commission, tout en étant préoccupée par les délais courts que laisse la date de dépôt du dossier de la Dac, apprécie favorablement la décision de l'Andra.

2.6.2.4. Modélisation géomécanique et conclusions

L'Andra conduit dans son laboratoire souterrain un programme d'expérimentations géomécaniques remarquable par son ampleur et par la qualité et la densité des mesures effectuées. La modélisation du comportement thermo-hydro-mécanique de l'argilite est rendue difficile par la présence simultanée de phénomènes physiques et chimiques variés qui sont souvent étroitement couplés.

Pour le comportement de court terme, plusieurs modèles distincts sont encore proposés et il serait souhaitable qu'ils convergent vers une formulation unique stabilisée. L'étude du comportement différé des galeries et alvéoles à l'échelle du siècle est moins avancée.

La Commission approuve l'effort lancé par l'Andra sur ce thème et souhaite qu'un bilan des études et expérimentations sur le comportement différé lui soit présenté.

La Commission souhaite que s'amplifie l'effort de modélisation amorcé pour que celle-ci intègre les principaux couplages reliant les phénomènes physiques et chimiques qui gouvernent le comportement de l'argilite.

La Commission estime que le programme de géomécanique concrétise une évolution souhaitable vers des expérimentations intégrées et proches de l'échelle industrielle. Elle recommande de prendre garde, néanmoins, à ce que ne s'établisse pas un divorce entre la modélisation scientifique du comportement et la mise en œuvre d'essais plus orientés vers l'application industrielle.

2.6.3. Expériences en laboratoire souterrain

2.6.3.1. Expériences dans le laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne

Le programme expérimental en cours et à venir dans le laboratoire souterrain est très riche ; il met l'accent sur les aspects techniques et pratiques du creusement des ouvrages de stockage et du comportement de la roche hôte et des matériaux aux interfaces dans le champ proche. Ces expériences apparaissent de plus en plus intégrées et préfigurent des expériences en vraie grandeur pouvant caractériser le comportement hydro-thermo-mécanique d'une alvéole HAVL. D'autres expériences ont un caractère plus amont et visent à compléter les connaissances théoriques sur certains aspects de la mécanique, de la migration des gaz et de la géochimie.

La réalisation de ces expériences nécessite des infrastructures techniques importantes au sein du laboratoire. En un an, entre mars 2010 et mars 2011, 180 m de galeries et une centaine de forages ont été creusés, 2000 m de carottes de roche ont été prélevés et 1200 capteurs ont été mis en place.

La récente autorisation de prolongement des activités du laboratoire permet de poursuivre ces programmes jusqu'en 2030.

2.6.3.2. Expériences visant à caractériser le champ proche

Elles sont destinées à caractériser des mécanismes hydro-thermo-mécaniques et chimiques intervenant dans la roche hôte perturbée par la présence des ouvrages de stockage.

Concernant les alvéoles HAVL, l'Andra considère avoir maîtrisé le creusement et le chemisage d'une alvéole sur une longueur de 40 m. Pour ce test, elle a cependant utilisé des chemisages d'épaisseur inférieure qui serviraient en condition de stockage ; elle s'intéresse à présent à optimiser la longueur forée et à observer la mise en charge mécanique du chemisage par le terrain encaissant avec ou sans influence thermique. Des expériences avec des tubages de diamètre réduit (140 mm) sont en cours. Des essais au diamètre réel sont en préparation.

Concernant l'altération des matériaux à long terme, l'Andra mène des expériences de longue durée pour examiner la corrosion de l'acier au contact de l'eau porale et les réactions aux interfaces entre matériaux différents (verre, fer, argilite). Ces expériences sont prévues sur une dizaine d'années avec des contrôles intermédiaires.

Concernant la géochimie dans l'argilite, l'Andra considère avoir maîtrisé la modélisation de l'interaction eau-roche permettant de rendre compte de la composition chimique de l'eau porale³⁹ du Cox. Sur le plan géochimique, l'Andra s'est intéressée à la migration des gaz en champ proche et à leur relation avec la composition chimique de l'eau porale ; les expériences portent sur les gaz naturels émanant de la roche (azote, méthane, alcanes légers) et aussi sur l'effet de l'oxygène de l'air des galeries sur l'oxydation des éléments dissous dans l'eau porale et sur le devenir de l'hydrogène engendré par l'altération de l'acier. Des comparaisons ont pu être établies entre le Mont-Terri et le laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne. Les expériences avec l'oxygène sont conduites dans le laboratoire souterrain, elles montrent une faible pénétration de la perturbation oxydante au sein du Cox. Les expériences avec l'hydrogène sont réalisées dans le tunnel du Mont-Terri, en raison du danger potentiel dans les conditions plus confinées du laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne.

Sur le plan de la modélisation hydrochimique, les modèles rendent bien compte des équilibres calco-carboniques même si la pression partielle de CO₂ dans la phase gazeuse en équilibre avec l'eau est encore mal reconstituée par les calculs. L'effort de modélisation doit s'attacher à décrire l'effet de la température sur la cinétique très lente de dissolution des silicates.

Le rôle des bactéries est étudié au Mont-Terri, pour déterminer et quantifier les processus d'évolution, au sein de l'argilite, de la composition des solutions issues des alvéoles B2⁴⁰. Pour ce faire, des solutions contenant des nitrates et des acétates ont été mises en circulation au contact de l'argile et font l'objet d'un suivi de la dénitrification et du développement de souches bactériennes qui pourraient participer à la catalyse de cette réaction. Le développement bactérien, sous l'effet d'un ensemencement par les ouvrages et la ventilation, est étudié dans une autre expérience au laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne ; la croissance d'une flore sulfurogène a été observée, son origine est vraisemblablement due aux conditions de l'expérience mais la présence de bactéries autochtones n'est pas exclue.

La migration du gaz dans l'argilite et la resaturation sont étudiées par des expériences d'injection de gaz à différents paliers de débit. Les résultats montrent une pénétration du gaz dans la roche et suggèrent une diminution concomitante de la perméabilité. Des essais du même type ont été entrepris dans des forages horizontaux du laboratoire pour étudier les temps de resaturation d'un noyau d'argile utilisé pour les scellements. Ces expériences ont vocation à se prolonger, car il apparaît que, au bout de 500 jours, la resaturation n'est toujours pas terminée.

2.6.3.3. Expériences visant à caractériser le champ lointain

Ce type d'expérience a pour but de caractériser le comportement du Cox à distance des ouvrages de stockage, au-delà de la zone affectée par le forage. Un paramètre essentiel de la migration de solutés au travers du Cox est le coefficient de diffusion. Les expériences de diffusion en forage, réalisées de 2005 à 2009, ont démontré une excellente cohérence des résultats avec les mesures obtenues en laboratoire de surface. Elles sont à présent arrêtées. Compte tenu de la lenteur des mécanismes de diffusion, les distances de transfert n'ont pas dépassé quelques centimètres.

³⁹ Ceci permet en particulier de fabriquer artificiellement l'eau nécessaire aux expérimentations d'altération des matériaux ou de resaturation, ce qui offre un gain de temps appréciable dans la préparation des expériences étant donné la difficulté à récupérer l'eau porale naturelle.

⁴⁰ Alvéole qui contient les boues bitumées.

L'Andra prépare à présent une expérience sur de plus longues distances (quelques décimètres à quelques mètres) et met au point pour cela des mini-sondes de détection des rayonnements bêta et gamma qui devraient permettre un suivi *in situ* de traceurs radioactifs autorisant des mesures non-destructives sur une longue durée.

Dans le cadre du GNR Trasse⁴¹ intégré au programme Pacen, le CNRS (*cf. annexe 1, tome 2*) et l'IRSN ont poursuivi l'analyse des migrations à distance dans les argilites de Tournemire, en s'appuyant sur la distribution de l'hélium radiogénique dans l'eau porale. Cette analyse montre que le profil actuel, en profondeur, des teneurs en ce gaz rare peut être expliqué par un mécanisme diffusif qui se serait exercé sur 17 à 30 millions d'années. Ceci confirme la lenteur de ce type de mécanisme de transfert.

Un important programme expérimental est actuellement planifié par l'Andra suivant trois axes principaux :

- poursuite des essais sur les alvéoles HAVL incluant des expériences intégrées pour reproduire en vraie grandeur le comportement thermo-hydro-mécanique ;
- complément de données sur les caractéristiques des argiles du point de vue géomécanique et du transport-rétention ;
- tests des composants de scellement des galeries.

La Commission considère que l'Andra fait preuve de beaucoup de créativité pour imaginer et réaliser, en conditions représentatives du stockage, des expérimentations dans le laboratoire souterrain et en partenariat dans d'autres lieux. Une quantité impressionnante de données a été acquise et devrait encore s'accroître notablement selon le programme prévu jusqu'en 2013.

La Commission souhaite que la modélisation soit systématiquement renforcée, de manière à tirer le meilleur parti des essais scientifiques. Elle souligne l'importance de poursuivre les essais de creusement des alvéoles en grandeur réelle. Elle souligne l'importance des expériences à venir, qui visent à caractériser en vraie grandeur le comportement des alvéoles HAVL. Leurs résultats seront essentiels pour évaluer la récupérabilité des colis.

2.7. RÉVERSIBILITÉ

2.7.1. Introduction

La loi exige que la réversibilité soit garantie pendant au moins 100 ans. Néanmoins, le mot de "réversibilité" est, aux yeux de la Commission, ambigu. La Commission estime indispensable à l'information judiciaire de tous les acteurs concernés par le stockage et, en particulier, du citoyen, de dissiper cette ambiguïté par l'adoption d'un lexique plus précis. Elle propose de retenir trois mots distincts pour trois réalités différentes :

⁴¹ Transfert des radionucléides dans le sol, le sous-sol et vers les écosystèmes.

- la *réversibilité*, en un sens précis et univoque, désigne la possibilité, en n'importe quel point d'effectuation du projet, de revenir à un point antérieur, compte tenu du fait que plus la réalisation avance, moins il devient possible de regagner des points plus reculés ; en d'autres termes, la réversibilité fait d'autant plus place à l'irréversibilité que la distance entre les stades de réalisation est plus grande ;
- la *recupérabilité* est la capacité d'atteindre les colis stockés et de les extraire de leur position dans le stockage, de manière à pouvoir leur appliquer au fond les éventuels traitements requis par leur état à différentes échelles de temps, qu'il s'agisse d'accidents ou de conversion des déchets en ressources exploitables ;
- la *flexibilité* vise un mode de gestion du projet de stockage, à tous les stades d'élaboration et de réalisation, conçu de telle manière qu'il puisse être constamment et perpétuellement modifié, pour être à même de repérer, de traiter et d'intégrer toutes informations nouvelles portant sur l'efficience de l'entreprise.

La réversibilité résulte d'une demande sociale introduite dans la loi. Elle implique que l'option d'un retrait partiel ou complet des colis de déchets reste crédible pendant une durée d'un siècle au moins. Pendant cette durée, le retrait est de moins en moins facile. Une échelle qui comporte cinq niveaux successifs de réversibilité a été adoptée par l'AEN (Agence pour l'énergie nucléaire) ; l'Andra a contribué à sa mise au point. L'Andra a également contribué à l'organisation à Reims par l'AEN, en décembre 2010, d'un colloque consacré à la réversibilité et à la récupérabilité. Ce colloque a montré que l'Andra se plaçait au premier rang de la réflexion internationale sur la réversibilité.

Un retrait éventuel doit avoir été préparé : il faut prévoir les circonstances qui pourraient le rendre nécessaire, disposer des éléments permettant de décider le retrait, dont l'estimation de son coût et des risques pour les opérateurs, préparer des plans de retrait intégrant les difficultés qui peuvent survenir, pouvoir adapter le rythme de déstockage à la nature de l'événement qui l'a rendu nécessaire et vérifier que les plans de retrait sont cohérents et applicables.

Pour que la récupération des déchets demeure facile, compte tenu du niveau de réversibilité atteint, plusieurs conditions doivent être satisfaites pendant toute la période de réversibilité. Il faut qu'il n'existe aucune incertitude sur la nature et la localisation de chacun des colis de déchets. Les puits et galeries d'accès aux alvéoles qui contiennent les colis doivent rester dans un état qui permette la circulation des engins de transport et de manutention. On doit avoir ménagé, entre les colis et le revêtement ou le chemisage des alvéoles, un jeu suffisant. Ce jeu doit être calculé avec une marge qui tienne compte des effets des pressions de terrain qui s'exerceront progressivement sur le revêtement ou le chemisage des alvéoles et pourront en réduire la section ou en perturber l'alignement. Pendant la période considérée, les conteneurs en acier ou en béton qui enveloppent les déchets ne doivent connaître que des évolutions limitées. De même, il faut limiter les évolutions physico-chimiques qui affecteraient l'air, l'eau et plus généralement les matériaux du voisinage des colis et qui seraient susceptibles d'engendrer des difficultés pendant la récupération. Les dispositifs de saisie, d'extraction, de manutention et de transport des colis doivent avoir été maintenus opérationnels. Des moyens d'observation et de surveillance doivent fournir les informations utiles sur l'évolution des colis et de leur environnement. Les colis retirés, quelle que soit leur quantité, doivent pouvoir être entreposés à la surface, sur place ou à distance, dans des conditions sûres.

Ces différents points sont étudiés en détail dans l'annexe 10 du tome 2 et l'analyse de la Commission est présentée ci-dessous.

2.7.2. Circonstances pouvant conduire à un retrait

La Commission avait demandé à l'Andra d'envisager les scénarios pouvant conduire à un retrait des colis. L'Andra s'est notamment appuyée sur une enquête conduite auprès des acteurs locaux pour confirmer et compléter la liste des scénarios les plus souvent envisagés.

Certains paraissent peu probables (choix d'une nouvelle filière de gestion, valorisation des déchets stockés), d'autres moins hypothétiques (défaut d'un colis ou de la barrière ouvragée), tandis que certains reflètent des préoccupations sociétales (contrôle du processus de stockage ; risque d'abandon du stockage) ou un possible incident de manutention.

Certaines circonstances pourraient nécessiter un déstockage rapide. C'est pourquoi la Commission recommande que l'Andra précise le rythme de déstockage le plus rapide que permettent les moyens envisagés actuellement.

2.7.3. Évolution des alvéoles et des colis pendant la période de réversibilité

L'évolution des alvéoles et des colis pendant la période de réversibilité est une préoccupation majeure pour la Commission, puisqu'elle sera un facteur clé de la facilité de mise en œuvre du processus de réversibilité. Les moyens de manutention permettant le retrait seront les mêmes que ceux utilisés pour le stockage, ce qui garantit que leur maintenance sera assurée. Cela imposera toutefois certaines contraintes en cas d'évolution technologique de ces moyens, qui n'est pas improbable sur une durée d'un siècle.

Pour ce qui concerne le retrait des colis HAVL, deux problèmes essentiels se posent, d'une part la corrosion des surconteneurs des colis ou du chemisage des alvéoles et, d'autre part, l'ovalisation ou la perte d'alignement du chemisage des alvéoles.

L'Andra estime que les vitesses de corrosion restent suffisamment faibles pour ne pas modifier significativement les conditions d'un retrait. Hormis leurs effets directs sur l'état du chemisage et du surconteneur, que l'Andra apprécie comme modestes, les phénomènes de corrosion, en cas de réouverture de l'alvéole, mettront l'atmosphère de la galerie en contact avec une phase fluide contenant de l'eau liquide, de la vapeur et de l'hydrogène, produit de la corrosion anoxique, à pression et température élevées (plusieurs MPa et un peu en-dessous de 100 °C). La réouverture de l'alvéole doit tenir compte de cette situation.

L'ovalisation et la perte d'alignement du chemisage peuvent résulter de la contrainte qu'il subit en raison de la pression hydrostatique à la profondeur du stockage et, à plus long terme, du poids des terrains. Les calculs que propose l'Andra pour rendre compte de ces phénomènes gagneraient en crédibilité si l'on disposait de modèles consolidés et validés du comportement différé engendré par les effets conjoints du fluage, de l'évolution des pressions de pore, de la dilatation thermique, éventuellement des transformations physico-chimiques affectant le massif.

La Commission souhaite que lui soient présentés les calculs de dimensionnement vis-à-vis du risque d'ovalisation ; elle estime qu'il faudra, dès que possible, mettre en œuvre des essais en place complètement représentatifs des conditions réelles, seuls susceptibles d'entraîner complètement la conviction quant au risque d'ovalisation.

Le retrait des colis MAVL est, plus fidèlement que dans le cas des colis HAVL, l'opération inverse de la mise en place car les colis ne sont pas extraits par traction mais repris par le même robot qui les a mis en place. L'obturation définitive des alvéoles de déchets MAVL n'est pas immédiate ; au contraire une ventilation est organisée pour évacuer les gaz produits et, à un moindre degré, pour refroidir les colis. La ventilation facilite la surveillance de l'atmosphère de l'alvéole ; en maintenant une atmosphère sèche dans l'alvéole, elle réduit considérablement les vitesses de corrosion. En revanche, après obturation, de l'eau pourra être présente au moins localement avec, pour certains colis, formation d'hydrogène ou augmentation de la température jusqu'à des valeurs de l'ordre de 40 à 70 °C. Une attention particulière devra être portée à la récupérabilité des colis de bitume.

En conclusion la Commission apprécie que l'Andra ait réalisé un examen de l'évolution des alvéoles et des conditions qui y règnent. Elle note que cet examen contribue à l'analyse des conditions concrètes d'un retrait de colis. La Commission insiste sur l'importance d'une vérification de cet examen, à échéance rapprochée, au moyen d'essais complètement représentatifs des conditions réelles d'un stockage.

2.7.4. Réversibilité et entreposage

Le PNGMDR prévoit qu'il faut "prendre en compte la réversibilité du stockage, notamment en identifiant systématiquement des solutions d'entreposage pour accueillir des colis qui seraient retirés du stockage".

La Commission considère que l'entreposage des déchets éventuellement retirés d'un stockage est une question qui doit être considérée avec rigueur pour établir le cahier des charges des ZIIS mais qu'elle n'appelle pas une réponse pratique à courte échéance. Sa solution dépend en partie de l'évolution, dont il est difficile de préjuger, du paysage énergétique français dans les trente années à venir. Elle observe que l'Andra devra continuer à y consacrer des moyens de recherche suffisants pour apporter en temps voulu les réponses souhaitables.

2.7.5. Exercices de réversibilité

L'Andra s'attache à réaliser des essais en prototype de surface et à tirer des essais réalisés en laboratoire souterrain les enseignements utiles du point de vue du retrait. Mais le retrait est une opération globale complexe pour laquelle la vérification de chaque maillon de la chaîne n'est sans doute pas suffisante.

La Commission invite l'Andra à proposer, dans la perspective du dépôt du dossier de la Dac, les éléments de définition d'une revue périodique de réversibilité qui devrait comporter la conduite d'exercices de réversibilité.

2.7.6. Conclusions

Au stade actuel du projet, compte tenu des échéances à venir (Débat public, dépôt du dossier de la Dac, loi sur la réversibilité), la Commission souhaite maintenant que soit examinée avec rigueur et précision l'influence de la demande de réversibilité dans la loi de 2006, sur le projet de stockage. Les questions suivantes sont posées :

- *Y-a-t-il des limites à la réversibilité ?*
- *Dans le concept de stockage présenté, quels sont les éléments qui sont rendus indispensables par l'exigence de réversibilité ?*
- *Quelles sont les conséquences de ces mesures sur la sûreté du stockage ?*
- *Quelles sont les conséquences de ces mesures sur le coût du stockage ?*
- *Y-a-t-il des processus à améliorer ou fiabiliser (contrôle des colis, traçabilité) ?*
- *En conséquence, quels sont les paramètres à surveiller et quelle instrumentation est à développer : analyse des conditions qui empêcheraient de ressortir les colis d'une alvéole, ovalisation, alignement, atmosphère, risque pour les opérateurs, conditions d'un déstockage rapide, entreposage des colis etc. ?*

2.8. MÉMOIRE DU SITE

Le projet de stockage en profondeur des déchets nucléaires de Meuse/Haute-Marne frappe par son audace et la complexité de sa mise en œuvre.

A une époque où la société s'est résolue à assumer la responsabilité des déchets qu'elle produit, en particulier ses déchets radioactifs, la Commission considère qu'il serait opportun de ne pas perdre la mémoire de l'énergie dépensée et du talent déployé, mais de s'attacher, au contraire, à en perpétuer le souvenir et de saisir aussi l'occasion de créer un lieu de mémoire édifiant et rentable.

La Commission apprécie l'intention de l'Andra d'archiver les sources qui permettraient d'étudier un jour l'histoire du site. Elle aimerait que l'Agence lui en dise plus sur ses desseins, de manière qu'un regard extérieur lui permette de les porter à leur plus haut degré de perfection. La Commission souhaite être également informée des modalités étudiées par l'Andra pour perpétuer la mémoire du site.

Chapitre 3

PANORAMA INTERNATIONAL

Ce chapitre ne décrit que les aspects les plus récents depuis la publication du rapport n° 4 de la Commission. Il ne tient pas compte de l'impact de l'accident de Fukushima, étant donné qu'actuellement cet impact n'est pas encore connu avec précision et qu'il ne concernera qu'indirectement les programmes de gestion des déchets.

Actuellement, trois pays ont un calendrier qui prévoit l'ouverture en 2025 d'un stockage profond de déchets radioactifs de haute activité à vie longue : la Finlande, la France et la Suède. En Suède, en mars 2011, SKB a déposé son dossier de demande d'autorisation de construction. La Suède est donc le premier pays à avoir franchi cette étape.

Le succès des projets, dans ces trois pays, pourrait avoir une vertu d'exemple. Il démontrera la possibilité d'une gestion rationnelle des déchets radioactifs.

A l'inverse, aux États-Unis, le projet Yucca Mountain est arrêté et le Président a nommé une commission, la "Blue Ribbon Commission", afin de préconiser des solutions à long terme pour la gestion du combustible irradié et des déchets radioactifs du pays. Aucun projet concret n'est à attendre avant longtemps.

La Commission juge favorablement l'ancrage international d'une bonne partie des recherches effectuées par l'Andra et le CEA ; elle apprécie particulièrement l'attention donnée à cette dimension lors des auditions.

Lors du présent exercice d'évaluation, une audition du CEA a été spécialement consacrée au panorama international des cycles nucléaires retenus par différents grands pays nucléarisés et des E&R associées (cf. annexe II du présent rapport).

3.1. DIFFÉRENTES OPTIONS DE GESTION DES DÉCHETS FA, MA ET HA

Pour ce qui concerne les déchets FA ou MA à vie courte, la plupart des pays nucléarisés disposent d'un centre de stockage opérationnel ou en construction. Il n'y a plus, de ce fait, de défis majeurs à relever concernant la gestion de ce type de déchets. Les efforts restants les plus importants concernent la démonstration de la sûreté, l'assurance qualité, et la garantie que les capacités programmées intègrent bien les productions futures.

Pour les déchets FA et MA à vie longue (transuraniens, chlore 36,...) des technologies de traitement et de gestion restent à développer. Peu de sites sont opérationnels, ou même en construction, voire à l'étude. Aux États-Unis, le centre WIPP (Waste Isolation Pilot Plant, profondeur de 700 m en couche de sel à Carlsbad, Nouveau Mexique) est opérationnel depuis 1999 pour le stockage définitif de déchets transuraniens du programme militaire.

En Allemagne, la mine de fer abandonnée de Konrad est aménagée afin que le site puisse accueillir des déchets à partir de 2014. En avril 2011, Ontario Hydro Power, au Canada, a demandé une licence d'exploitation pour un stockage en couche sédimentaire à Kinkardine dans le comté de Bruce.

Pour le stockage de déchets HAVL, plusieurs pays ont des programmes d'E&R conduits dans des laboratoires souterrains (Allemagne, Belgique, France, Suède, Suisse,...). En Europe, en termes de projets concrets d'implantation d'un stockage géologique de combustible irradié ou de déchets HAVL, la Finlande, la France et la Suède sont les pays les plus avancés, avec un calendrier similaire. Le début de construction y est prévu dans 3 à 5 ans et l'exploitation vers 2020 à 2025.

Dans tous les pays nucléarisés, le choix stratégique concerne la gestion du combustible irradié. Il y a trois options de base :

- le stockage direct : le combustible est entreposé pendant quelques décennies, puis stocké en couche géologique (Finlande, Suède,...) ;
- le recyclage : le combustible est retraité, l'uranium et le plutonium sont monorecyclés en réacteurs à eau pressurisée ; les déchets HAVL issus de ce retraitement et les combustibles Mox sont stockés (HAVL) et entreposés (Mox) (France) ;
- "Wait and see": un entreposage de longue durée est prévu (plusieurs décennies), en attendant une visibilité sur le futur de l'énergie nucléaire et/ou le temps nécessaire au développement de techniques de traitement, de stockage et de choix de site.

Dans leurs récentes publications, l'AIEA et l'Union européenne ont rappelé que le stockage géologique est la solution de référence pour garantir la sûreté à long terme de la gestion des déchets radioactifs HAVL.

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

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

3.2. CADRE LÉGAL INTERNATIONAL

La gestion des déchets radioactifs, et par extension les E&R sur la gestion de ces déchets, se situent dans un cadre légal national et international. Cette année, il n'y a pas d'éléments nouveaux significatifs à signaler.

3.3. LABORATOIRES DE RECHERCHE ET SITES DE STOCKAGE SOUTERRAIN

En Europe, les principales recherches concernant le stockage géologique sont effectuées en Belgique (Mol, GIE Euridice), en Finlande (Olkiluoto, Posiva Oy), en France (site de Meuse/Haute-Marne, Andra), en Suède (Äspö, SKB) et en Suisse (sites du Mont-Terri et de Grimsel, Nagra). En fonction des caractéristiques géologiques locales, les E&R sur la roche-hôte sont centrées sur l'argile, le granite ou le sel.

▪ **Allemagne**

Dans l'attente de solutions acceptées par les autorités politiques et de sûreté, les déchets de haute activité sont entreposés sur plusieurs sites répartis dans le pays. Les verres issus du retraitement sont entreposés en surface à Gorleben (ancienne mine de sel à 840 m de profondeur). Après plusieurs années de désaccords politiques et d'actions en justice, le gouvernement actuel a décidé de reprendre les études et d'autoriser de nouveau l'exploitation du site. En novembre 2010, un transport de déchets vitrifiés, en provenance de La Hague et à destination de Gorleben, a été à l'origine de violentes manifestations.

Les travaux continuent dans la mine de Konrad (ancienne mine de fer à une profondeur de 800 à 1 300 m), afin que le site soit opérationnel pour accueillir, en 2014, des déchets non-exothermiques.

▪ **Belgique**

L'Ondraf⁴² finalise actuellement son Plan Déchets. Il le remettra ensuite aux autorités, ainsi que le rapport sur les incidences environnementales, le rapport de la Conférence citoyenne et les commentaires reçus lors des consultations sociétales et légales.

La Belgique dispose depuis 1982 du laboratoire Hades à 225 m de profondeur, situé dans une couche d'argile en-dessous du Centre d'étude de l'énergie nucléaire de Mol. L'expérience thermo-hydro-mécanique et chimique Praclay y a débuté. Elle simule le champ de chaleur autour d'une galerie d'enfouissement de déchets de haute activité. A cette fin, une galerie, dont les dimensions correspondent au concept de stockage belge sera chauffée pendant 10 ans, à 80 °C, sur une longueur de 30 m.

▪ **Canada**

Le programme d'E&R continue sur la presqu'île de Bruce (Kinkardine, Lac Huron, Ontario) en vue d'un stockage de déchets radioactifs FAVC et MAVC en milieu calcaire à grande profondeur (~ 1 000 m). La demande d'autorisation a été faite en avril 2011 et l'autorisation de construction est attendue pour 2012.

▪ **Chine**

Le Beijing Research Institute of Uranium Geology, institut qui dépend de la CNNC⁴³, est en charge des E&R pour un stockage de déchets de haute activité, y compris la recherche de site.

⁴² Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies.

⁴³ China National Nuclear Corporation.

Cinq sites potentiels ont été définis afin d'être étudiés plus en détail. Les roches-hôtes sont du granite, des argiles schisteuses et du tuf. Le site granitique de Beishan dans le désert du Gobi est en cours d'étude, même si la décision de choix de site n'est pas encore prise. La construction est envisagée à partir de 2020.

- **Corée du Sud**

Suite à une décennie d'études, un concept de stockage en milieu cristallin a été rendu public en 2006. En 2008, la loi qui règle la gestion des déchets radioactifs a été promulguée. Des solutions pour gérer les déchets de haute activité sont étudiées, mais aucune décision n'a été prise.

- **États-Unis**

Pendant plus de deux décennies, Yucca Mountain au Nevada a été le site principal étudié pour le stockage des déchets HAVL. Suite à la réduction drastique du budget alloué au projet - ce qui *de facto* a ramené le problème des déchets à son point de départ - l'Administration américaine a créé une nouvelle commission de haut niveau, la "Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future", afin de proposer des alternatives au projet. En mai 2011, la commission a publié quelques conclusions préliminaires. L'une d'entre elles préconise de débiter rapidement le développement d'un ou plusieurs sites de stockage géologique. La commission stipule également que le stockage restera indispensable, quels que soient les scénarios envisagés. Elle considère que le choix d'un site ne pourra se faire que moyennant un consensus obtenu dans la transparence, et basé sur un corpus de résultats d'E&R et de standards pertinents. Selon elle, aucune technologie de réacteur ou de cycle du combustible, actuelle ou à prévoir, ne changera fondamentalement le défi posé au pays par la gestion des déchets.

51

- **Finlande**

Posiva Oy, qui gère les déchets radioactifs finlandais, a entrepris les travaux de construction sur le site d'Olkiluoto d'un laboratoire de recherche, Onkalo, dans le granite à 400 m de profondeur. Le site de stockage, entériné par le Parlement en 2000, pour les combustibles irradiés des réacteurs actuellement en service, de l'EPR en construction et du réacteur à construire dans le futur, est également celui d'Olkiluoto. Il sera une extension du laboratoire de recherche. La demande de construction est prévue pour 2012. La loi finlandaise prévoit le début de l'exploitation en 2020.

- **France**

P.m.: les E&R se continuent au laboratoire de Meuse/Haute-Marne ; fin 2012 sera présenté le dossier en support au Débat public.

- **Inde**

Pendant 8 ans, l'Inde a étudié expérimentalement, dans une ancienne mine d'or à 1000 m de profondeur, la réponse de la roche-hôte à une charge thermique. D'autres expériences sont prévues dans des mines abandonnées. Actuellement, des sites potentiels ont été identifiés dans le granite pour y choisir une zone de 4 km².

▪ Japon

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, la profondeur de 460 m, sur les 1 000 m prévus, a été atteinte. Les études concernant l'hydrologie et la mécanique des roches sont en cours. Au laboratoire de Horonobe, les tests hydrologiques et les mesures hydrochimiques se poursuivent. Une profondeur de 250 m sur 500 m est atteinte. Les projets rencontrent une forte opposition des populations.

L'organisation Japonaise pour la gestion des déchets radioactifs, NUMO, fait appel à des municipalités volontaires pour des études préliminaires à la sélection d'un site de stockage.

▪ Russie

Aucun site de stockage géologique n'est disponible actuellement, mais la région de Krasnoyarsk est proposée. Un dossier sera déposé pour définir le concept d'un laboratoire souterrain et d'une installation de stockage à construire à partir de 2025. La première phase de l'installation prévoit d'accueillir 20.000 tonnes de déchets MAVL et HAVL, en assurant la récupérabilité.

▪ Suède

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

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

SKB a déposé une demande d'autorisation pour la construction de l'installation de stockage à Forsmark, site retenu, suivant les règles légales décrits dans le "Swedish Act on Nuclear Activities". En parallèle, SKB a demandé les autorisations de construction du stockage intérimaire et de l'usine d'encapsulation Clab à Oskarshamn, le tout dans le cadre du code environnemental suédois. Le début de la construction est prévu en 2015 si les décisions du gouvernement, des autorités de sûreté, de la cour environnementale et des communes concernées sont prises en 2013 – 2014. Le stockage est prévu pour être opérationnel en 2025.

▪ Suisse

La Suisse a deux laboratoires de recherche : Grimsel et le Mont-Terri. 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 de nombreuses expériences en raison de la similitude entre les argiles du Mont-Terri et celles du laboratoire de Meuse/Haute-Marne.

La roche-hôte retenue pour le stockage profond est l'argile à opalines. L'Office fédéral de l'énergie (OFEN) a désigné des régions d'implantation provisoires pour déterminer les collectivités concernées par la concertation locale. Il s'agit de 202 communes, dont 190 en Suisse et 12 en Allemagne.

3.4. SOURCES D'IRRADIATION À SPECTRE RAPIDE

Le nombre de réacteurs d'irradiation avec des neutrons à spectre rapide est extrêmement limité dans le monde. Une telle situation compromet fortement les E&R nécessaires au développement de nouvelles filières et à la mise en œuvre d'expériences de transmutation.

- **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, refroidi au sodium, CEFR de 65 MWt (20MWe) est en service depuis juillet 2010.

- **France**

Depuis l'arrêt de Phénix, il n'y a plus de réacteur à spectre rapide en France. Le réacteur de recherche Jules Horowitz, en construction, permettra d'irradier un faible volume à haut flux en spectre rapide. Sa mise en service est prévue en 2015.

- **Inde**

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

- **Japon**

Les réacteurs Joyo et Monju sont à l'arrêt suite à différents incidents.

- **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. Le BN-600 (1980-?) est un réacteur de production électrique.

3.5. E&R SUR LES ADS

- **Allemagne**

L'Institut de Technologie de Karlsruhe (KIT) était coordinateur du projet Eurotrans ; il est un partenaire important du projet CDT. Le centre de recherche de Jülich (FZJ) propose un ADS refroidi au gaz (AGATE).

- **Belgique**

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 collaboration entre le SCK•CEN, le CEA et le CNRS. L'accélérateur Génépi-C a été construit par le CNRS (Grenoble), le combustible étant livré par le CEA.

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

- **Chine**

L'Académie 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 MW en 2022 et une installation de démonstration de 1 000 MW en 2032.

- **Corée du Sud**

Un projet d'ADS ambitieux est développé à l'Université de Séoul. Kaeri évalue différentes voies pour changer la nature et réduire le volume des déchets à stocker. Une décision est attendue dans les mois à venir.

- **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 pour les ADS.

- **France**

P.m. les E&R s'effectuent dans le cadre de collaborations internationales.

- **Inde**

Le programme ADS, démarré en 2000, est destiné à aider à mettre en place le cycle du thorium par la production d'U-233 fissile à partir du Th-232 non-fissile.

- **Italie**

Plusieurs centres de recherche (ENEA, INFN,...) et industries participent aux projets européens concernant les ADS.

- **Japon**

Le projet Omega, initié en 1988, vise les E&R en séparation-transmutation afin de diminuer l'empreinte d'un site de stockage. La première phase du projet prévoit une cible de spallation à faible puissance ; il est ensuite prévu une cible à haute puissance mais sans cœur sous-critique. Le projet comprend un ADS expérimental d'une centaine de MW et un ADS industriel de 800 MW.

3.6. E&R SUR LE STOCKAGE GÉOLOGIQUE PROFOND

3.6.1. Performances du stockage

CARBOWASTE⁴⁴ 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 concentrations variables. Ces deux radionucléides sont très mobiles et très facilement susceptibles d'être absorbés par la matière vivante. Le projet a pour but de développer des techniques de traitement de ces déchets préalablement au stockage.

CATCLAY⁴⁵ Suite aux résultats du projet Funmog, CatClay devrait permettre de comprendre la migration des cations dans l'argile densément compactée. En effet, pour certains cations, les expériences ont montré une diffusion plus profonde qu'attendue.

FEBEX 11⁴⁶ 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.

FORGE⁴⁷ 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-TP⁴⁸ 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. Un document d'orientation résume les mesures techniques à mettre en œuvre au cours des 10-15 prochaines années pour que les Etats membres puissent développer le stockage géologique des déchets nucléaires. IGD-TP va maintenant définir un agenda stratégique de recherche pour coordonner les efforts nécessaires scientifiques, technologiques et sociopolitiques relatifs au stockage géologique des déchets nucléaires.

⁴⁴ Treatment and disposal of irradiated graphite and other carbonaceous waste ; 2008-2012, 7ème PCRD, 16 pays, 28 partenaires dont l'Andra, le CEA, le CNRS, Areva, EDF, UCAR-SNC et l'Ecole Normale Supérieure.

⁴⁵ Processes of Cation Migration in Clay Rocks; 2010-2013, 7ème PCRD, 5 pays, 7 partenaires dont le CEA (coordinateur), Andra, BRGM.

⁴⁶ Full-scale High Level Waste Engineered Barriers ; 1994-2012, 22 partenaires dont l'Andra, le BRGM et l'Institut National Polytechnique de Toulouse.

⁴⁷ Fate of repository gases ; 2009-2013, 7ème PCRD, 12 pays, 24 partenaires dont l'Andra, le CEA, l'IRSN, le CNRS, EDF et l'Ecole Centrale de Lille.

⁴⁸ 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).

LUCOEX⁴⁹ L'objectif du projet est de réaliser des essais *in situ* de démonstration de différents concepts pour les stockages de déchets HAVL : le concept horizontal au Mont Terri et en Meuse/Haute-Marne ; le concept horizontal dans le granite à Aspö et le concept vertical dans le granite à Onkalo. L'Andra fera un essai de chauffe d'une alvéole HAVL en Meuse/Haute-Marne.

MODERN⁵⁰ Le projet vise à fournir une référence de conception d'un système d'auscultation et de monitoring au cours des différentes phases de stockage, en respectant les besoins et contraintes spécifiques à chaque pays.

NWD⁵¹ L'action a pour but de fournir aussi bien des données expérimentales que des résultats de calculs pour une compréhension du comportement à long terme des déchets à haute activité issus des cycles de combustible, actuels et futurs.

PEBS⁵² 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 des barrières ouvragées. Les expériences et les modèles intègrent le spectre complet des conditions, du début de l'exploitation (haute température, resaturation de la barrière) jusqu'à l'équilibre thermique et la resaturation avec la roche hôte.

RECOZY⁵³ L'objectif est la compréhension des phénomènes redox qui gouvernent la fixation et le relâchement de radionucléides lors du stockage souterrain des combustibles irradiés.

SORPTION II⁵⁴ Ce projet de l'AEN a comme objectif de démontrer la possibilité d'utiliser diverses techniques de modélisation thermodynamique pour l'évaluation de la sûreté des stockages. Le projet a pris la forme d'un exercice de modélisation comparatif avec une série de jeux de données sur la sorption des radionucléides par des matériaux.

3.6.2. Impact environnemental 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.

⁴⁹ Large Underground Concept Experiments ; 2011-2014, 7^{ème} PCRD, 4 pays et partenaires, dont L'Andra (coordinateur), Nagra, Posiva et SKB.

⁵⁰ Monitoring Developments for safe Repository operation and staged closure ; 2009-2012, 7^{ème} PCRD, 12 pays, 17 partenaires, dont l'Andra, coordinateur.

⁵¹ Nuclear Waste Disposal action, Euratom CCR, 11 pays, 21 partenaires, dont le CNRS et le CEA.

⁵² Long-term Performance of the Engineered Barrier System ; 2010-2014, 7^{ème} PCRD, 8 pays, 17 partenaires dont l'Andra.

⁵³ 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.

⁵⁴ Projet Sorption II ; 2000- ?, AEN, 11 pays, 20 partenaires dont l'Andra.

BIOPROTA⁵⁵ L'objectif de Bioprotas, 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 transferts dans la biosphère de radionucléides comme le chlore 36, le sélénium 79, le carbone 14, l'iode 129 etc.

EMRAS⁵⁶ Le programme Emras, initié dans le cadre de l'AIEA, se concentre sur la modélisation en radioécologie, en particulier les conséquences du relâchement de radionucléides dans l'environnement.

RADIOECOLOGY AND WASTE TASK GROUP⁵⁷ 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.

3.6.3. Gouvernance et participation des parties prenantes

La participation du public aux processus décisionnels et l'accès à la justice en matière d'environnement sont devenus un droit.

Groupe de travail ERDO⁵⁸ 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 qui pourrait, d'ici dix ou quinze ans, établir un ou plusieurs centres de stockage européen.

3.7. NOUVELLES FILIÈRES POUR LA SÉPARATION-TRANSMUTATION

Les stratégies de transmutation reposent principalement sur les neutrons rapides, soit dans des systèmes critiques (RNR), soit dans des systèmes sous-critiques (ADS). L'initiative Génération IV et la plate-forme technologique européenne sur l'énergie nucléaire durable (SNE-TP) visent le développement de nouveaux types de réacteurs, parmi lesquels les réacteurs à neutrons rapides pour le multirecyclage des actinides (4^{ème} génération). Ces nouveaux types de réacteurs nécessiteront le développement de nouveaux matériaux et des combustibles innovants incorporant des radionucléides issus de la séparation.

⁵⁵ 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.

⁵⁶ Environmental Modelling for Radiation Safety ; 2003-2011, AIEA, 30 pays, 100 participants.

⁵⁷ <http://www.iur-uir.org/en/task-groups/id-5-radioecology-and-waste> .

⁵⁸ 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.

3.7.1. E&R sur la séparation-transmutation

ACSEPT⁵⁹ Le projet Acsept a succédé 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 de procédés hydrochimiques (extraction et dés-extraction sélectives et groupées d'actinides) et pyrochimiques (électrolyse et extraction liquide-liquide), intégrant les contraintes de l'industrie, doit y être démontrée.

ACTINET-I3⁶⁰ L'objectif du projet est de permettre à la communauté scientifique européenne de bénéficier des infrastructures de laboratoires pour la recherche concernant les actinides.

ANFC⁶¹ Etudes comparatives de cycles de combustible alternatifs basés sur la S&T.

ASTRID⁶² P.m., le prototype de RNR-sodium Astrid, prévu pour 2020.

CDT⁶³ Le projet représente une suite des activités d'Eurotrans DM1. CDT vise à obtenir un design d'engineering avancé pour Myrrha par une équipe européenne d'experts. 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 de design de CDT étudiera également le fonctionnement en mode critique.

CP-ESFR⁶⁴ Le projet est lié au développement du RNR-Na européen ESFR. L'objectif est d'optimiser les niveaux de sûreté, dans le cadre d'un risque financier comparable, et une gestion flexible mais robuste des matériaux nucléaires. Des études d'optimisation seront réalisées sur des combustibles oxyde ou carbure. La fabrication de combustibles chargés en actinides mineurs sera étudiée.

EUFRAT⁶⁵ Le projet poursuit le travail effectué dans le projet Nudame visant la mesure très précise de sections efficaces couvrant un large spectre d'énergie.

⁵⁹ 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.

⁶⁰ Actinet Integrated Infrastructure Initiative, 7^{ème} PCRD, 5 pays, 7 partenaires dont le CNRS, LGI et le CEA.

⁶¹ Alternative Nuclear Fuel Cycles; 2010-..., 7^{ème} PCRD, 6 pays, 14 partenaires dont le CEA.

⁶² Astrid, prototype de réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium, projet piloté par le CEA.

⁶³ 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.

⁶⁴ Collaborative project on European sodium fast reactor ; 2009-2012, 7^{ème} PCRD, 10 pays, 25 partenaires dont le CEA, Areva NP, IRSN et EDF.

⁶⁵ European facility for innovative reactor and transmutation neutron data ; 2008-2012, 7^{ème} PCRD, CE-CCR.

FAIRFUELS⁶⁶ Le projet vise à optimiser la combustion de la matière fissile dans les réacteurs, afin de réduire le volume et le danger potentiel des déchets HAVL. Fairfuels se concentre sur les actinides mineurs. Du combustible dédié sera produit et un programme d'irradiation assez complet sera effectué afin d'étudier les capacités de transmutation. En parallèle, le programme comprend des examens post-irradiation sur certains anciens combustibles afin de développer des modèles. Un programme de formation est également prévu.

F-BRIDGE⁶⁷ Le projet a comme but de faire le lien 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.

GACID⁶⁸ 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 et son irradiation dans un RNR-Na. Les irradiations sont prévues entre 2015 et 2025 ; le projet nécessite la construction d'un atelier pilote pour la fabrication de l'assemblage et un retour d'exploitation suffisant de Monju, ce qui n'est pas acquis.

GETMAT⁶⁹ C'est un projet de collaboration des laboratoires européens experts en recherche sur les matériaux pour les réacteurs et systèmes de transmutation du futur, dont les réacteurs de 4^{ème} génération et ceux dédiés à la fusion.

GIF/GEN-IV⁷⁰ 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 sont explorées en Europe : un réacteur rapide refroidi au sodium (SFR) ; un réacteur à neutrons rapides refroidi au gaz ou au plomb. L'objectif est d'exploiter commercialement une technologie de réacteurs rapides pour l'an 2040.

JHR-CP⁷¹ Le réacteur Jules Horowitz (RJH) est un réacteur de recherche de 100 MWth, actuellement en construction à Cadarache. Il est destiné à 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.

⁶⁶ 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.

⁶⁷ 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.

⁶⁸ Global Actinide Cycle International Demonstration ; DOE, JAEA, CEA.

⁶⁹ Gen IV and transmutation materials ; 2008-2013, 7^{ème} PCRD, 11 pays, 24 partenaires dont le CEA, le CNRS et EDF.

⁷⁰ Generation IV International Forum ; 2001- ?, Euratom + 12 pays dont la France.

⁷¹ 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, maître d'œuvre.

LEADER⁷² Le projet est la suite du projet Elsy. Ce projet envisage d'optimiser les technologies pour la conception d'un réacteur prototype refroidi au plomb d'une puissance de 600 MWe et le design d'un démonstrateur LFR.

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

NURISP⁷³ 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.

PATEROS⁷⁴ Cette action vise la mise en place, à échelle réduite, de toutes les étapes et composants nécessaires à la technologie de séparation-transmutation.

SNE-TP⁷⁵ 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 intègre une réflexion sur 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 la production d'hydrogène, la génération de chaleur et la désalinisation de l'eau de mer. La plateforme soutient une initiative industrielle européenne, European Sustainable Nuclear Industrial Initiative (ESNII), estimée à hauteur de 6 à 10 G€, comprenant les projets Astrid et Myrrha.

THINS⁷⁶ Le projet comprend la conception et la réalisation d'expériences thermo-hydrauliques en support de différents systèmes innovants à base de métaux liquides.

3.7.2. Bases de données nucléaires

Les nouveaux concepts de réacteurs et les études de sûreté associées nécessitent des méthodes et des bases de données nucléaires, au moins du niveau de celles qui sont disponibles pour les réacteurs de la génération actuelle (2^{ème} et 3^{ème} générations).

FAR⁷⁷ Dans le domaine des matériaux et combustibles nucléaires, il s'agit de mettre en place un centre de référence des activités des Centres Communs de Recherche dans ces domaines.

⁷² Lead-cooled European Advanced Demonstration Reactor; 2010-2012; 7^{ème} PCRD, 12 pays et 17 partenaires dont le CEA.

⁷³ Nuclear reactor integrated simulation project, 2009-2012, 7^{ème} PCRD, 14 pays, 22 organismes dont EDF, IRSN et le CEA.

⁷⁴ Partitioning and Transmutation European Roadmap for Sustainable Nuclear Energy ; 2006-2008, 6^{ème} PCRD, 11 pays, 17 partenaires dont le CEA, le CNRS et Areva.

⁷⁵ 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.

⁷⁶ Thermal-Hydraulic research for Innovative Nuclear Systems ; 2010-2014, 7^{ème} PCRD, 11 pays, 24 partenaires dont le CEA et l'IRSN.

⁷⁷ Fundamental and Applied Actinide Research ; action CCR, 12 pays, 26 partenaires.

ND-MINWASTE⁷⁸ Le projet vise l'obtention de données nucléaires pour l'évaluation de la sûreté de réacteurs actuels et futurs et la gestion des déchets radioactifs.

TDB⁷⁹ Ce projet sur les données thermodynamiques relatives aux 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.

3.7.3. Aspects économiques et géopolitiques

ARCAS⁸⁰ Etude technico-économique de la performance des systèmes critiques et sous-critiques comme machines dédiées à la transmutation des déchets radioactifs.

3.8. ENSEIGNEMENT, FORMATION ET GESTION DES CONNAISSANCES

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

HeLiMnet⁸¹ A la suite du projet Vella, ce projet vise à permettre l'échange de chercheurs entre laboratoires disposant d'infrastructure pour l'étude de métaux lourds liquides comme le sodium ou le plomb.

PETRUS II⁸² Le projet permet aux professionnels européens, actifs dans le domaine de la gestion des déchets radioactifs, quelles que soient leurs études initiales, de suivre une formation, reconnue au plan européen, sur le stockage géologique.

KTE⁸³ Archiver, maintenir et approfondir les connaissances en recherche nucléaire sont les buts du projet. Des formations de haut niveau pour jeunes étudiants et chercheurs seront offertes par le biais de stages dans des laboratoires participant au projet.

⁷⁸ 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.

⁷⁹ Thermochemical Database project ; AEN.

⁸⁰ 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.

⁸¹ Heavy Liquid Metal network; 2010-..., 7^{ème} PCRD, 9 pays et 13 partenaires dont le CEA.

⁸² 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.

⁸³ Knowledge Management, Training and Education ; 2007-..., 7^{ème} PCRD, CCR Karlsruhe.

Annexe I

COMPOSITION DE LA COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION NOVEMBRE 2011

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).

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 - 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 Vu-Amsterdam (2004-2014).

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

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

Annexe II

ORGANISMES AUDITIONNÉS PAR LA CNE2

17 novembre 2010 :	Andra – Réversibilité – Récupérabilité (½ journée).
18 novembre 2010 :	CEA – Perspectives nucléaires mondiales : options de cycle ; R&D en S-T.
1er décembre 2010 :	Andra – Inventaires et scénarios de stockage.
2 décembre 2010 :	CEA – Le projet Astrid.
5 janvier 2011 :	CEA – Cycle des matières pour Astrid.
6 janvier 2011 :	Andra – Thermique du stockage (½ journée).
9 février 2011 :	CNRS – Etudes et Recherches – PACEN (½ journée).
10 février 2011 :	CEA – Recherches en séparation.
23 mars 2011 :	CEA – Gestion des déchets CEA.
6 avril 2011 :	CEA - Etudes de scénarios – Point sur le Curium.
11 octobre 2011 :	Andra – Projet Cigéo : exigences applicables et premiers jalons.

* * *

ii

6 octobre 2010 :	Andra – Audition restreinte – Point de vue de l'Andra sur le rapport n° 4 de la Commission – Point d'actualité de l'Andra – Enseignements et propositions d'actions tirés du rapport n° 4.
11 octobre 2010 :	Présentation au Clis du rapport n° 4 (juin 2010) de la CNE.
28 octobre 2010 :	CEA – Audition restreinte – Recherches menées par le CEA en relation avec la loi de 2006 – Études menées par le CEA pour le stockage – Etudes de scénarios de transmutation – Rapport 2012 du CEA (½ journée).
24 février 2011 :	Andra - Réunion de travail sur la géologie pour les nouveaux membres de la Commission (½ journée).
24 & 25 mars 2011 :	Andra – Visite du site de Meuse/Haute-Marne et audition restreinte.
30 mars 2011 :	Andra – Audition restreinte - Plan de management Cigéo – Discussions en cours avec les producteurs sur les options de conception.
31 mai 2011 :	Rencontre avec l'ASN.
28 septembre 2011 :	EDF – Dossier STI.

* * *

VISITES DE LA CNE2

- 10 mars 2011 : Visite du site de Stocamine
- 24 mars 2011 : Visite du laboratoire souterrain de Bure (Meuse/Haute-Marne)
- 5 avril 2011 : Visite de Masurca et du Leca-Star (CEA Cadarache)
- 20-23 sept 11 : Visite des sites de Asse et de Gorleben (Allemagne)

Annexe III

LISTE DES DOCUMENTS TRANSMIS À LA COMMISSION

Andra

- Dimensionnement et architecture générale d'un stockage - Site de Meuse/Haute-Marne - C.NSY.ASTE.08.0171/A.
- Projet HA-MAVL - Dossier 2009 - Options de conception étudiées - Synthèse des évaluations de performance vis-à-vis du critère Sûreté Après Fermeture (SAF) - C.NT.AEAP.09.001 0/A.
- Analyse préliminaire des risques liés au transfert et à la manutention des colis HA et MAVL (Installations Souterraines) - C.NT.ASSN.09.0039/A.
- Projet HAVL - Desserte des installations de surface du centre de stockage - Diagnostic des infrastructures de transport et des réseaux - Rapport général - C.RP.OBLC.09.0004/A.
- Rapport mi-parcours pour le Groupement de Laboratoires "Transfert de Gaz" - C.RP.ASCM.09.0002/C.
- Rapport mi-parcours du Groupement de Laboratoires Verre/Fer/Argile - Tome 1 : Synthèse et modèles - C.RP.ASCM .09.0003/8.
- Rapport mi-parcours du Groupement de Laboratoires Verre/Fer/Argile - Tome 2 Recueil des fiches d'avancement des études - C.RP.ASCM .09.0003/6.
- Rapport mi-parcours du Groupement de Laboratoires Evolution des Structures Cimentaires - C.RP.ASCM.09.0004/B.
- Mise en place de l'Observatoire Pérenne de l'Environnement (OPE) - Bilan 2007/2008 de l'environnement - jalon 2009 Niveau 5 - C.RP.ASTR.09.001 0/A.
- Rapport mi-parcours du programme du groupement de laboratoires Transfert - C. RP.ASTR. 09.0011/B
- ThermoChimie project - Mid-term report - C.RP.ASTR.09.001.
- Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne - Projet de cahier des charges - DAIE : pièce n° 8 - D.DO.ASAJ.09.0045/A.
- Biosphère - Démarche de choix et de description d'une ou plusieurs biosphère(s) - SUR.GU.ASSN.09.0045/A.
- Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR) chroniques pour les toxiques chimiques de la liste de base de l'Andra (réactualisation à fin 2007). - Note récapitulative - As, B, Be, Cd, Cr(III), Cr(VI), Hg, Pb, Sb, Se, U, CN-, amiante - SUR.NT.AMES.08.0035/A.
- 17 articles portant sur la modélisation géomécanique – 23 juin 2010 (faut-il tous les citer ?)
- Programme scientifique 2010-2014 – projet HA-MAVL – C.PE. ADS. 10.0005 - 15 juin 2010.
- Rapport d'activité - Gérer aujourd'hui pour préparer demain – 2009.
- Rapport de développement durable – Gérer aujourd'hui pour préparer demain – 2009.
- Document interne sur la stratégie d'industrialisation du projet HA-MAVL : vers la réalisation du centre industriel de stockage géologique "Cigéo" – 09/09/2010.
- Document confidentiel - Options de conception - Analyse partagée Andra/Areva/CEA/EDF – mai 2011.

- Note interne – Outils de simulation numérique à l'Andra – Eléments de stratégie pour la période 2006-2014 et état des lieux à fin 2010 (référence DS/EAP/10-0138) – 08 décembre 2010.
- Document interne – Veille internationale sur projets HA-MAVL et sur la situation des déchets radioactifs 2010 – 22 décembre 2010.
- Note concernant l'évaluation de l'énergie thermique totale dégagée par le stockage – 12 janvier 2011.
- Note interne – Processus de corrosion type goutte-à-goutte des composants métalliques d'une alvéole HA. – 10 janvier 2011.
- Note interne – C.NT.ADIP.11.0001 – Projet Cigéo – Synthèse du plan de management – Phase études – 31 janvier 2011.
- Document interne – Le comportement (thermo)hydromécanique des argilites : du matériau à l'ouvrage (référéncé C.NT.AEAP.11.0026/A) – 22 mars 2011.
- Rapport de la revue de projet Cigéo.
- Rapport Andra – Cigéo.SP.ADPG.11.0020 Exigences applicables – Projet Cigéo – 27 avril 2011.
- Recommandations de la revue de contrat d'études : suites données par l'Andra à la revue de projet Cigéo – 30 août 2011.
- Etudes et réalisation industrielle de Cigéo et l'annexe : "extraits de la spécification technique de besoin préliminaire (STBp)" – 14 octobre 2011.
- Projet Cigéo – Spécification technique du besoin Préliminaire (STBp) – 17 octobre 2011.

CEA

v

- Rapport d'étape – Note de synthèse – Évaluation technico-économique des options de transmutation - Septembre 2010 (document confidentiel).
- Note de MM. Philippe Billot et Jean-Louis Seran – Materials requirements to support research of the Generation IV – Systems Development (VHTR, GFR, SFR) 2005 (document confidentiel).
- Rapport de synthèse sur la faisabilité de la séparation des actinides mineurs – DEN/DRCP/RT 2010/03 – Christine Rostaing – 2010 (diffusion restreinte).
- Rapport technique DEN – Evaluation technico-économique des options de transmutation – rapport d'étape – Septembre 2010 (diffusion restreinte).
- Note technique DEN – Synthèse des concepts d'entreposage d'actinides mineurs 04/2007 – Projet Entam – Septembre 2007.
- Rapport Technique DEN – Nouveau modèle de comportement à long terme des verres : présentation du modèle Graal – Yves Minet, Stéphane Gin, Pierre Frugier, Magaly Tribet, Isabelle Ribet – Novembre 2010.

EDF

- Synthèse de présentation du stockage industriel (STI) des exploitants nucléaires – EDF/AREVA (réf. D5262 2010/05529) – 14 octobre 2010.
- Inventaires des déchets HA et MAVL pour le scénario STI 2009 – EDF – (réf. D5262 2010/02337) - Octobre 2010.
- STI – Sûreté en exploitation – EDF (réf. ELI1000098) – Octobre 2010.

- Note de confirmation des hypothèses géologiques pour la conception du génie civil des installations souterraines – EDF – (réf. EDTGG100511 B) - 2009.
- Compatibilité du concept de stockage STI avec une gestion réversible – EDF – (réf. T29-2010-01705-FR) – 14 octobre 2010.
- Description des ouvrages de l'architecture souterraine du STI 2009 – EDF – (réf. IH HAVL STI/N1 00001 B BPE – Octobre 2010.
- Installations de surface de la zone descendrière – Estimation des investissements – AREVA – (réf. NT 100496 00 0005 B) – 11 octobre 2010.
- STI – Faisabilité et architecture de la ventilation – EDF – (réf. ELIMF1000680 B BPE) – 2010.
- Installation de surface de la zone de descendrière et équipements fond-estimation des frais d'exploitation, des coûts périodiques et de déconstruction – AREVA – (réf. 011908/LTA/10.0039) – 8 octobre 2010.
- Dimensionnement des ouvrages de l'architecture souterraine – EDF – (réf. IH HAVL STI-N2 00001 C BPE) – Décembre 2010.
- Longueurs utiles d'alvéoles Haute activité (Module C5) Influence sur les coûts – EDF – (réf. IH HAVL STI-N2 00002 C BPE) – 25 février 2011.
- Détermination du chargement des alvéoles Haute Activité (C0, CU3, C1, C5, C6 et C8) – EDF – (réf. IH HAVL STI-N2 00003 B BPE) – 25 janvier 2011.
- Evaluation de l'effet de l'orientation des ouvrages du stockage par rapport à l'anisotropie de l'état des contraintes initial – EDF – (réf. IH HAVL STI-N2 00004 B BPE) – 19 janvier 2011.
- Evaluation des contraintes dans le béton de la galerie d'accès aux colis C5 à l'atteinte du pic de température dans la Barrière Géologique – (réf. IH HAVL STI-N2 00005 B BPE) – 26 janvier 2011.
- Etudes de sûreté long terme en scénario d'évolution normale (SEN) et scénario d'évolution altérée (SEA) associées à l'architecture STI 2009 – EDF – 2 février 2011.
- Note technique Stockage Profond - Installations de surface - Procédé de conditionnement/stockage Colis MAVL et HA - descriptif technique – AREVA – (réf. NT 100496 20 0001 C) – 25 janvier 2011.
- Pertinence de l'utilisation d'un tunnelier pour le creusement des ouvrages souterrains du projet MA-HAVL – EDF - (réf. IH HAVL STI-N2 0007 B BPE) – 7 février 2011.
- Effets du comportement différé sur le creusement des tunnels – Alexandra Kleine – Ingénieur EDF/CIH.
- Modélisation d'une excavation avec prise en compte des effets différés et couplage hydromécanique – Roland Plassard, François Laigle, Roméo Fernandes, Albert Giraud et Dashnor Hoxha.
- Hydromechanical modeling of an underground excavation with an elastoviscoplastic behavior law and regularization – Roland Plassard, Roméo Fernandes, François Laigle, Albert Giraud et Dashnor Hoxha.
- Hydromechanical modeling of an excavation in an underground research laboratory with an elastoviscoplastic behavior law and regularization by second gradient of dilation - Roland Plassard, Roméo Fernandes, François Laigle, Albert Giraud et Dashnor Hoxha.
- Effet du comportement différé sur le creusement des tunnels – Alexandra Kleine, François Laigle, Albert Giraud.
- Modélisation hydromécanique du comportement différé des ouvrages souterrains – Application au laboratoire de stockage des déchets radioactifs de Meuse/Haute-Marne - Roland Plassard, François Laigle, Albert Giraud et Dashnor Hoxha – Revue Tunnels et espace souterrain – n° 225 – mai/juin 2011.

- An elastoplastic strain-softening constitutive model for deep rock – three-dimensional applications for nuclear waste repository problem – Alexandra Kleine, François Laigle, Albert Giraud.
- Modélisation numérique du comportement des ouvrages souterrains par une approche viscoplastique –Thèse d'Alexandra Kleine – 14 novembre 2007.
- Modélisation hydromécanique du comportement des ouvrages souterrains avec un modèle élastoviscoplastique –Thèse de Roland Plassart – 15 décembre 2011.

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

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

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

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°5

ANNEXES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

NOVEMBRE 2011

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°5

ANNEXES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

Tome 2

NOVEMBRE 2011

S O M M A I R E

ANNEXE 1 – SUR LES ACTIVITÉS AU CNRS	1
ANNEXE 2 - BILAN MATIÈRES D'UN PARC DE REP DE 430 TWhe/AN ET UN PARC RNR DE 430 TWhe/AN.....	3
ANNEXE 3 – RESSOURCES EN URANIUM	7
ANNEXE 4 – MATÉRIAUX POUR ASTRID	9
ANNEXE 5 – ADS – SYSTÈMES PILOTÉS PAR ACCÉLÉRATEUR	11
ANNEXE 6 – RETRAITEMENT APRÈS UN TEMPS DE REFROIDISSEMENT COURT	15
ANNEXE 7 – ÉLÉMENTS GÉOLOGIQUES ET HYDROGÉOLOGIQUES CONCERNANT LA ZIRA..	17
ANNEXE 8 – THERMIQUE DU STOCKAGE	23
ANNEXE 9 – GÉOMÉCANIQUE.....	29
ANNEXE 10 – RÉVERSIBILITÉ	41

Annexe 1

SUR LES ACTIVITÉS DU CNRS

Les représentants du CNRS ont rendu compte des travaux sur les systèmes d'énergie nucléaire du futur et le stockage géologique des déchets radioactifs, menés dans le cadre du programme de recherche sur l'aval du cycle (Pacen).

Le CNRS est un partenaire majeur des E&R sur les ADS conduites dans le cadre de collaborations internationales, et notamment dans le cadre du projet Guinevere qui est une étape importante du projet Myrrha, et pour les développements à venir dans le cadre du 7^{ème} PCRD. Les avancées techniques, réelles, apportent des données significatives sur une alternative possible aux RNR pour la transmutation des actinides mineurs. Bien que cette approche n'ait pas atteint une maturité suffisante pour que la faisabilité technique puisse être comparée à celle d'une filière fondée sur des réacteurs à neutrons rapides, il est important de la développer jusqu'à un stade permettant d'établir une éventuelle faisabilité technique.

Cette même approche maintient de nombreuses expertises et compétences dans les domaines de la neutronique, des matériaux, des procédés, complémentaires de celles sollicitées pour le développement des RNR, et contribue à maintenir vivante une communauté scientifique liée au nucléaire du futur.

Le CNRS possède une grande expérience dans l'étude des transferts, géologiques ou environnementaux, des éléments et notamment des radionucléides. Des études concernant la migration du sélénium dans les champs proche ou lointain, et celle de radioéléments dans le site de Tchernobyl ou dans le site expérimental de Tournemire, en collaboration avec l'IRSN, produisent des résultats de qualité. Les transferts gazeux dans les failles font également l'objet de recherches qui impliquent de nombreuses équipes universitaires et du CNRS.

Les données fondamentales produites par les équipes du CNRS pour irriguer les projets liés à la gestion des matières et des déchets radioactifs constituent un apport significatif. La Commission encourage vivement ces équipes à mener une réflexion stratégique afin que le projet de stockage géologique mené par l'Andra et les E&R sur la séparation-transmutation pilotées par le CEA, puissent bénéficier pleinement de leurs compétences.

Une stratégie de gestion des déchets dans laquelle les déchets MAVL seraient stockés en profondeur dès 2025, alors que les déchets HAVL resteraient entreposés en surface jusqu'à 2125 ou au-delà a été présentée. La Commission souligne que cette approche remet inutilement en cause les objectifs de sûreté du stockage géologique.

S'agissant de la réversibilité, la Commission demande que les équipes SHS du CNRS impliquées dans le projet Pacen lui présentent leurs résultats.

Annexe 2

BILAN MATIÈRES D'UN PARC DE REP DE 430 TWhe/AN ET D'UN PARC RNR DE 430 TWhe/AN

2.1. QUELQUES CHIFFRES SUR LE PARC FRANÇAIS DE REP ACTUEL DE 430 TWhe/AN (FIGURE 1)

Le parc de Rep français de 430 TWhe/an produit annuellement environ 10 tonnes de plutonium et 1 tonne d'actinides mineurs. Avec le choix du retraitement et l'utilisation du combustible Mox¹, on brûle 3 tonnes de plutonium. En Rep, il n'est pas envisageable de multirecycler les actinides, c'est pourquoi on se limite à un cycle². Les 7 tonnes de plutonium non brûlé sont actuellement confinées au sein du combustible Mox utilisé, entreposé en piscine.

D'ici à 2040, après une trentaine d'années de fonctionnement du parc Rep, on aura ainsi accumulé environ 300 tonnes de plutonium. Chaque année supplémentaire de fonctionnement génère 10 ou 7 tonnes de plutonium, selon qu'il y a ou non moxage, et environ dix fois moins d'actinides mineurs.

Par ailleurs, un tel parc consomme de l'uranium enrichi, produit de l'uranium appauvri dont le stock ne cesse de croître. Il s'appuie donc sur une filière d'enrichissement de l'uranium (usines Georges Besse I, puis Georges Besse II) et une production minière générant des déchets miniers.

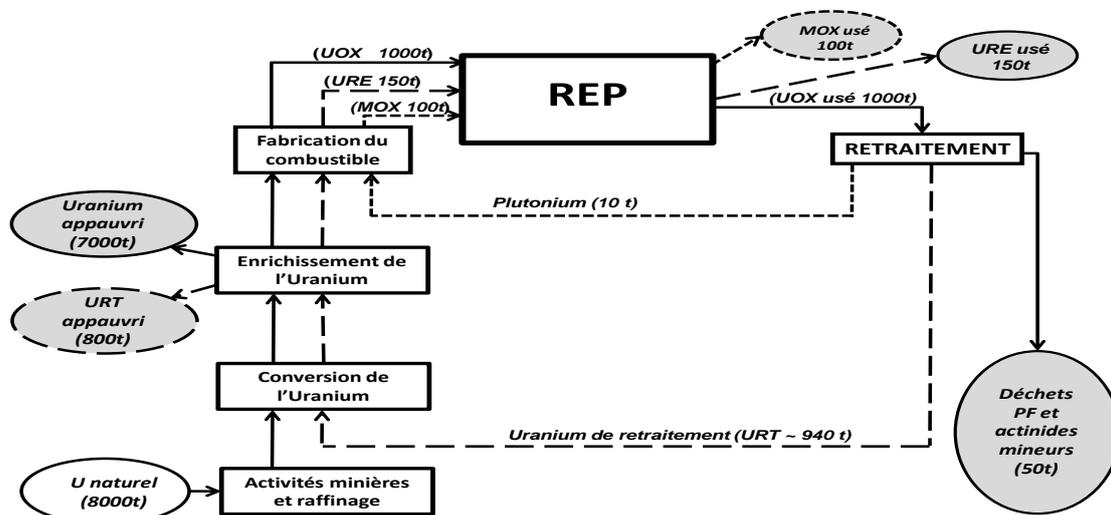


Figure 1 : Estimation d'ordre de grandeur de flux annuels de matières pour 430 TWhe/an dans un parc de REP avec monorecyclage du plutonium (CEA-EDF-Areva ; données 2010)

¹ Mixed Oxide ; combustible nucléaire à base d'oxyde d'uranium appauvri et d'oxyde de plutonium.

² En spectre thermique, les seuls isotopes fissiles sont le plutonium 239 et le plutonium 241, les isotopes pairs du plutonium se comportant comme des poisons pour la réaction en chaîne. Si l'on voulait multirecycler le Pu en REP, il faudrait augmenter au chargement du cœur la teneur en plutonium 239, ce qui est limité pour des raisons de sûreté.

2.2. COMPARAISON AVEC UN PARC HYPOTHÉTIQUE DE RNR DE 430 TWhe/AN (FIGURE 2)

Un parc de réacteurs à neutrons rapides (RNR) de 430 TWhe/an ne produirait pas de plutonium ; il fonctionne sur la masse de plutonium avec laquelle il a été chargé au départ.

Pour fixer les idées, chaque RNR de 1 500 MWe à démarrer nécessiterait d'être alimenté une première et unique fois par une douzaine de tonnes de plutonium, avec à disposition une recharge équivalente le temps des opérations de retraitement ; soit 24-25 tonnes à prévoir par réacteur. Au fur et à mesure du fonctionnement du cœur, il convient d'en extraire ("purifier") les produits de fission et tout ou partie des actinides produits, soit *a minima* le plutonium qui repart en fabrication de combustible. Le cœur d'un RNR produit 2 à 3 tonnes d'actinides mineurs par an, car les fissions et les captures se font à partir du plutonium, plus lourd que l'uranium. Le cœur ne produit pas de plutonium : il en consomme autant qu'il en produit, puisqu'on est en fonctionnement isogénérateur d'un système transmutateur.

Ainsi, dans cet exemple, à partir des 300 t de plutonium stockés dans les Mox usés, il serait possible de démarrer une vingtaine de réacteurs en mode isogénérateur, soit un tiers du parc de 430 TWhe. Le reste serait obtenu au fur et à mesure des opérations de retraitement des Rep encore en service.

Ce fonctionnement présente l'avantage net de multirecycler le plutonium, ce qui constitue une valorisation d'une matière importante en termes de ressource qui sinon deviendrait un déchet ; le RNR peut de la même façon multirecycler les actinides mineurs, ce qui pourrait présenter un intérêt sur le futur inventaire des déchets et leur stockage.

4

Au fur et à mesure qu'on extrait les produits de fission et les actinides, il faut alimenter en proportion de masse, en uranium appauvri. Un parc de RNR ne produit donc plus d'uranium appauvri car il ne nécessite plus d'enrichissement, mais de surcroît il en consomme à hauteur de 40 tonnes annuellement, tout le parc étant en service. Ainsi outre qu'il permet la valorisation du plutonium, et éventuellement une meilleure gestion des actinides mineurs, ce parc supprime la question de l'enrichissement et des aspects miniers. Il est donc performant en termes de bilan des matières (économie de la ressource, diminution des déchets).

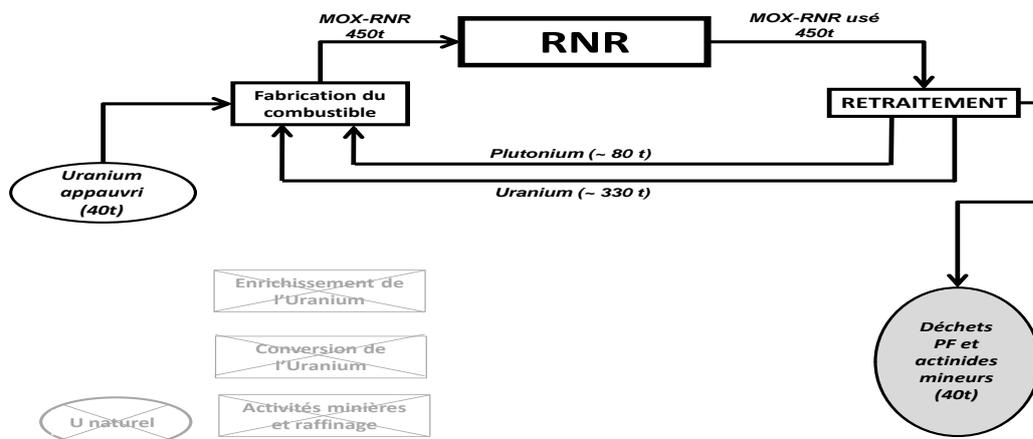


Figure 2 : Estimation de l'ordre de grandeurs des flux annuels de matières pour 430 TWhe/an dans un parc de RNR avec multirecyclage du plutonium (CEA-EDF-Areva ; données 2010)

Quand l'ensemble du parc RNR est en service, à l'équilibre, on dispose dans le cycle d'environ 1 000 tonnes de plutonium qui "tournent en rond". C'est cette part qu'il faudra gérer à l'arrêt du nucléaire. Il faut garder à l'esprit que dans une filière de type Rep, l'inventaire en plutonium ne sera pas stabilisé mais continuera de croître. Cet inventaire devra être mis au stockage géologique.

Dans un parc RNR en fonctionnement nominal, on aura en moyenne 100 tonnes d'actinides mineurs dans le cycle, ce qui correspond à 100 ans de fonctionnement d'un parc Rep équivalent. La transmutation n'a d'intérêt que si elle est mise en œuvre pendant une longue période (au-delà de 100 ans) et que la gestion des 1 100 tonnes d'actinides à l'arrêt du parc de réacteurs aura été anticipée. Cette gestion de l'inventaire à l'arrêt se pose également avec un parc de Rep, mais avec un bilan de masses plus élevé puisque les inventaires n'auront pas été stabilisés.

Annexe 3

RESSOURCES EN URANIUM

Les besoins mondiaux en uranium sont actuellement de l'ordre de 60.000 tonnes par an (pour environ 2.700 TWh produits chaque année par le nucléaire). La production des mines ne couvre actuellement que 60 à 70 % de ces besoins, soit environ 40 000 tonnes ; le reste correspond à de l'uranium déjà extrait, retraité ou déstocké à partir d'usages civils ou militaires. Il existe en pratique deux marchés de l'uranium : le marché dit "spot" qui joue un rôle marginal assurant 10 à 15 % des besoins ; le marché de contrats bilatéraux à long terme qui couvre 50 à 55 % des besoins environ, le solde correspondant à de l'uranium retraité. A terme, le déstockage d'uranium militaire devrait disparaître et la production minière sera donc appelée à augmenter.

Le prix spot de la livre américaine de yellow cake (U_3O_8) était moyennement élevé entre 1950 et 1973 ; le prix s'est envolé au moment du premier choc pétrolier pour s'effondrer à moins de 30 \$ au milieu des années 1980, suite à l'arrêt de nombreux projets de centrales après l'accident de Three Mile Island. A noter que le prix spot est plus volatil que le prix des contrats à long terme. Les prix sont repartis à la hausse entre 2003 et 2007, atteignant près de 140 \$ la livre, pour s'effondrer ensuite avant de se redresser en 2010 avec la reprise des projets nucléaires un peu partout dans le monde. L'accident de Fukushima, qui va sans doute se traduire par un ralentissement des programmes, devrait stabiliser le prix de l'uranium à un niveau modeste, le niveau actuel étant de l'ordre de 60 \$. A noter que le prix de l'uranium naturel ne représente que 5 % du coût du kWh nucléaire en sortie de centrale. Mais ce prix est très sensible aux projets de construction de réacteurs.

7

Les réserves prouvées d'uranium récupérables à un coût inférieur à 70 \$ par livre sont estimées entre 3,3 et 5,4 millions de tonnes, selon les sources et les hypothèses de coût, ce qui correspond à 80 années de fonctionnement des réacteurs actuellement en service. Ces réserves sont assez bien réparties dans le monde et la plupart des pays détenteurs de réserves sont aujourd'hui considérés comme fiables ; ainsi l'Australie détient 22 % des réserves prouvées, le Kazakhstan 15 %, le Canada 11 %, les États-Unis 10 %, l'Afrique du Sud 8 %. Les pays de l'OCDE détiennent 40 % des ressources identifiées d'uranium. Le Canada et l'Australie contribuent d'ailleurs à eux seuls à 44 % de la production mondiale d'uranium. De nouvelles découvertes sont au demeurant probables, de sorte que dans le contexte actuel il ne faut pas craindre la pénurie, ni la dépendance à l'égard de fournisseurs peu fiables. La dépendance du nucléaire vis-à-vis de la disponibilité en uranium peut donc être considérée comme faible, et si l'on comptabilise les réserves probables avec les réserves possibles, on dispose de plus de 100 ans de combustible sur la base des réacteurs actuellement en service.

Mais il ne faut pas exclure une forte reprise de la construction de réacteurs dans le futur. Si cela paraît peu probable aujourd'hui du fait de l'arrêt de certains programmes - mais aussi en raison d'un prix très bas du gaz sur le marché américain, ce qui pénalise le nucléaire par rapport aux cycles combinés à gaz- une forte reprise des investissements nucléaires après 2030 est une hypothèse à envisager. Certains scénarios de l'AIEA ou de l'IIASA montrent que, dans ce cas, des tensions sur le prix de l'uranium pourraient à nouveau apparaître. Les réserves en uranium pourraient devenir, à nouveau, une contrainte forte et le recours à des réacteurs à neutrons rapides éloignant pour quelques siècles tout risque de pénurie pourrait se justifier.

Annexe 4

MATÉRIAUX POUR ASTRID

On peut décliner les recherches à mener suivant les classes de composants :

- **Les combustibles (consommables)**

Les alliages de gainage envisagés pour le combustible sont des Fe-Cr à renfort ODS. Ces matériaux sont intéressants pour leur résistance au gonflement et leur bonne tenue au fluage. Par contre, leur élaboration et leur assemblage sont difficiles et demandent des études aussi bien scientifiques que technologiques. L'apparition très brutale du fluage tertiaire et les instabilités microstructurales, liées soit à la température soit à l'irradiation, nécessitent une étude soignée, et de garder en réserve une solution de rechange.

- **La cuve (non remplaçable)**

Le choix de la cuve en acier inoxydable 316 est justifié par les faibles contraintes - par contraste avec les Rep et la relative innocuité du sodium. Compte tenu de l'expérience acquise sur les Rep, il serait judicieux d'inclure dans la conception d'Astrid la présence d'échantillons témoins qui permettraient de suivre le vieillissement de la cuve.

- **Les circuiteries et les échangeurs (remplaçables)**

Le point clé en termes de sécurité est de s'assurer de l'absence de percement entre le circuit secondaire et le circuit de sodium. Cette question qui relève essentiellement de la corrosion sera cruciale tant que l'on s'en tiendra à un échangeur sodium/eau ; elle sera amplifiée par toute velléité de faire fonctionner les échangeurs à plus haute température pour des questions de rendement thermodynamique.

Annexe 5

ADS – SYSTÈMES PILOTÉS PAR ACCÉLÉRATEUR

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

5.1. PRINCIPE DES ADS – DIFFÉRENCES PAR RAPPORT AUX RNR-SODIUM

Contrairement aux réacteurs à neutrons rapides, électrogènes, le cœur d'un réacteur ADS est sous-critique. Afin d'entretenir la réaction en chaîne, un apport externe en neutrons y est requis. A cette fin, le faisceau d'un accélérateur de particules (protons) de haute puissance (de l'ordre de quelques dizaines de MW) est dirigé vers une "source de spallation" (une cible de métal liquide ou solide comme le plomb ou le tungstène). L'interaction entre le faisceau de protons et les noyaux de métal crée une source très intense de neutrons rapides, provoquant la réaction en chaîne dans le cœur. Contrairement aux réacteurs critiques où il faut contrôler en permanence la réaction en chaîne grâce à des éléments absorbeurs de neutrons, les ADS sous-critiques ne peuvent fonctionner que tant qu'il y a apport externe de neutrons. Ils ont donc une sûreté passive inhérente puisqu'ils s'arrêtent de fonctionner dès que l'accélérateur est coupé. Si l'on veut charger de façon importante (40 à 50 %) le cœur d'un transmutateur ADS, la sous-criticité est nécessaire. En effet, le contrôle d'un réacteur critique par des absorbants est rendu possible grâce à la présence d'une petite fraction de neutrons retardés. Or cette fraction devient de plus en plus ténue à mesure que le noyau à fissionner devient plus lourd (en unités "pcm" : 700 pour l'U, 400 pour le Pu, 100 pour l'Am et 30 pour le Cm). Dès lors, la fraction d'actinides mineurs, comme l'américium ou le curium que l'on pourrait charger dans un cœur critique, est limitée à quelques %.

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

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

5.2. ASPECTS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES ÉTUDIÉS OU À DÉMONTRER

Il n'y a pas, actuellement, d'ADS opérationnel, bien que différents sous-éléments d'un ADS aient été ou sont construits et étudiés.

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

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

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

Le Pb-Bi est employé comme caloporteur dans les réacteurs russes. La visualisation sous métal liquide et les interactions entre l'eutectique et les matériaux en contact avec le Pb-Bi, sont actuellement étudiées au SCK•CEN dans le cadre du projet Myrrah et par d'autres partenaires en Europe (KIT, CIEMAT, ENEA, KTH), en Russie (IPPE) et aux USA (LANL, MIT).

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

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

Actuellement dans le cadre du 7^{ème} PCRD, le projet Arcas permet d'étudier les scénarios de transmutation en mode hétérogène (c.-à-d. avec des combustibles de transmutation dédiés). Le projet est coordonné par le SCK•CEN avec la participation de 11 partenaires dont CNRS.

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

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

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

Concernant la recherche sur les ADS, la Commission peut noter l'important effort de recherche du CNRS-Pacen au niveau de l'accélérateur et du faisceau, ainsi que les travaux du CEA axés sur le combustible à haute teneur d'actinides et sur les matériaux. Les autres recherches technologiques se font principalement à l'étranger, dans le cadre de projets européens ou nationaux.

Annexe 6

RETRAITEMENT APRÈS UN TEMPS DE REFROIDISSEMENT COURT

L'américium est l'actinide mineur qui contribue le plus à la charge thermique des déchets. Il se forme à partir du plutonium 239, par capture neutronique dans le combustible ; il se forme également par décroissance β du plutonium 241 (période de 14 ans) qui conduit à la formation de l'américium 241.

Il est donc théoriquement possible de réduire la quantité d'américium formée en limitant les américiums issus de la décroissance du plutonium, i. e. en limitant le temps entre le déchargement du combustible du réacteur et son retraitement, qui actuellement est de l'ordre de plusieurs années.

Cela supposerait d'effectuer la mise en solution du combustible et la séparation des actinides le plus tôt possible après le déchargement du combustible. On pourrait alors démarrer le recyclage du plutonium 241 avant sa décroissance, dès que séparé et mixé avec l'ensemble du plutonium dans l'atelier de fabrication du combustible (AFC).

Actuellement, le combustible issu d'un Rep chargé en Uox, ayant fonctionné avec un taux de conversion de 45 GWj/t, contient, à sa sortie du réacteur, 0,61 kg d'américium dont 24 % d'américium 241 par TWh produit. Après un entreposage de 5 ans, le même combustible contient 1,62 kg d'américium par TWh produit, dont 71 % d'américium 241. Dans le premier cas, sans entreposage, on a à gérer environ 150 grammes d'américium 241 par TWh produit, dans le second cas plus de 1,120 kg. Sans entreposage, si l'on pouvait séparer "à chaud", on aurait quasiment 10 fois moins d'américium 241. Ces données sont très dépendantes du taux de combustion ; la quantité d'américium 241 augmente sensiblement avec ce taux.

Le scénario qui consiste à retraiter rapidement le combustible utilisé permettrait de diminuer d'un facteur important la quantité d'américium 241 formé par rapport à un retraitement effectué après 5 ans d'entreposage.

Dans une telle approche, on allégerait la charge en actinides mineurs des verres, sans avoir besoin de passer par l'étape de leur transmutation. En utilisant un combustible usé issu d'un RNR, le CEA a un projet à l'étude pour examiner cette autre approche du cycle du combustible.

Annexe 7

ÉLÉMENTS GÉOLOGIQUES ET HYDROGÉOLOGIQUES CONCERNANT LA ZIRA

Depuis 1995, de très nombreux forages ont été réalisés dans la région de Meuse-Haute Marne et de nombreux profils de sismique réflexion 2D et 3D ont été retraités (cas de l'ancienne sismique pétrolière) ou acquis par l'ANDRA (15 km de 2D en 1995, 4 km² de 3D en 1999) afin de reconnaître l'architecture du sous-sol et caractériser le degré d'hétérogénéité au sein des argilites callovo-oxfordiennes et de ses encaissants. Ces données ont tout d'abord permis de définir une zone de transposition d'environ 250 km² où pourraient être identifiées une ou plusieurs zones d'intérêt pour une reconnaissance approfondie (Zira) d'une trentaine de km² destinées à l'implantation d'un stockage.

Ces données de sub-surface, complétées par des levés géologiques détaillés et les travaux menés dans le laboratoire souterrain, ont permis à l'Andra de sélectionner une Zira de 28,5 km², où pourrait être installé le futur stockage souterrain ; celle-ci a été approuvée par le gouvernement fin 2009. Cette zone fait à présent l'objet de reconnaissances approfondies selon un programme scientifique établi par l'Andra et dont la composante essentielle en 2010 a été la réalisation et l'interprétation d'une campagne géophysique en trois dimensions.

7.1. APPORTS DE LA NOUVELLE CAMPAGNE GÉOPHYSIQUE 3D

17

La campagne de géophysique 3D réalisée en 2010 sur 37,1 km², a permis de couvrir la totalité de la Zira (28,5 km²). Cette campagne a été réalisée avec succès grâce à une très bonne couverture de la zone de mesures et une excellente qualité des données recueillies. La rapidité du traitement a permis à l'Andra d'en réaliser les premières interprétations.

Une quantité considérable de données a été acquise, comprenant :

- ❖ 15.271 points vibrés, 23.545 points d'enregistrement, complétés par 11 km de lignes 2D débordant de la Zira pour assurer un calage sur les forages profonds existants voisins, en l'absence de forage profond dans la Zira proprement dite ;
- ❖ 19 carottages sismiques pour calibrer les vitesses de propagation des ondes sismiques ;
- ❖ et 30 km de profils WZ (weathered zone) afin de disposer des informations nécessaires pour corriger celles concernant la profondeur des effets des formations géologiques altérées en surface.

L'interprétation structurale est terminée, et a été réalisée sur les données sismiques migrées en temps. L'interprétation par inversion stratigraphique a commencé.

Les cartes, réalisées sur les données en temps double, n'ont pas encore été converties en profondeur. Elles mettent néanmoins en évidence des linéaments de direction N120 au sein du Dogger, sous-jacent au Callovo-oxfordien, déjà identifiés au cours de la campagne 3D précédente, réalisée en vue de l'implantation du laboratoire souterrain. Ces linéaments n'ont pas d'enracinements profonds, sont absents du Callovo-Oxfordien (Cox), et ne se retrouvent pas non plus exprimés dans les niveaux marno-calcaires sus-jacents. Par analogie avec les affleurements du Dogger situés au sud-est de la Zira, ces objets géologiques sont interprétés comme des constructions récifales dont les alignements seraient de fait contrôlés par la paléo-bathymétrie et le paléo-environnement, plutôt que par des accidents structuraux, postérieurs à la constitution des récifs.

Des linéaments N-S plus profonds, également observés dans les campagnes antérieures, sont interprétés comme des amincissements synsédimentaires de la série salifère, compensés par les dépôts sus-jacents. Il n'est pas exclu que des déformations par fluage de la série salifère aient pu aussi par la suite contribuer à ce phénomène.

L'ensemble des données géophysiques désormais disponibles sur la Zira démontrent qu'il n'y a pas d'objets structuraux identifiables par sismique, donc de rejet supérieur à 5 m selon l'Andra, au mur et au toit du Cox, qui seraient apparus après son dépôt et seraient donc susceptibles de traverser cette formation. En l'absence de marqueurs sismiques au sein du Cox, on ne peut toutefois exclure l'existence de fractures de rejets moindres, qui seraient dues à des tassements différentiels au cours de la sédimentation ; mais de telles fractures devraient rester confinées dans les formations imperméables, sans risque de se prolonger dans les encaissants sus-jacents et *a fortiori* sous-jacents.

La nouvelle campagne sismique confirme l'excellente homogénéité de la Zira. Le modèle géologique 3D apparaît, à l'issue des premières interprétations des données sismiques, suffisamment robuste pour que l'on puisse exclure la présence de discontinuités structurales traversant la couche du Callovo-oxfordien et capables d'assurer une liaison hydraulique avec les aquifères encaissants. La présence de discontinuités de faible extension au sein même de la couche ne peut à ce stade être totalement écartée. De tels objets ne seraient visibles qu'au moyen de forages inclinés pénétrant la couche argileuse ou dans les galeries et forages au cours de la progression du creusement du stockage. Il faut noter qu'aucun objet de ce type n'a été jusqu'à ce jour rencontré, ni dans les différents forages verticaux ou inclinés réalisés, ni dans le laboratoire souterrain. La décision d'entreprendre de nouveaux forages inclinés au sein de la Zira avant le creusement du stockage devra être soigneusement pesée car ceux-ci pourraient constituer des voies de transfert potentielles reliant le Callovo-oxfordien à sa couverture.

7.2. CONNAISSANCE DES VARIATIONS LITHO-STRATIGRAPHIQUES DU CALLOVO-OXFORDIEN

L'Andra a fait un très gros effort de compilation et de synthèse des données pour relier les propriétés pétro-physiques (minéralogie, conductivité thermique, perméabilité, porosité) des argiles du Callovo-Oxfordien (Cox) aux caractères génétiques à l'échelle régionale résultant du modèle sédimentologique de dépôt du Cox et de ses encaissants. Ces données ont été acquises d'une part dans les galeries du laboratoire souterrain où le massif rocheux est directement accessible et d'autre part, dans les forages où les données sont obtenues par analyse macroscopique et microscopique des carottes et des cuttings mais aussi par des diagraphies.

L'épaisseur totale du Cox varie de 130 à 160 m, avec un pendage régional très faible, compris entre 1,5 et 2,4 vers le NO. Des corrélations régionales entre puits, utilisant les carottes, logs, sismique et données du laboratoire souterrain, ont permis d'établir un modèle litho-stratigraphique et pétro-physique fin en 3D (modèle construit avec l'outil Gocad), qui pourra être constamment réactualisé en fonction des nouvelles données disponibles dans le futur. Deux niveaux repères un peu plus riches en carbonates (identifiés comme RSO et RIO, pour repère "oolithique" supérieur et repère "oolithique" inférieur) permettent ainsi de différencier 3 ensembles, avec, de bas en haut :

- ❖ une première unité argileuse à la base du Cox (UA1) ;
- ❖ le niveau repère inférieur (RIO) ;
- ❖ un ensemble de 4 unités différenciables par leur contenu minéralogique, comprenant de bas en haut les unités argileuses UA2 et UA3, une unité de transition UT, et la première unité silto-carbonatée USC1 ;
- ❖ le niveau repère supérieur (RSO) ;
- ❖ une seconde unité silto-carbonatée USC2.

19

Du point de vue minéralogique, l'argilosité maximale (IMA, intervalle maximum d'argilosité, avec 60 % d'argiles) est observée au niveau UA2. Dans les autres niveaux, la teneur en argiles varie de 40 à 50 %, celle en quartz restant comprise entre 20 et 30 % (allant jusqu'à 50 % dans les niveaux silteux supérieurs), tandis que la teneur en carbonates y est comprise entre 20 et 30 % (et exceptionnellement entre 60 et 80 % dans les niveaux carbonatés supérieurs).

La très faible variabilité des propriétés pétrophysiques est désormais bien comprise sur une colonne verticale de Callovo-oxfordien ; ces propriétés sont extrapolables en différents points de la couche à partir des données des puits réels. La variabilité horizontale de ces propriétés peut être anticipée en fonction des modèles paléo-géographiques régionaux et d'environnements de dépôt. La porosité moyenne est comprise entre 0,10 et 0,14 dans l'unité de transition UT, entre 0,10 et 0,15 dans le niveau repère RIO, et varie entre 0,15 et 0,20 dans l'IMA. Les perméabilités restent très faibles sur l'ensemble du Cox, avec des valeurs comprises entre 10^{-12} et 10^{-14} m/s ; elles montrent de faibles rapports d'anisotropie, de l'ordre de 2 à 5, entre perméabilités horizontales et verticales.

L'Andra dispose à présent d'un modèle géologique conceptuel justifiant la transposition à la Zira des données élaborées à partir des informations acquises dans le laboratoire souterrain.

7.3. CONNAISSANCES SUR L'HYDROGÉOLOGIE RÉGIONALE ET LOCALE

A l'échelle régionale, les argiles du Cox sont encadrées par les formations carbonatées du Bathonien et celles de l'Oxfordien-Kimméridgien-Tithonien, qui constituent des niveaux à plus fortes porosités et perméabilités, et sont donc susceptibles de constituer des drains horizontaux pour les fluides.

En bordure de la zone de transposition, à l'extérieur de la Zira, un ensemble d'accidents structuraux (failles sub-verticales traversant l'ensemble de la série mésozoïque) a été reconnu et carté grâce aux diverses campagnes géophysiques successives. Il s'agit des failles de la Marne et de Joinville à l'ouest, d'une zone de fracturation diffuse, de la faille de Poissons et du fossé de Brouthière au sud, et du fossé de Gondrecourt à l'est. Vers le nord, la zone de transposition est bordée par le synclinal est-ouest de Savonnières, qui s'accompagne également d'une variation latérale de faciès du Cox qui devient moins argileux.

Les rejets verticaux de ces différents accidents bordant la zone de transposition, et qui sont d'ailleurs intervenus dans la définition de cette zone, sont inférieurs à 100 m (avec par exemple 10 à 60 m de rejet vertical sur la faille de Gondrecourt), et semblent, de ce fait, insuffisants pour perturber la continuité hydrogéologique des aquifères encadrant le Cox. Ces accidents peuvent toutefois constituer des passages privilégiés pour les circulations de fluides verticales entre les aquifères influençant ainsi directement les conditions aux limites hydrogéologiques de la zone de transposition. Ceci justifie l'effort important réalisé par l'Andra depuis de nombreuses années pour acquérir, à l'échelle du secteur sur la zone de transposition, les données suivantes :

20

- ❖ caractérisation des aquitards et des aquifères. Les cartes de porosité du Dogger et de l'Oxfordien montrent de fortes variabilités latérales dans les lithologies et les propriétés pétro-physiques de la plateforme carbonatée, en liaison avec la paléogéographie et les milieux de dépôts ;
- ❖ caractérisation des structures (géométrie des failles, mesure des contraintes actuelles) ;
- ❖ échantillonnages et analyses des fluides, notamment leur salinité, compositions isotopiques et teneurs en divers traceurs naturels comme les gaz rares.

A l'échelle du secteur, les écoulements d'eaux souterraines d'origine météorique sont contraints par les niveaux carbonatés du Jurassique supérieur situés au-dessus du Cox, avec une zone de recharge au sud. Vers le nord-ouest, une mince couverture argileuse crétacée a été préservée de l'érosion, sa distribution étant directement contrôlée par le réseau hydrographique. Un karst dont l'impact hydrologique est surtout sensible dans les calcaires du Barrois, s'est aussi localement développé dans les carbonates de l'Oxfordien, tandis qu'une fracturation diffuse affecte les calcaires sub-lithographiques proches de la surface, sans doute en liaison avec les épisodes glaciaires.

A l'échelle locale, sur l'emprise de la Zira ou dans son voisinage immédiat, les 19 forages destinés aux corrections statiques de la campagne de sismique 3D de 2010 ont été mis à profit pour acquérir une information complémentaire sur la structure et l'hydrogéologie des calcaires du Barrois qui constituent la formation aquifère affleurante. Trois forages de 50 à 60 m ont permis de carotter la série complète de ces calcaires présents sur la Zira, tandis que les 16 autres forages réalisés en destructif ont fait l'objet de mesures sur des logs et cuttings.

Un programme de suivi piézométrique et du débit des sources a été mis en place. Ce point est important pour caractériser l'état initial et apprécier, éventuellement minimiser, l'impact futur des travaux souterrains, en particulier la descenderie qui traversera les calcaires du Barrois. En effet, bien que ces calcaires ne constituent pas une ressource en eau locale sollicitée de manière importante, l'assèchement de puits fermiers ou de sources constituent toujours un impact dont la portée psychologique ne peut être négligée.

L'Andra dispose à présent de données hydrogéologiques essentiellement d'origine bibliographique à l'échelle régionale de l'ensemble du bassin parisien et de données issues de ses propres travaux de reconnaissance à l'échelle du secteur incluant la zone de transposition, aptes à contraindre un modèle hydrogéologique numérique de simulation des écoulements souterrains dans l'environnement proche et lointain du stockage.

7.4. SITUATION DE LA MODÉLISATION HYDROGÉOLOGIQUE

Différents outils de modélisation numérique ont déjà été mis en œuvre à l'échelle régionale pour simuler l'écoulement des fluides dans les couches géologiques du Bassin de Paris, à partir d'un bloc géologique 3D bien documenté permettant de décrire l'architecture des failles et des strates calée sur les données sismiques et de forages. Cette architecture est décrite au moyen de codes de calcul mis au point à l'Institut Français du Pétrole, Dionisos pour le modèle litho-stratigraphique et Fraca pour les réseaux de failles.

La modélisation hydrogéologique a été reprise en 2008 par l'Université de Neuchâtel qui a entrepris, avec ses propres outils de simulation, la construction d'un modèle unique rassemblant la problématique régionale et la problématique de secteur. Les travaux sont toujours en cours de développement et aucune avancée significative n'a été présentée à la Commission en 2010.

La Commission considère qu'un effort doit être fourni pour faire aboutir au mieux et rapidement la modélisation hydrogéologique régionale et de secteur. Un tel outil de modélisation est en effet nécessaire pour préciser définitivement le rôle hydraulique des failles bordières de la zone de transposition qui pourraient jouer un rôle sur la définition et le comportement des exutoires de radionucléides susceptibles de diffuser, à très long terme, depuis le stockage vers les aquifères encaissants. L'outil de modélisation sera également incontournable pour prédire puis contrôler l'impact hydrodynamique du creusement des puits d'accès au stockage et de la descenderie. La Commission souhaite que lui soit présentées, le moment venu, dans le détail, les hypothèses et les conclusions de la modélisation hydrogéologique.

Annexe 8

THERMIQUE DU STOCKAGE

La Commission avait demandé à l'Andra de réaliser un bilan des effets à grande échelle de la charge thermique du stockage profond.

8.1. CRITÈRES THERMIQUES

Les déchets stockés dégagent de la chaleur. La puissance thermique est élevée pour les déchets HAVL de type C1/C5/C6, plus faible pour les C0, réduite en général pour les déchets MAVL. La puissance dégagée décroît au cours du temps. Pour les déchets de type C1, cette décroissance (division par 2 en 30 ans) est d'abord due à la désintégration radioactive du césium et du strontium. Après un siècle, la décroissance est plus lente et pilotée par l'américium (^{241}Am).

La température naturelle à la profondeur du stockage est de l'ordre de 25 °C. Le dégagement de chaleur fait croître la température des colis, des conteneurs, des revêtements des galeries, de l'air de ventilation et du massif rocheux.

Les critères retenus par l'Andra concernent d'abord les températures maximales atteintes en chaque point dans les différentes parties du stockage pendant son exploitation. Ils concernent le matériel et le personnel (air de ventilation : température caractéristique inférieure à 26 °C, parois chaudes accessibles : 60 °C, matériel électronique : 50 °C) et les matériaux du stockage (béton : 70 °C, enrobés bitumineux : 30 °C, hors scénario d'incendie ; cœur des verres : 450 °C).

Du point de vue de la sûreté post-fermeture, le critère le plus contraignant concerne les déchets vitrifiés. La dissolution du verre est nettement plus rapide au-dessus de 50 °C. Il faut donc que la température à la paroi des alvéoles HAVL soit certainement inférieure à 50 °C au moment où l'eau peut entrer en contact avec le verre. Le surconteneur en acier (5,5 cm d'épaisseur) est dimensionné pour que la corrosion ne puisse en principe le traverser et mettre le colis en contact avec l'eau avant au moins 1 000 ans. On peut par le calcul remonter à la température maximale qu'il faut respecter à plus court terme pour que la température soit inférieure à 50 °C après 1 000 ans : elle est de 90 °C à la paroi des alvéoles HAVL. Les résultats du calcul dépendent de paramètres qu'on ne peut modifier (conductivité et diffusivité thermiques des matériaux, dont celles de l'argilite qui sont nettement anisotropes), et d'autres sur lesquels on peut jouer (densité du stockage et durée de refroidissement en entreposage à la surface avant stockage au fond).

La valeur de 90 °C n'est pas déraisonnable au vu des choix faits par d'autres pays. Il faudra vérifier toutefois si la présence dans les jeux des alvéoles d'un volume de liquide et de gaz à cette température et à une pression de 5 MPa ou plus, n'entraîne pas de risques de circulation vers les galeries ; elle appellera des précautions particulières en cas de retrait.

8.1.1. Caractéristiques thermiques naturelles de la couche

L'Andra a reconnu les caractéristiques thermiques de la couche de Cox et des niveaux qui l'encadrent, notamment à l'occasion du forage profond au Trias. Le flux géothermique (60 mW/m^2) est normal et détermine un gradient géothermique qui varie avec la conductivité thermique des formations, Dogger, Callovo-Oxfordien, Oxfordien carbonaté et Kimméridgien. La température varie de $22 \text{ }^\circ\text{C}$ à $27 \text{ }^\circ\text{C}$ du haut en bas de la couche du Cox.

En s'appuyant sur les profils de température mesurés en sondage, les essais en laboratoire de surface et les essais "thermiques" dits TER et TED menés dans le laboratoire souterrain, l'Andra découpe la couche du Cox en une sous-unité "1" inférieure, plus argileuse, qui contiendrait le niveau d'un futur stockage, et dont la conductivité est nettement anisotrope mais constante à l'échelle de la Zira ; et une sous-unité "2" supérieure, dont la conductivité est plus variable avec la minéralogie, proche de celle de la sous-unité 1 au niveau du laboratoire, plus élevée et moins anisotrope quand on s'en éloigne dans la direction du nord-ouest.

Globalement, la conductivité thermique de la couche du Cox peut être considérée comme relativement homogène à l'échelle de la Zira, nettement anisotrope et plus faible que celle de beaucoup d'autres roches, ce qui retarde relativement la dissipation de la chaleur.

8.1.2. Effets thermiques

A grande échelle, l'évolution des températures dans la couche au cours du temps est relativement simple, les contrastes de température entre les diverses zones du stockage provenant surtout de la nature des déchets stockés ; une modélisation par des sources rectangulaires planes fournit les ordres de grandeur principaux : les temps caractéristiques varient comme le carré des longueurs, $t^2 \approx kt$, où la diffusivité thermique k est de l'ordre de $30 \text{ m}^2/\text{an}$ (en 30 ans les effets de l'échauffement sont sensibles à 30 m). Les effets de bord aux limites du stockage sont limités ; quand on s'écarte des sources, c'est-à-dire des colis, ou qu'on considère des temps un peu longs par rapport à un siècle, l'historique du dépôt des colis n'a plus guère d'influence. Du point de vue des critères de températures maximales importants pour la sûreté, l'incertitude sur les températures réellement atteintes devraient, au moins à grande échelle, être faible. Pour l'instant, l'Andra présente des estimations de la conductivité thermique avec des écarts de $\pm 10 \%$ environ, suivant la nature des essais qui ont permis de les établir. Ce n'est pas beaucoup, mais cette incertitude se reporte sur les valeurs des accroissements de température calculés que l'on doit comparer aux critères de température maximale. Il est raisonnable d'espérer que cette incertitude se réduira quand on disposera de mesures plus longues, intéressant donc aussi de plus grands volumes.

L'Andra a effectué de nombreuses simulations thermiques tri-dimensionnelles. Les simulations à l'échelle locale, par exemple celle de l'alvéole HAVL, qui impliquent des formes d'échange de chaleur plus complexes, n'ont pas été abordées en audition cette année. Les simulations plus globales, dans l'hypothèse justifiée de la conduction pure, montrent l'indépendance des zones MAVL (2 % de la chaleur dégagée), de la zone HA-C0 (1 %) et de la zone HA C1/C5/C6 (61 % pour les C1/C5 stockés à 60 ans, 36 % pour les C6 stockés à 70 ans). On retrouve l'empreinte de ces zones sur les cartes de températures horizontales jusqu'au toit du Cox. Le retour à l'équilibre est assez lent. On a moins de $5 \text{ }^\circ\text{C}$ d'écart à la température naturelle après 10 000 ans au centre de la zone HA C1/C5/C6 ; le flux géothermique y est multiplié par un facteur 5 à 6 après 300 ans

à la limite du Cox où la température augmente de 20 °C après 1 000 ans. L'accroissement est moindre et plus tardif à la limite Oxfordien-Kimméridgien.

L'Andra n'a pas spécifiquement étudié les modifications de température engendrées à la surface du sol par l'existence du stockage ; c'est une question parfois posée par le public, difficile en raison de la variété des formes d'échange de chaleur (convection, rayonnement, évapotranspiration...) dont cette surface est le siège. Dans les calculs de l'Andra, le gradient géothermique pourrait doubler après 1 000 ans à la surface au droit du stockage ; suivant toute vraisemblance, l'accroissement de la température devrait toutefois rester très modéré en comparaison des effets des autres facteurs naturels qui pourraient l'affecter.

8.1.3. Effets thermo-hydrauliques

Les gradients thermiques et la perméabilité sont trop petits pour qu'une circulation thermo-convective (l'eau des pores au voisinage du stockage, chauffée donc plus légère, remonte vers le toit de la couche) puisse se mettre en place dans la formation, comme l'établissait déjà le Dossier 2005.

8.1.4. Effets poro-mécaniques

Le fait le plus remarquable est sans doute l'apparition de surpressions dans l'eau interstitielle des argilites. Elles affectent l'ensemble de la couche du Callovo-Oxfordien. Elles sont engendrées par la dilatation thermique de l'eau contenue dans les pores. Elles peuvent atteindre quelques MPa et se dissipent lentement en raison de la faible perméabilité du milieu (les diffusivités thermique et hydraulique sont dans un rapport de 100 environ, la chaleur se propage plus vite que la surpression ne se dissipe). Les essais dans le laboratoire souterrain ont confirmé, à plus petite échelle, l'existence de ce phénomène.

8.1.5. Effets thermo-mécaniques

L'Andra a estimé les contraintes mécaniques qui apparaissent dans la couche du Cox au moyen d'un calcul numérique effectué dans l'hypothèse d'un comportement élastique du milieu. L'ordre de grandeur des accroissements de contrainte moyenne et de contrainte déviatorique (celle-ci mesure l'intensité des cisaillements) est de quelques MPa. La comparaison des résultats du calcul avec un critère de rupture à court terme laisse une marge appréciable vis-à-vis du risque de rupture. Toutefois ce calcul est préliminaire à plusieurs égards (on ne distingue pas bien si on raisonne en contraintes effectives ou en contraintes totales, ni si le comportement viscoplastique, éventuellement influencé par la température, peut jouer un rôle. Par ailleurs, après un siècle, une part significative de la chaleur des déchets est déjà produite ; des contraintes additionnelles de quelques MPa sont engendrées, équivalant très grossièrement à un approfondissement de l'ouvrage de une ou deux centaines de mètres ; il faudrait s'assurer des conséquences possibles des sur-contraintes engendrées pour les parties encore en exploitation). En revanche l'endommagement d'origine thermique (lié à la dilatation thermique différentielle des grains qui composent l'argillite) paraît modéré et limité au plus à une zone peu épaisse au voisinage immédiat des ouvrages.

On observe que la couche du Callovo-Oxfordien est ainsi le siège de plusieurs perturbations – température, pression de l'eau interstitielle, contraintes mécaniques, diffusion-advection de l'hydrogène. Ces perturbations ne sont pas très intenses mais leur association est assez inhabituelle dans les ouvrages souterrains pour lesquels on dispose d'un retour d'expérience.

La Commission estime que des recherches plus approfondies devraient être conduites sur ce sujet et souhaite que les résultats lui en soient présentés.

8.2. EXPÉRIMENTATIONS THERMIQUES

L'Andra a conduit ou envisage de conduire plusieurs essais thermiques dans le laboratoire souterrain afin de confirmer les valeurs de paramètres thermiques mesurées au laboratoire, de mettre en évidence et d'analyser les phénomènes hydrauliques et thermiques qui sont associés aux accroissements de température dans le massif, et de préparer un essai de démonstration de concept pour les alvéoles HAVL les plus exothermiques.

Ces expérimentations complètent celles conduites dans des laboratoires de surface par le Groupement de laboratoires géomécaniques et les modélisations correspondantes. De ce point de vue il est suggéré de vérifier si les méthodes mises au point pour décrire le comportement micro-mécanique ne peuvent être adaptées pour rendre compte des propriétés thermiques, de leur anisotropie et des liaisons entre leur hétérogénéité et la minéralogie des argilites.

8.2.1. Essai TER

Cet essai, achevé en 2009, avait commencé en 2005 ; il visait à la détermination en place des propriétés thermiques de l'argilite. Une sonde chauffante était placée entre 6 et 9 mètres de profondeur depuis la paroi d'une galerie et des forages périphériques permettaient de mesurer la température, la pression interstitielle et les déplacements radiaux à différentes distances de l'axe de la sonde. La valeur trouvée de la conductivité thermique est conforme à ce qui était attendu, l'anisotropie est plus difficile à quantifier en raison d'incertitudes sur la position exacte des capteurs, difficulté classique en mesure des propriétés thermiques. L'accord avec les prévisions est bon pour les températures, convenable pour les pressions interstitielles, passable pour les déplacements, là aussi comme il est fréquemment observé dans ce type d'essais.

8.2.2. Essai TED

Les leçons tirées de l'essai TER, notamment pour le placement des capteurs, ont été mises à profit pour concevoir et dimensionner l'essai TED, mis en place en 2009. Il est plus complexe car il comporte trois sondes chauffantes parallèles distantes de 2,6 m placées entre 12 et 16 m de la paroi de la galerie d'accès, pour s'affranchir des effets des fluctuations de température dans cette dernière. Il comporte un assez grand nombre de forages périphériques (22 au total) pour la mesure des températures, pressions interstitielles et déplacements. La chauffe a commencé en janvier 2010. L'objectif est, d'une part, de vérifier l'impact de la superposition de champs thermiques – qui ne devrait en principe pas révéler de surprise, les équations qui décrivent le comportement thermique étant linéaires – et, d'autre part, d'analyser l'endommagement induit par

la chauffe. Les interprétations seront vraisemblablement délicates. La température présente un effet de chargement, par l'intermédiaire de la dilatation de l'eau, de celle de la roche et de leur contraste qui induit un accroissement de pression interstitielle ; elle donne lieu aussi à un effet de modification des paramètres du comportement thermique et mécanique, conductivité, propriétés élastiques, critère plastique, vitesse de déformation viscoplastique, endommagement. Ces effets sont certainement plus ou moins couplés.

Les premiers résultats de l'essai TED confirment l'apparition de pressions interstitielles significatives et permettent de mieux préciser les valeurs des paramètres thermiques.

La Commission souhaiterait être assurée que les essais en place, aux cours desquels tous ces effets s'exercent simultanément, sont étroitement associés aux efforts d'expérimentation en laboratoire de surface, qui peuvent être conduits dans des conditions plus simples, et de modélisation, qui permettent de tirer tout le profit souhaitable des expérimentations en place.

8.2.3. Essais en forage

Des expérimentations complémentaires sont conduites, à partir du début de 2011, d'une part en forage tubé pour mesurer les déformations du tube métallique et obtenir ainsi une première image, à échelle réduite, des phénomènes susceptibles d'affecter l'interface chemisage-roche dans un alvéole HAVL ; d'autre part dans le cas d'un forage non tubé, pour analyser notamment l'impact d'une chauffe rapide sur la paroi. Ces essais doivent préparer un essai en vraie grandeur réalisé à partir de 2012.

27

8.3. THERMIQUE ET TRANSMUTATION

Un souci de la Commission était d'apprécier les avantages qu'apporterait la transmutation des actinides mineurs du point de vue de la charge thermique, en prenant comme exemple un stockage dans la couche du Callovo-Oxfordien. Il faut rappeler que la transmutation ne pourrait s'appliquer qu'aux déchets produits, au-delà de 2040, par une éventuelle nouvelle génération de réacteurs.

La transmutation des actinides mineurs, notamment celle de l'américium, réduirait significativement la charge thermique qui est plus élevée dans les colis de déchets des réacteurs de 4^{ème} génération que dans les colis de déchets actuels. Le CEA estime que, la décroissance de la production de chaleur par l'américium étant lente (en comparaison des cas du strontium et du césium, qui contribuent fortement à l'échauffement initial), cette diminution de la charge thermique serait difficilement réalisable par d'autres moyens que la transmutation – par exemple, l'allongement de la durée d'entreposage en surface avant le dépôt des déchets dans le stockage serait peu efficace.

C'est diminution de la charge thermique est un atout appréciable. De l'analyse de l'Andra on retient que la température atteinte après 1 000 ans est le paramètre le plus important du point de vue de la sûreté et que cette température est directement proportionnelle à l'énergie thermique déjà produite divisée par la surface de la zone de stockage considérée.

Au plan de la charge thermique, l'avantage de la mise en œuvre de la transmutation de l'américium est donc essentiellement, dans l'analyse de l'Andra, de réduire l'emprise du stockage, avec plusieurs avantages : la probabilité d'intrusion involontaire serait diminuée, et la distance à des accidents géologiques tels que des failles serait augmentée. On évoque aussi, dans un autre registre, la notion de "préservation d'une ressource rare" : la transmutation permettrait de stocker sensiblement plus de déchets et donc de mieux tirer profit d'une zone favorable reconnue. Il est difficile toutefois, s'agissant de décisions qui ne seront prises que dans quelques dizaines d'années dans un environnement technique, économique et sociétal sans doute bien distinct de celui d'aujourd'hui, d'attribuer une valeur précise à cette notion.

La réduction de la charge thermique, sans pour autant pouvoir justifier à elle seule la mise en œuvre de la transmutation, apparaît comme un avantage réel de cette dernière.

8.4. CONCLUSION

La Commission souhaitait mieux apprécier l'état des recherches en matière de charge thermique, notamment parce que celle-ci entretient des relations étroites avec d'autres questions : étendue horizontale du stockage, avantages de la transmutation, choix de la durée de refroidissement avant stockage. Même s'il subsiste quelques incertitudes, l'acquisition des paramètres nécessaires aux calculs thermiques est en bonne voie. L'analyse des effets thermomécaniques devrait faire l'objet de nouveaux efforts, suggérés plus haut. Le critère de 90°C au maximum à la paroi des alvéoles joue un rôle important dans le dimensionnement du stockage par l'Andra ; il apparaît raisonnable au vu des choix faits dans d'autres pays. C'est la réduction de l'emprise du stockage qui apparaît comme l'avantage le plus substantiel qu'apporterait une réduction de la charge thermique.

Les progrès des connaissances passeront par des essais en vraie grandeur réalisés dans le laboratoire.

Annexe 9

GÉOMECHANIQUE

Dans cette annexe sont examinées les recherches conduites par l'Andra dans le domaine de la géomécanique.

9.1. EDZ

9.1.1. Zone endommagée (EDZ), enjeu de sûreté

Deux notions d'endommagement coexistent dans les documents de l'Andra. La plus classique désigne un modèle particulier de description du comportement inélastique des matériaux, roche ou métal. La seconde, propre au stockage géologique, désigne l'ensemble des évolutions irréversibles de la roche qui sont importantes du point de vue de la sûreté et notamment les évolutions mécaniques irréversibles qui entraînent des modifications de la perméabilité.

L'argilite du Callovo-Oxfordien, dans laquelle on envisage de réaliser le stockage géologique, est très peu perméable dans son état naturel. C'est un avantage considérable du point de vue de la sûreté à long terme. Toutefois le creusement des galeries, puis la longue période pendant laquelle elles restent ouvertes, peuvent créer puis permettre le développement d'une zone endommagée (EDZ, ou Excavated Damaged Zone) dans laquelle les propriétés naturelles de la roche peuvent être profondément dégradées. Cette zone n'est en général pas critique du point de vue de la stabilité de l'ouvrage, de sorte qu'une grande attention ne lui pas été portée dans les ouvrages classiques de génie civil ou minier (hormis peut-être pour les scellements réalisés dans les mines de sel). En revanche, du point de vue de la sûreté à long terme d'un stockage géologique, cette zone est le siège d'une fracturation ou d'une fissuration qui peuvent en augmenter très sensiblement la conductivité hydraulique, avec le risque de former à la paroi des galeries un anneau de roche beaucoup plus perméable. Celui-ci constituerait, le long du réseau de galeries et jusqu'aux puits verticaux et descendrie d'accès, un court-circuit de la barrière géologique. Ce court-circuit permettrait une circulation plus rapide des gaz, de l'eau, et des radionucléides que l'eau peut entraîner dans son mouvement.

9.1.2. Facteurs influençant le développement de l'EDZ

De nombreux facteurs, naturels ou techniques, peuvent influencer l'étendue et l'intensité de l'endommagement :

- ❖ l'argilosité du niveau de creusement (l'EDZ est réduite dans le niveau plus carbonaté de la niche) ;
- ❖ la profondeur des galeries (peu variable dans le laboratoire, nettement plus dans le projet de stockage géologique) ;

- ❖ la taille des galeries (l'Andra a réalisé des galeries en diamètre 5 m, de nombreux forages de petit diamètre, des alvéoles de diamètre 70 cm ; mais les alvéoles MAVL pourraient atteindre 8 à 9 mètres, moins que prévu dans le Dossier 2005 ; ce diamètre pourrait être encore supérieur en tête d'alvéole si on retenait l'option du pré-empilage avec pont roulant des colis en béton) ;
- ❖ l'orientation de la galerie par rapport aux deux contraintes principales horizontales (il est bien établi qu'elles ont des valeurs assez distinctes, et il est *a priori* plus favorable que l'axe de la galerie coïncide avec la direction de la plus grande contrainte horizontale) ;
- ❖ la configuration des galeries (les intersections de galeries sont plus critiques, et sans doute aussi la superposition de deux galeries, que l'Andra prévoit en une dizaine de points dans son projet de stockage géologique, pour séparer nettement le circuit de transport des colis du circuit des travaux de creusement) ;
- ❖ la méthode de creusement et de soutènement (l'Andra a déjà mis en œuvre la foration-tir, le brise-roche hydraulique, le micro-tunnelier pour les alvéoles HAVL et la machine à attaque ponctuelle, qui est à l'heure actuelle la méthode de référence. L'Andra a envisagé de tester le tunnelier avec pose de voussoirs en béton derrière le front et un essai dans ce sens est en préparation).

Un dernier facteur est l'influence du temps. Une première EDZ est immédiatement créée par le creusement de la galerie. Mais, ultérieurement, cette EDZ peut évoluer sous l'effet de phénomènes mécaniques (poursuite de la déformation, entre autres sous l'effet du fluage du massif), hydriques (désaturation provoquée par l'état d'humidité de l'air de ventilation), hydrauliques (mouvement de l'eau du massif vers les galeries), thermiques (refroidissement par l'air de ventilation, puis échauffement par les déchets exothermiques) et chimiques (oxydation et gonflement des pyrites contenus dans l'argilite). A l'inverse, lorsque les galeries sont fermées, que la ventilation cesse, que le mouvement des terrains vers le remblai rétablit lentement un état de contrainte plus proche de l'état naturel et que l'eau du massif resature la zone endommagée, une cicatrisation, ou "auto-colmatage", peut avoir lieu, par exemple par augmentation de volume des fractions argileuses gonflantes.

9.1.3. Caractérisation de l'EDZ dans le laboratoire souterrain

L'Andra a conduit une caractérisation approfondie de l'EDZ. Celle-ci a bénéficié d'échanges soutenus avec les deux autres laboratoires souterrains creusés dans l'argile, à Mol en Belgique et au Mont-Terri en Suisse. Ces échanges ont permis le développement de techniques originales, le partage du retour d'expériences, la mutualisation des progrès et des comparaisons fructueuses qui ont donné lieu à des publications scientifiques communes. La caractérisation comporte l'analyse structurale, souvent quantifiée, de l'état des parements et du front des galeries, l'examen de carottes, dans certains cas après injection de résine, des mesures de perméabilité à l'eau et au gaz, répétées à plusieurs reprises pour détecter les évolutions possibles.

La Commission juge remarquable cet effort de caractérisation.

9.1.4. Typologie de la fracturation

L'analyse de l'EDZ a d'abord bénéficié des mesures (pression de pore, déplacements, vitesse du son, perméabilité) effectuées dans le puits, au-dessus du laboratoire souterrain (expérimentation REP) ; puis des expérimentations SUG suivi de OHZ dans les galeries du laboratoire, au cours desquelles l'influence de l'orientation des galeries et de leur méthode de creusement ont pu être étudiées.

Ces mesures ont montré la présence au voisinage des parois de fractures dites en cisaillement, fractures "en chevron" (jamais décrites précédemment semble-t-il, également observées dans le laboratoire de Mol, caractéristiques des niveaux les plus argileux ; de longueur métrique, elles se forment très tôt, en avant du front) ; de fractures obliques subverticales (de formation postérieure, elles se développent jusqu'à buter sur les fractures en chevron) ; et enfin de fractures "en extension" (extension limitée au voisinage immédiat de la paroi). Le calcul met bien en évidence des zones de cisaillements importants qui pourraient expliquer la formation des chevrons, mais leur périodicité et le mécanisme de leur développement restent mal compris. On peut ainsi distinguer depuis la paroi une zone contenant un réseau plus ou moins bien connecté de fractures, de perméabilité supérieure à 10^{-17} m² (donc beaucoup plus perméable que la roche saine, dont la perméabilité peut être aussi basse que 10^{-21} m²), une zone intermédiaire avec des fractures en cisaillement, mal connectées (la pression interstitielle peut y être non nulle), où l'augmentation de perméabilité est moins spectaculaire, enfin à plus grande distance une zone faiblement fissurée mais qui reste plus perméable que la zone saine.

L'étendue de ces zones dépend fortement de l'orientation de l'axe des galeries. Lorsque l'axe est aligné avec la contrainte principale mineure, les mesures effectuées dans les galeries GRM, GED et GAN montrent une faible influence de la méthode de creusement et de soutènement, une épaisseur de la zone fracturée de l'ordre de 20 % du rayon au parement, mais de deux rayons au radier ; cette zone est marquée par une forte perméabilité dans la zone où les fractures sont connectées. Lorsque l'axe est dans la direction perpendiculaire, les observations sont similaires mais les épaisseurs des zones fracturées au parement et dans la direction verticale sont inversées. Sur la période d'observation, de quelques années ou moins, l'EDZ ne semble pas s'étendre au cours du temps.

De façon générale, ces données établissent que, même si elles n'atteignent pas des proportions inquiétantes, l'extension et l'intensité de l'EDZ sont plus importantes que ne le laissait attendre le pronostic fait en 2005 par l'Andra. Ces nouvelles données devront être prises en compte dans les calculs de sûreté ; ils attirent l'attention sur l'importance des scellements destinés à interrompre la continuité de l'EDZ.

9.1.5. EDZ et méthodes de creusement et de soutènement : expérimentations GCS et GCR, expérimentations GRD et GVA

▪ EDZ et soutènement

La formation de l'EDZ est influencée par la méthode de creusement et de revêtement des galeries.

Un premier choix est de poser très vite, immédiatement en arrière du front, un soutènement rigide. Il bloque les déplacements des parois et limite la formation et l'évolution ultérieure de

l'EDZ. Mais il présente l'inconvénient de faire porter très tôt par le revêtement une fraction importante du poids des terrains surincombants. Le revêtement doit être plus raide et plus résistant, donc en général plus épais. Le choix opposé est de laisser venir les terrains en posant un revêtement provisoire léger, et de ne le compléter que tardivement, par exemple après six mois. L'inconvénient est de favoriser le développement initial de l'EDZ, mais avec l'avantage d'un revêtement de moindre épaisseur car moins sollicité par le poids des terrains surincombants. Des choix intermédiaires sont évidemment possibles.

Les essais en vraie grandeur apportent des éléments de comparaison indispensables ; mais leur interprétation gagne à être accompagnée d'une modélisation des comportements à court et à long terme du massif et du revêtement.

L'Andra dispose en principe d'un modèle de comportement à *court terme* du massif argileux mais il semble qu'il ne soit pas systématiquement utilisé pour la conception du revêtement. Pour certains essais, on lui préfère la méthode convergence-confinement.

Les galeries devant rester ouvertes pendant un siècle environ, le choix de la meilleure méthode doit aussi être inspiré par l'estimation de l'ampleur et de la vitesse *des mouvements à long terme*. Si on peut attendre des mouvements importants, l'avantage initial présenté par le revêtement souple serait à terme effacé, puisque la totalité du poids des terrains finirait par s'appliquer, ses effets ayant seulement été différés par la pose du revêtement souple. Les vitesses de déformation observées dans les galeries déjà creusées donnent des indications à ce sujet. Des vitesses de l'ordre de 10^{-11} par seconde (3 % par siècle) ont été observées, mais aussi des vitesses de 10^{-10} par seconde (30 % par siècle). L'ampleur des mouvements différés pourrait donc être importante. Comme l'a déjà fait remarquer la Commission, une appréciation mieux établie de l'ampleur des mouvements différés à l'échelle du siècle serait précieuse pour la conception des galeries, le dimensionnement du chemisage métallique des alvéoles HAVL ou du soutènement en béton des alvéoles MAVL. On disposera évidemment dans une dizaine d'années de données empiriques sur une période qui autorisera des extrapolations plus légitimes qu'aujourd'hui, mais il serait préférable qu'elles soient confortées par une approche basée sur une modélisation du comportement.

▪ **Expérimentations GCS et GCR**

Les expérimentations GCS (Galerie de Conception Souple) et GCR (Galerie de conception rigide) ont pour objectif la comparaison de deux méthodes de soutènement du point de vue de la formation et de l'évolution de l'EDZ et de son influence sur le comportement hydromécanique. Elles visent aussi, à plus long terme, à caractériser le comportement différé du massif en interaction avec le soutènement.

Ces expérimentations concernent deux galeries de section circulaire réalisées à la machine à attaque ponctuelle (méthode de référence pour l'Andra). Leur axe est suivant la direction de la contrainte horizontale la plus forte (la configuration *a priori* la plus favorable), comme pour les galeries GET, GCS et GAT antérieurement creusées. Il s'agit de "mine-by-tests", c'est-à-dire d'expérimentations qui utilisent la réponse de capteurs placés dans le massif, depuis des galeries adjacentes, avant le creusement de la galerie. Les données ainsi acquises complètent utilement les résultats de mesures plus classiques que l'on peut effectuer depuis la galerie creusée, mesures qui présentent l'inconvénient de ne fournir que des informations postérieures à l'arrivée du front dans la zone que l'on veut observer.

Pour ces essais le revêtement est composé, au lieu des cintres utilisés pour les galeries creusées antérieurement, de rangées de cales en béton noyées dans un béton projeté de 18 cm d'épaisseur mis en place à l'avancement. Il est complété, pour la galerie GCR, par un revêtement rigide en béton B40.

La réalisation de la galerie GCR a commencé en janvier 2011 et s'achèvera en janvier 2012 ; une comparaison avec GCS, déjà achevée, sera alors possible. La galerie GCS, de 63 m de long, a été creusée au cours de l'année 2010 avec une instrumentation abondante, à la fois pour le mine-by-test proprement dit et pour les mesures effectuées derrière le front. La fracturation observée est comparable à celle des galeries cintrées. Les convergences (déformation radiale de la galerie) sont deux fois plus grandes dans la direction horizontale que dans la direction verticale. Les vitesses de convergence décroissent sensiblement après trois mois.

Les mesures de déplacement sont interprétées au moyen de la méthode convergence-confinement, dont l'emploi est classique dans les tunnels. Cette méthode consiste à substituer au vrai problème mécanique, qui est bi-dimensionnel en raison de la présence du front, le problème plus simple uni-dimensionnel d'une galerie cylindrique infinie dans laquelle l'influence, sur une section fixe de galerie, du front qui s'éloigne au fur et à mesure du creusement est rendu par l'application croissante du poids des terrains sur le soutènement. Mathématiquement, cette application progressive est traduite par l'augmentation de 0 à 1 du "taux de déconfinement". L'Andra estime ce taux à 15 % au passage du front dans la section fixe et à 30 % quand il s'est éloigné de 2 mètres. Il faudrait vérifier que ces estimations sont cohérentes avec l'image que l'on se fait d'un développement précoce des fractures en chevron et, idéalement, insérer la notion de taux de déconfinement dans la problématique de l'EDZ. On observe aussi que la réponse mécanique à l'approche du front se fait 10 m en avant de celui-ci, et 20 m pour la réponse hydraulique, avec un accroissement de plusieurs MPa de pression interstitielle. Ces résultats sont qualitativement en accord avec des observations antérieures.

33

Ils conduisent à s'interroger sur l'utilisation de la méthode convergence-confinement : cette méthode simplifiée est classique, mais pourquoi n'utilise-t-on pas aussi le modèle de comportement à court terme de l'Andra, qui permettrait de s'affranchir de certaines simplifications et d'effectuer une analyse hydromécanique complète ? On consoliderait ainsi ce modèle, ce qui apporterait une crédibilité d'ensemble aux prévisions.

▪ **Expérimentations GRD et GVA**

Un essai technologique de creusement au tunnelier avec pose de voussoirs à l'avancement sera conduit à partir de 2012 ; il devrait durer 20 mois au total. Le tunnelier est très utilisé pour le creusement de tunnels. Il permet des cadences industrielles élevées et réduit sensiblement le coût du mètre excavé. La pose de voussoirs préfabriqués immédiatement en arrière du front de taille permet de faire l'économie de la phase de bétonnage et elle a l'avantage d'éliminer le risque de chute de toit. L'option du tunnelier présente certains inconvénients qui expliquent que l'Andra n'en avait pas fait son premier choix. Le tunnelier ne peut tourner qu'avec des rayons de courbure élevés, il offre moins de souplesse pour la forme de la section de la galerie et son diamètre. Le risque de blocage en cas d'arrêt prolongé peut être important.

L'essai contribuera à l'analyse des effets sur la formation de l'EDZ du creusement par tunnelier et du soutènement par voussoir. Toutefois il se place dans un cadre plus général. L'option du tunnelier n'avait pas été écartée par l'Andra mais les propositions de dessin alternatif du stockage par les producteurs, qui privilégie l'utilisation d'un tunnelier, ont donné à un essai de faisabilité une nouvelle urgence. La Commission n'a eu sur ce dessin alternatif que des informations partielles, indirectes et très récentes. Elle n'examine donc l'essai GRD-GVA que pour ses mérites propres.

L'utilisation de voussoirs repose la question des avantages et inconvénients d'une pose précoce du revêtement : l'EDZ est vraisemblablement moindre, mais le revêtement est plus sollicité et il faut le renforcer. On peut de ce point de vue gagner un degré de liberté en plaçant entre voussoirs et terrains un bourrage qui confère au moins initialement une souplesse accrue au revêtement. L'Andra étudie la formule la mieux adaptée pour un tel bourrage. Mais le bourrage risque, si sa perméabilité est élevée, de constituer une sorte de prolongement de l'EDZ. Vis-à-vis du risque de blocage, l'Andra adoptera une conicité diamétrale et des vérins largement dimensionnés pour permettre un retrait si celui-ci s'avère nécessaire.

L'essai comportera le creusement successif de deux galeries perpendiculaires, GRD et GVA, respectivement réalisées dans les deux directions de contraintes horizontales principales. Le diamètre excavé sera de 6 mètres et la longueur du tunnelier 6,5 m. Les objectifs de l'essai sont l'étude de la formation de l'EDZ dans ce contexte nouveau, la comparaison des effets des creusements dans les deux directions horizontales retenues, la vérification de la faisabilité d'une chambre de plus grandes dimensions nécessaire au montage du tunnelier et l'évaluation du risque de coincement. Il pourra se poursuivre par une tentative de dépose de voussoirs, étape préalable à la réalisation d'un scellement lors de la fermeture des galeries.

34

Cet essai ne bénéficiera pas de l'approche progressive qui avait conduit l'Andra à retenir la machine à attaque ponctuelle comme option de référence. Il faut souhaiter que, du point de vue de la faisabilité du creusement au tunnelier, il fournira une conclusion claire, puisqu'il s'achèvera peu de temps avant le dépôt de la demande de DAC. L'utilisation du tunnelier peut conduire à une modification assez radicale de la conception du stockage, qu'il restera peu de temps pour analyser.

9.2. AUTO-COLMATAGE DE L'EDZ, ESSAI CDZ

9.2.1. Autocolmatage

De nombreuses observations suggèrent que la création d'une EDZ pourrait ne pas être un phénomène irréversible.

La simple application d'une pression élevée sur le matériau endommagé referme instantanément, au moins en partie, les fractures et fissures créées. Elle diminue donc la perméabilité que l'endommagement avait augmentée. Mais il ne s'agit pas d'une *cicatrisation* durablement acquise, puisqu'un relâchement de la pression appliquée rétablit pour l'essentiel la perméabilité initiale.

En revanche la resaturation du matériau endommagé désaturé paraît engendrer un gonflement de certaines fractions argileuses (smectites) qui rétablit plus durablement une perméabilité faible ("auto-colmatage"). Or, en raison de la ventilation des galeries par un air assez sec, l'EDZ, perméable, se désature assez rapidement. La fermeture des galeries et l'arrêt de la ventilation

permettront à l'eau du massif de resaturer lentement l'EDZ. De plus, après la fermeture, les parois seront re-comprimées car leur mouvement de convergence vers les galeries sera progressivement empêché par les matériaux laissés dans les ouvrages (soutènement, chemisage, remblais). Après fermeture, la resaturation accompagnée de l'application prolongée d'une pression croissante pourrait donc avoir un effet de cicatrisation.

Il est beaucoup trop tôt pour prendre en compte ce phénomène dans les calculs de sûreté, mais il constitue une marge possible favorable.

9.2.2. Essai CDZ

C'est le but de l'essai CDZ "compression mécanique sur l'EDZ" qui a débuté dans la galerie GET et durera trois ans. Il s'agit de comprimer au moyen d'un vérin un élément de surface d'une galerie d'un mètre carré environ (jusqu'en mai 2011), de le décompresser, de réaliser alors une imbibition, puis de conduire une nouvelle phase de compression. L'essai se termine par une phase de décompression brutale. Cette succession de chargements/déchargements vise à identifier les parts réversible et irréversible acquises au cours de la cicatrisation, en mesurant les modifications de la transmissivité hydraulique. Cet essai est inspiré d'un essai analogue conduit dans le laboratoire du Mont-Terri. La géométrie retenue est évidemment discutable : le vérin agit sur la paroi comme un poinçon ; sous le poinçon, un cône d'argilite est comprimé – c'est la partie dont le comportement donnera sans doute les informations les plus utiles – mais le reste du massif sera le siège d'un état de contraintes complexe, avec le développement de contraintes de cisaillement sans doute importantes, qui ne contribueront pas à une cicatrisation. Mais il faut reconnaître qu'à ce stade il est difficile de réaliser un essai plus proche des conditions réelles.

La Commission approuve la poursuite de recherches sur les phénomènes d'auto-colmatage, dont une bonne compréhension peut fournir une marge supplémentaire du point de vue de l'analyse de sûreté à long terme.

9.3. ESSAIS CONDUITS POUR LES ALVÉOLES HA

Cette question est aussi abordée dans le paragraphe "réversibilité".

9.3.1. Résultats acquis

Depuis la Galerie Recherches et Méthodes (GRM), l'Andra a conduit des essais de creusement d'alvéoles de 40 m de long, 70 cm de diamètre, chemisés par un tube d'acier de diamètre un peu inférieur. Après quelques tentatives qui n'ont pas complètement abouti, comme il est normal à ce stade, l'Andra a réalisé avec succès un tel alvéole, orienté suivant la direction de la contrainte horizontale majeure, direction la plus favorable et celle retenue pour les alvéoles d'un futur stockage. L'observation de sa fermeture progressive est effectuée dans un alvéole de 20 m de long, non chemisé. L'épaisseur de terrains perturbée à la paroi est de l'ordre de 20 à 40 cm.

L'Andra a également réalisé des "maquettes" sous la forme de forages de petit diamètre chemisés par un tube métallique. Le contact terrains-chemisage est acquis très rapidement. Un essai de chauffage a également été effectué.

9.3.2. Réversibilité des alvéoles

Le chemisage constitue un long cylindre métallique, de diamètre un peu plus petit que celui du trou, un peu plus grand que celui du surconteneur. Il y a donc initialement des jeux entre terrain et chemisage et entre chemisage et surconteneur. Le chemisage est bouché au fond de l'alvéole par une plaque verticale ; du côté de la galerie, il aboutit à l'insert et à la tête d'alvéole. Ce chemisage est presque au contact des terrains et le jeu laissé entre terrains et chemisage est assez rapidement rempli d'eau ou même comblé par fluage des terrains, comme semblent le montrer les essais récents faits dans les forages jouant un rôle de "maquette de l'alvéole".

Ce chemisage a pour fonction principale de permettre une introduction et, le cas échéant, un retrait facile des colis HA. Ceux-ci sont par ailleurs munis de patins en céramique pour faciliter le glissement.

Plus récemment l'Andra avait de plus attribué au chemisage une fonction d'étanchéité, pour éviter qu'il n'y ait, pendant les premières décennies après le dépôt des colis, dans le jeu entre surconteneur et chemisage, présence d'eau ayant traversé le chemisage, et d'oxygène venant des galeries encore ouvertes et filtrant par l'insert et son voisinage. La présence simultanée d'eau et d'oxygène créerait les conditions d'une corrosion rapide de l'acier du surconteneur au moins pendant la période allant jusqu'à la fermeture du stockage ou le bouchage de la galerie d'accès (après fermeture l'oxygène n'est plus renouvelé). L'Andra semble avoir renoncé à cette option, l'étanchéité étant trop compliquée à garantir.

Concernant la possibilité de retrait, le premier risque est que les mouvements du terrain qui vient rapidement au contact du chemisage, engendrent son ovalisation, conduisant à un contact chemisage-surconteneur et donc à un frottement additionnel, peut-être même un coincement du colis à retirer. On peut calculer l'ovalisation pour dimensionner l'épaisseur d'acier mais il y a des incertitudes : Faut-il prendre en compte seulement la pression de l'eau derrière le chemisage ? celle-ci est-elle modifiée par le chauffage ? Faut-il prendre en compte la pression totale des terrains ? Celle-ci serait-elle transmise à l'eau derrière le chemisage ?

La Commission n'a pas entendu d'exposé complet sur ce sujet.

Le second risque concerne l'alignement des tubes le long de l'alvéole, qui sera sans doute correct initialement, mais qui peut évoluer s'il y a des mouvements différentiels des terrains dus par exemple au chauffage inégal, aux hétérogénéités, au fluage non uniforme etc. Si le chemisage devient courbe, on peut aussi avoir un coincement des colis qu'on voudrait retirer.

L'Andra a vérifié avec son démonstrateur de surface que le retrait pouvait se faire même avec une courbure importante, mais il faut estimer si les marges sont suffisantes dans tous les cas.

9.4. PROGRAMME ENVISAGÉ D'ICI LE DÉPÔT DU DOSSIER DE LA DAC

Dans une première phase, commençant à mi-2011, l'Andra mettra en place une instrumentation du chemisage d'un alvéole, pour suivre l'évolution de l'interface argilite/chemisage. Cette évolution devrait être lente, mais ce sera l'occasion de tester des méthodes d'auscultation indispensables pour le programme d'Observation-Surveillance.

Un essai de mise en place de l'insert d'une dizaine de mètres de long placé entre la galerie et la partie utile de l'alvéole sera également conduit.

Une deuxième phase, commençant à mi-2012, comportera un essai des procédés d'obturation de la tête d'alvéole et un essai en vraie grandeur sur un alvéole muni de son insert et de sa plaque de fond. Dans ce dernier essai, une source de chaleur reproduira les conditions des colis dits C0, déchets HAVL, qui ne sont pas les plus exothermiques, mais qui devraient être les premiers stockés. Cet essai doit durer une dizaine d'années.

La Commission estime qu'il serait également indispensable d'observer pendant une longue durée un alvéole HA sans chemisage, la présence de ce dernier compliquant les observations et rendant difficile leur interprétation compte-tenu des interactions que cette présence engendre.

9.4.1. Scellements

Dans son rapport n° 3 de 2009 la Commission indiquait, à propos des scellements : "De nouvelles expérimentations sont prévues avant 2015, mais la Commission a déjà demandé qu'on tire parti de la période actuelle pour faire un bilan critique de la position théorique du problème qui paraît beaucoup trop rudimentaire ainsi que de ses implications technologiques. La Commission renouvelle cette demande déjà formulée à plusieurs reprises". Jusque récemment la Commission n'avait pas reçu de réponse à cette demande.

Le scellement des ouvrages n'interviendra vraisemblablement que dans un siècle ou plus. Les calculs de sûreté de 2005 ont établi qu'un éventuel cheminement de radionucléides par les galeries et puits ne constitue pas un scénario significativement plus sévère que le scénario de migration par la formation géologique elle-même. Néanmoins, dans le cas des scénarios dégradés, les scellements constituent une barrière importante. Il paraît nécessaire de disposer, pour le dossier de la DAC, d'éléments substantiels établissant qu'on peut raisonnablement compter qu'une solution satisfaisante sera trouvée.

Le programme de l'Andra laissait penser que la conception des scellements avait été figée en 2005 et que, depuis cette date, l'accent était mis sur les seuls essais technologiques permettant de vérifier la faisabilité des saignées et de leur remplissage. Les progrès accumulés dans la connaissance de l'EDZ justifiaient pourtant qu'on réexamine de ce point de vue la question des scellements. Il paraissait notamment important de prendre en compte l'endommagement induit par le creusement de la saignée et l'effet des contraintes et déformations induites par l'application d'une pression élevée de gaz ou d'eau sur l'une des faces du scellement. On aurait pu ainsi établir que le dessin retenu, la largeur des saignées, leur profondeur, la distance qui les sépare, leur nombre, le dimensionnement des massifs d'appui, les matériaux qui constituent les scellements permettraient un meilleur compromis entre l'optimum que suggèrent les calculs, et les inévitables contraintes technologiques. Cette analyse apparaissait comme un préalable à la conduite d'expérimentations technologiques, évidemment nécessaires pour emporter complètement la conviction, comme celles que prévoit l'Andra, l'essai Test de Scellement par Saignées (TSS) et l'essai Noyau de Scellement (NSC).

L'Andra a indiqué très récemment à la Commission qu'elle procédait à une révision en profondeur de son programme relatif au scellement. La Commission, tout en étant préoccupée par les délais courts que laisse la date de dépôt du dossier de la DAC, apprécie favorablement la décision de l'Andra.

9.5. MODÉLISATION GÉOMÉCANIQUE ET CONCLUSIONS

9.5.1. Résultats expérimentaux

L'Andra conduit dans le laboratoire souterrain un programme d'expérimentations géomécaniques remarquable par son ampleur et par la qualité et la densité des mesures effectuées. Il comporte un ensemble d'essais dont certains ont commencé dès 2004 (mine-by test du puits) et concernent notamment les galeries GAN, GT6, GAT, GKE, GLE, GEX, GMR et GED. Ces essais sont complétés par les mesures et observations particulières effectuées à l'occasion du creusement des alvéoles HA. Tous ces essais visent à l'acquisition de données de base pour la compréhension et la modélisation du comportement hydromécanique du massif au voisinage des ouvrages souterrains. La description et la typologie des fractures dans la zone endommagée (EDZ) créées lors du creusement des ouvrages qui en résultent sont convaincantes.

9.5.2. Modélisation du comportement mécanique

38

La modélisation, c'est-à-dire l'écriture, en vue du calcul numérique, de relations mathématiques entre les grandeurs qui influencent le comportement (contraintes, déformations, pression de l'eau, température) ou en décrivent les particularités locales (paramètres mécaniques, conductivité thermique, perméabilité, porosité, coefficient de dilatation thermique) est rendue difficile par la présence simultanée de phénomènes physiques variés (mécaniques, hydriques, hydromécaniques, thermiques et chimiques). Ceux-ci sont souvent fortement couplés et présentent de fortes irréversibilités dont la plus visible est la fracturation dans l'EDZ et l'accroissement de perméabilité qui l'accompagne.

Pour le comportement de court terme, plusieurs modèles distincts sont encore proposés et il serait souhaitable qu'ils convergent vers une formulation unique stabilisée. Il semble d'ailleurs que les traits principaux de ce comportement fassent progressivement l'objet d'un consensus des experts. Un modèle stabilisé permettrait d'analyser dans un cadre mécanique unique tous les essais de creusement et de soutènement, dont les expérimentations récentes ou en cours GCS, GCR, GRD et GVA.

L'étude du comportement différé, importante pour la prévision du comportement des galeries et alvéoles à l'échelle du siècle, est moins avancée. L'Andra dispose de beaucoup de données expérimentales recueillies dans le laboratoire souterrain. La compréhension des mécanismes de petite échelle à l'origine du comportement différé a fait des progrès importants dans le cadre du Groupement de Laboratoires Géomécanique. En revanche les lois de comportement macroscopiques qui permettent de calculer l'évolution des galeries et alvéoles à l'échelle séculaire paraissent moins solidement étayées. Par exemple il peut être risqué d'adopter sans argument solide des lois qui prévoient la réduction au cours du temps des vitesses de déformation quand la charge appliquée est constante.

La Commission note que l'étude du comportement différé constitue un des trois axes qui inspirent le programme futur de l'Andra ; la Commission souhaite que ce programme lui soit présenté.

9.5.3. Synthèse des études géomécaniques

Dans son précédent rapport, la Commission avait jugé que les études géomécaniques paraissaient morcelées et avait souhaité qu'une synthèse de l'état des connaissances, orientée vers la modélisation, lui soit présentée. L'Andra lui a fourni deux textes de bilan.

Le premier concerne la variabilité des caractéristiques principales avec la profondeur, et leur anisotropie, qui ont été étudiées en bénéficiant d'un volume exceptionnel de données expérimentales. Les relations entre la variabilité ou l'anisotropie et les conditions de la genèse et des transformations ultérieures de la formation géologique sont décrites de manière convaincante. Il se dégage l'impression d'une très bonne connaissance des variations dans l'espace des propriétés de la formation, qui a bénéficié au choix raisonné de la zone d'implantation (Zira) d'un futur stockage.

Le second propose une synthèse très complète des études sur le comportement thermo-hydro-mécanique des argilites, "du matériau à l'ouvrage". Il s'agit d'un texte scientifique ambitieux qui met en relation le comportement et la structure multi-échelle des argilites en place. Il envisage avec lucidité les domaines d'application des outils de simulation disponibles et leurs limites.

La Commission souhaite que l'Andra poursuive l'effort de synthèse amorcé.

9.5.4. Programme des futures expérimentations

Concernant le programme des années à venir, un autre ensemble d'essais, plus directement orientés vers les problèmes industriels, portera sur le creusement et le soutènement des ouvrages et, plus généralement, sur les pistes de progrès dans la conception. Ce sont les second et troisième axes du programme futur de l'Andra. Hormis le cas des alvéoles HAVL, il comporte l'essai de galerie test à soutènement souple (GCS) en cours, l'essai de galerie test à soutènement rigide (GCR) et l'essai de pose de voussoirs derrière un tunnelier, inspiré par les producteurs.

La Commission estime que ce programme concrétise une évolution souhaitable vers des expérimentations intégrées et proches de l'échelle industrielle. Elle recommande de prendre garde néanmoins à ce que ne se mette en place un divorce entre la modélisation scientifique du comportement et la mise en œuvre d'essais plus orientés vers l'application industrielle.

Annexe 10

RÉVERSIBILITÉ

Le mot de "réversibilité" est, aux yeux de la CNE, si ambigu, qu'il compromet la transparence souhaitable du projet. La Commission estime indispensable à l'information judicieuse de tous les acteurs concernés par le stockage et, en particulier, du citoyen, de dissiper cette ambiguïté par l'adoption d'un lexique plus précis. Elle propose de retenir trois mots distincts pour trois réalités différentes :

- ❖ la *réversibilité*, en un sens précis et univoque, désigne la possibilité, en n'importe quel point d'effectuation du projet, de revenir à un point antérieur, compte tenu du fait que plus la réalisation avance moins il devient possible de regagner des points plus reculés ; en d'autres termes, la réversibilité fait d'autant plus place à l'irréversibilité que la distance entre les stades de réalisation est plus grande ;
- ❖ la *recupérabilité* est la capacité d'atteindre les colis stockés et de les extraire de leur position dans le stockage, de manière à pouvoir leur appliquer les traitements requis par leurs états éventuels à différentes échelles de temps, qu'il s'agisse d'accidents ou de conversion des déchets en ressources exploitables ;
- ❖ la *flexibilité* vise un mode de gestion du projet de stockage, à tous les stades d'élaboration et de réalisation, conçu de telle manière qu'elle puisse être constamment et perpétuellement modifiée, pour être à même de repérer, de traiter et d'intégrer toutes informations nouvelles portant sur l'efficience de l'entreprise.

41

La flexibilité est une qualité d'un stockage profond requise par le Guide de sûreté édité par l'Autorité de sûreté nucléaire. La réversibilité, et son corollaire la récupérabilité, résultent d'une demande sociale introduite dans la loi par la représentation nationale. Elles impliquent que l'option d'un retrait partiel ou complet reste crédible pendant une durée d'un siècle au moins. Pendant cette durée, le retrait est de moins en moins facile. Une échelle qui comporte cinq niveaux successifs de réversibilité a été adoptée par l'AEN (Agence pour l'Energie Nucléaire) ; l'Andra a contribué à sa mise au point.

Pour que la récupération des déchets demeure facile, compte tenu du niveau de réversibilité atteint, plusieurs conditions doivent être satisfaites pendant toute la période de réversibilité. Il faut qu'il n'existe aucune incertitude sur la nature et la localisation de chacun des colis de déchets. Les puits et galeries d'accès aux alvéoles qui contiennent les colis doivent rester dans un état qui permette la circulation des engins de transport et de manutention. On doit avoir ménagé, entre les colis et le revêtement ou le chemisage des alvéoles, un jeu suffisant. Ce jeu doit être calculé avec une marge qui tienne compte des effets des pressions de terrain qui s'exerceront progressivement sur le revêtement ou le chemisage des alvéoles et pourront en réduire la section ou en perturber l'alignement. Pendant la période considérée, les conteneurs en acier ou en béton qui enveloppent les déchets ne doivent connaître que des évolutions limitées. De même, il faut limiter les évolutions physico-chimiques qui affecteraient l'air, l'eau et plus généralement les matériaux du voisinage des colis et qui seraient susceptibles d'engendrer des difficultés ou des risques pendant la récupération. Les dispositifs de saisie, d'extraction, de manutention et de transport des colis doivent avoir été maintenus opérationnels. Des moyens d'observation et de surveillance doivent fournir les informations utiles sur l'évolution des colis et de leur

environnement. Les colis retirés, quelle que soit leur quantité, doivent pouvoir être entreposés à la surface, sur place ou à distance, dans des conditions sûres. Enfin un retrait éventuel doit avoir été organisé : il faut prévoir les circonstances qui pourraient le rendre nécessaire, disposer des éléments permettant de décider le retrait, dont l'estimation de son coût et des risques pour les opérateurs, préparer des plans de retrait intégrant les difficultés qui peuvent survenir, pouvoir adapter le rythme de déstockage à la nature de l'événement qui l'a rendu nécessaire et vérifier que les plans de retrait sont cohérents et applicables.

10.1. EXERCICES DE REVERSIBILITÉ

La maintenance, la surveillance et la mesure permettront de vérifier que des conditions mentionnées restent effectivement satisfaites. L'Andra s'attache à réaliser des essais en prototype de surface et à tirer des essais réalisés en laboratoire souterrain les enseignements utiles du point de vue du retrait. Mais le retrait est une opération globale complexe pour laquelle la vérification de chaque maillon de la chaîne n'est sans doute pas suffisante.

La crédibilité de la réversibilité appelle que sa faisabilité soit vérifiée de manière plus complète. Un exercice avait été conduit préalablement à la mise en exploitation au Nouveau Mexique (USA) d'un stockage de déchets radioactifs (WIPP, Waste Isolation Pilot Plant) creusé dans une formation salifère. Des blocs de sel avaient été entassés sur un colis dans une galerie, pour simuler une chute de toit, et on a pu montrer que le conteneur pouvait être, à distance, dégagé puis repris.

42

La Commission invite l'Andra à proposer, dans la perspective du dépôt du dossier de la DAC, les éléments de définition d'une revue périodique de réversibilité qui pourrait comporter la conduite d'exercices de réversibilité.

10.1.1. Circonstances pouvant conduire à un retrait

La Commission avait demandé à l'Andra d'envisager les scénarios pouvant conduire à un retrait des colis. La réversibilité est une demande sociétale fortement exprimée mais encore incomplètement formulée, et l'Andra s'est notamment appuyée sur une enquête conduite auprès des acteurs locaux pour confirmer et compléter la liste des scénarios les plus souvent envisagés.

10.1.2. Choix d'une nouvelle filière de gestion, valorisation des déchets stockés

Parmi ces scénarios figure le choix d'une filière de gestion autre que le stockage profond ou le souhait d'utiliser des substances contenues dans des déchets déjà stockés. Ces deux scénarios paraissent peu réalistes dans les conditions d'aujourd'hui. Tous les pays concernés ont choisi la filière du stockage profond et la seule variante crédible, même si elle n'apparaît pas souhaitable, serait de laisser l'ouvrage ouvert plus longtemps qu'il n'est envisagé aujourd'hui. L'hypothèse de l'utilisation de substances déjà stockées n'est guère plus vraisemblable compte tenu du mode de conditionnement des déchets retenu, peu réversible, surtout dans le cas des verres, et d'autant moins, dans le cas français, que l'uranium et le plutonium sont déjà extraits des déchets avant mise au stockage. Le contrat de réversibilité défini par la loi impose toutefois que la possibilité de mise en œuvre de ces deux scénarios reste ouverte.

10.1.3. Défaut d'un colis ou de la barrière ouvragée

Moins hypothétiques paraissent les scénarios associés à un défaut de colis ou à un défaut de la barrière géologique. Au WIPP, cité plus haut, où est déjà stocké plus de la moitié de l'inventaire prévu, un colis jugé non conforme a été retiré du stockage. Le cas de la mine d'Asse en Allemagne est plus significatif. Des déchets radioactifs de faible et moyenne activité ont été stockés il y a une trentaine d'années dans cette ancienne mine de sel. Il semble que la barrière géologique était fragile, compte tenu, d'une part, du grand volume de vides miniers préexistants et, d'autre part, de la présence de saumure au contact direct des limites du dôme de sel dans lequel la mine avait été creusée. De fait, des arrivées de saumure dans les chambres de stockage ont été constatées et leur analyse a montré qu'elles étaient chargées en radionucléides, indice clair d'un début de dissolution des colis.

Le retrait total des colis est réclamé par une partie de l'opinion publique. Il apparaît toutefois très coûteux (plusieurs milliards d'euros) d'autant que le stockage n'a pas été conçu à l'origine pour être réversible.

Au contraire, le stockage de déchets toxiques de Stocamine, réalisé dans des galeries creusées à cette fin dans les anciennes mines de potasse d'Alsace, à Witelshheim, avait en principe été conçu pour être réversible. Un incendie a affecté un des blocs de stockage à la suite de la descente de colis qui avaient pourtant été clairement identifiés comme non conformes dès leur arrivée au stockage. Une étude préalable de risques à long terme avait été réalisée ; même si elle souffrait d'un examen critique contradictoire insuffisant, elle avait le mérite d'exister, ce qui ne semble pas être le cas pour beaucoup d'ouvrages de même nature. Même si l'incendie ne remettait pas directement en cause les principes de confinement à long terme définis dans cette étude, il a engendré un vif sentiment de rejet dans l'opinion locale qui réclame la mise en œuvre de la réversibilité. Il apparaît toutefois que, si le retrait n'est sans doute pas impossible – 173 colis ont été retirés en 2001-2002, assez difficilement mais sans incident majeur - il présente des risques pour les travailleurs qui en seraient chargés, notamment parce que le jeu initial réduit laissé entre les colis et les parois rend malaisée la préhension des colis par des engins de manutention et augmente le risque de chute de colis suivi d'un épandage des produits toxiques. Par ailleurs ce jeu a diminué plus vite que prévu, sous l'effet de la convergence des parois des galeries creusées dans le massif de sel, de sorte que l'objectif initial d'une réversibilité pendant une période de 30 ans n'est sans doute plus vérifié.

Cet exemple illustre l'importance d'une prévision correcte des mouvements de terrains qui s'accumuleront pendant la période de réversibilité. Le Centre de Stockage de la Manche (CSM) créé par le CEA, avant la mise en place des règles actuellement applicables aux stockages de surface, a été géré à partir de 1979 par l'Andra. En 1996 on constatait la présence dans le stockage de zones chaudes en radionucléides α et la présence importante de plomb, interdisant que le stockage puisse être banalisé, comme c'est le cas pour les stockages analogues conçus ultérieurement, après une durée de 300 ans. Les colis problématiques, peu nombreux, sont placés à une dizaine de mètres sous la surface. Leur retrait a été envisagé, mais on a préféré la mise en place d'une couverture pérenne, en raison des doses élevées auquel le retrait aurait risqué de soumettre les travailleurs concernés et l'environnement.

De ces quelques exemples, on tire qu'on a pu facilement retirer un petit nombre de colis d'un stockage où la réversibilité a été prévue et convenablement préparée (WIPP) ; qu'elle est devenue plus difficile dans un stockage où elle avait été prévue mais insuffisamment préparée (Stocamine) ; et qu'elle est plus problématique dans des ouvrages où la préoccupation de réversibilité n'avait pas été intégrée dès l'origine (Centre Manche, Asse). Dans tous les cas la sécurité des travailleurs est un élément important à peser pour décider du retrait.

Dans le cas du stockage profond envisagé en Meuse/Haute-Marne, la procédure de caractérisation, certification et vérification à la réception bénéficie, en comparaison du cas des déchets toxiques, de l'expérience acquise par l'Andra dans les stockages qu'elle exploite déjà, du petit nombre et de la compétence des producteurs de déchets. C'est l'occasion de rappeler l'importance, dans le cas français, d'une séparation nette des rôles des producteurs et du stockeur. Les conditions paraissent donc propices à une stricte limitation du nombre d'erreurs, mais c'est un sujet qui n'a jamais été abordé jusqu'ici devant la Commission. De même, la probabilité d'existence d'un défaut de la barrière géologique (faille, lentille de sable) s'amenuise au fur et à mesure que les reconnaissances confirment la continuité et les qualités intrinsèques de la couche d'argilite. Il faut néanmoins que ces reconnaissances se poursuivent dans l'emprise de la Zira.

10.1.4. Contrôle du processus de stockage ; risque "d'abandon" du stockage

Dans l'enquête que l'Andra a conduite auprès des acteurs locaux, deux autres raisons de rendre le stockage réversible sont avancées.

La première est de permettre un contrôle du déroulement du processus de stockage. En l'absence d'une possibilité effective de retrait pendant toute la période de réversibilité, un processus d'autorisation par étapes serait un exercice en grande partie vidé de son sens. En ménageant toutes les options, la réversibilité donne tout son sens à un réexamen périodique du stockage. Le rythme, la procédure et les formes de participation des citoyens à un tel examen restent à préciser et à débattre dans la perspective de la loi sur la réversibilité qui sera examinée en 2015.

44

La seconde raison, qui cherche encore une formulation précise, est la préoccupation "que le site ne soit pas abandonné". Le point de vue de la Commission est qu'il faut prendre dès aujourd'hui les dispositions de conception nécessaires pour que le stockage puisse être fermé lorsque tout l'inventaire envisagé aura été stocké. Il existe pour cela au moins deux raisons. D'une part, les qualités du stockage laissé ouvert se dégraderaient au cours du temps ; d'autre part, il est souhaitable de ne laisser que la charge de gestion la plus faible possible aux futures générations, qui n'auront pas bénéficié des avantages dont les déchets sont la contrepartie. Cette position de principe, qui implique des dispositions pratiques à prendre dès maintenant, n'empêche en rien que ces futures générations choisissent le jour venu, en connaissance de cause, une autre voie que celle envisagée aujourd'hui ; elle laisse entière leur liberté de choix.

Par ailleurs la Commission observe une évolution progressive de la conception de la fermeture : celle-ci n'est plus nécessairement synonyme d'abandon et d'oubli, comme elle pouvait tendre à l'être il y a une quinzaine d'années. Les possibilités de surveillance après fermeture et les moyens d'assurer une mémoire à long terme de l'existence d'un stockage fermé font l'objet d'une réflexion approfondie. L'absence de contrôle institutionnel après une certaine période de temps, qui est à l'origine de l'exigence de sûreté *passive* à long terme, apparaît ainsi comme une hypothèse prudente et nécessaire ; l'absence de tout contrôle n'est pas pour autant souhaitable, et il est également prudent de réfléchir aux dispositions qui en réduisent la probabilité.

10.1.5. Incident de manutention

A la limite entre la réversibilité proprement dite et la sûreté du stockage en fonctionnement, l'Andra étudie la récupérabilité d'un colis MAVL en cas de chute d'un colis dans la cellule blindée d'accès à l'alvéole ou en section courante d'alvéole. Elle envisage la réalisation d'un robot susceptible d'analyser l'état du colis et de l'alvéole, et la procédure de gestion d'un colis contaminé. De même un essai de collision entre colis MAVL est envisagé pour vérifier les modélisations numériques déjà réalisées.

10.1.6. Hypothèse d'un déstockage rapide

L'Andra n'a pas envisagé de scénario dans lequel le retrait rapide d'un grand nombre de colis serait nécessaire. De fait, le retrait s'effectuerait avec les mêmes moyens (sauf traction des colis HAVL hors de leur alvéole, qui requiert un effort plus important que la mise en place) et au même rythme que le stockage lui-même, soit 2.500 colis par an environ (voir paragraphe suivant). Dans l'hypothèse (peu probable) d'un retrait total, il faudrait donc pour retirer les colis une durée comparable à l'âge du stockage au moment où le retrait serait décidé. Il faut reconnaître que l'hypothèse d'un accident conduisant à l'abandon du stockage présente une probabilité de plus en plus ténue au fur et à mesure que s'accumulent les informations sur la formation géologique retenue. Par exemple l'hypothèse d'un ennoyage rapide par une discontinuité hydraulique non reconnue, que l'on ne peut jamais exclure sans examen attentif dans le cas d'une mine de sel, en raison du pouvoir de dissolution de l'eau, est très peu vraisemblable en l'état actuel des connaissances sur la couche du Callovo-Oxfordien.

45

La Commission recommande néanmoins que l'Andra précise le rythme de déstockage le plus rapide que permettent les moyens envisagés actuellement.

10.2. ÉVOLUTIONS DES ALVÉOLES ET DES COLIS PENDANT LA PÉRIODE DE RÉVERSIBILITÉ

10.2.1. Mise en place des colis dans les alvéoles

Dans le scénario de dimensionnement, il y a 61.460 colis HA, 5.460 colis CU, 238.640 colis MAVL (colis primaires) à stocker. Les options de mise en place des colis dans le stockage ne sont pas arrêtées. A titre indicatif, les colis primaires sont d'abord placés en surface dans des colis de stockage (colis primaire placé dans un surconteneur en acier, portant le poids total d'un colis à 2 tonnes pour les HAVL ; conteneur en béton portant plusieurs colis primaires, de poids total 7 à 25 tonnes pour les MAVL). Les colis de stockage sont à leur tour placés dans une hotte de transfert comportant une enceinte blindée de radioprotection. La descente vers la zone centrale de soutien pourrait se faire par funiculaire dans une descenderie déroulée. Chacune des trois zones distinctes de stockage (MAVL, HAVL, C0-CU3) est desservie à partir de la zone centrale par deux ou trois galeries de liaison parallèles, dont l'une est réservée au transport des colis par véhicule de transfert sur pneu ou rail. A l'intersection entre ces galeries et les galeries d'accès aux alvéoles s'effectue un transbordement vers une navette d'accostage qui transporte les colis vers la tête d'alvéole. Des systèmes de préhension et transport, dépendant de la nature des colis, permettent alors leur mise en place dans l'alvéole. Toutes ces opérations sont

automatiques, le personnel, travaillant dans la salle de commande, restant à grande distance des colis.

Les moyens de manutention permettant le retrait seront les mêmes que ceux utilisés pour le stockage, ce qui garantit que leur maintenance sera assurée. Cela imposera toutefois certaines contraintes en cas d'évolution technologique de ces moyens, qui n'est pas improbable sur une durée d'un siècle.

Le rythme du retrait envisagé est ainsi nécessairement de l'ordre de grandeur de celui de la mise en place, soit une dizaine de colis par jour ou 2.500 dans l'année.

10.2.2. Retrait des colis HAVL

Pour les colis HAVL, on rappelle que, dans une section verticale, on trouve au centre de l'alvéole le colis de déchet vitrifié, placé dans un surconteneur qui empêche le contact du verre avec l'eau au moins pendant toute la phase "thermique", de l'ordre d'un millier d'années, pendant laquelle la dissolution des verres risquerait d'être plus rapide ; puis, entourant le surconteneur, le chemisage métallique, de diamètre suffisant pour laisser un jeu libre qui permette un déplacement horizontal de l'ensemble verre-surconteneur, ou colis de stockage, muni de patins qui facilitent le glissement ; enfin le jeu entre chemisage et terrains, qui se remplit rapidement d'eau provenant du massif puis se comble sous l'effet du mouvement de fermeture du vide créé. Longitudinalement les colis de stockage, éventuellement séparés par des intercalaires qui réduisent la puissance thermique dissipée par unité de longueur, occupent la partie utile de l'alvéole, c'est-à-dire les derniers trois-quarts de sa longueur totale. Le chemisage est fermé par un bouchon d'extrémité et, de l'autre côté, il vient se loger dans l'insert en tête d'alvéole. Cette liaison est souple et de manière plus générale, la dilatation axiale du chemisage est libre, pour éviter un flambage associé à la déformation d'origine thermique de l'acier.

L'obturation des alvéoles HAVL est réalisée rapidement après leur remplissage. Les échanges de matière et de chaleur avec l'extérieur se font alors par l'interface entre le chemisage et les terrains, rapidement remplie d'eau et, à un moindre degré, entre l'alvéole et la galerie encore ouverte, à travers la tête d'alvéole et la zone endommagée dans les terrains qui l'entoure, qui permet le passage d'un peu d'air et donc d'oxygène. La composition de la phase gazeuse dans le jeu entre colis et chemisage peut être analysée au moyen de lignes de prélèvement placées dans l'insert. Leur conception n'est pas achevée.

L'Andra a envisagé de donner au chemisage métallique une fonction d'étanchéité. Le jeu entre chemisage et surconteneur reste alors durablement sec et il n'y a pas de corrosion, ce qui facilite le retrait, à la fois du point de vue des conditions de surface du surconteneur et du point de vue des conditions physico-chimiques qui règnent dans le jeu laissé entre chemisage et surconteneur. Il semble que l'Andra croit moins à la possibilité de réaliser une telle étanchéité ; l'eau circule alors dans le jeu avec possibilité de condensation sur les parties plus froides (intercalaires) et donc de corrosion du surconteneur et de l'intrados du cuvelage. Le renouvellement de l'oxygène par apport depuis la galerie créerait, en présence d'eau, les conditions d'une corrosion plus rapide ; il est en principe limité par la conception de la tête d'alvéole. L'Andra estime au total que les vitesses de corrosion restent suffisamment faibles pour ne pas modifier significativement les conditions d'un retrait.

Un phénomène analogue affecterait l'extrados du chemisage qui, pour sa part, est certainement au contact d'oxygène et d'eau du massif, après un temps court. L'Andra estime que la vitesse de corrosion, initialement rapide, chuterait rapidement.

Hormis leurs effets directs sur l'état du chemisage et du surconteneur, que l'Andra apprécie comme modestes, ces conditions, en cas de réouverture de l'alvéole, mettront l'atmosphère de la galerie en contact avec une phase fluide contenant de l'eau liquide, de la vapeur et de l'hydrogène, produit de la corrosion anoxique, à pression et température élevées, plusieurs MPa et un peu en-dessous de 100 °C. La réouverture de l'alvéole doit tenir compte de cette situation.

L'autre problème posé est celui de l'ovalisation et de la perte d'alignement.

Le chemisage, surtout s'il reste étanche, sera soumis à son extrados à la pression hydrostatique à la profondeur du stockage, soit 5 à 6 MPa, peut-être un peu plus à cause des effets de dilatation thermique. A plus long terme, le jeu laissé entre massif et chemisage se résorbera et le poids des terrains, de l'ordre de 11 MPa, s'appliquera, d'abord localement, puis, à terme, sur l'ensemble du chemisage. Les calculs que propose l'Andra pour rendre compte de ces phénomènes gagneraient en crédibilité si l'on disposait de modèles consolidés et validés du comportement différé engendré par les effets conjoints du fluage, de l'évolution des pressions de pore, de la dilatation thermique, éventuellement des transformations physico-chimiques affectant le massif. Ces évolutions mécaniques pourraient conduire à l'ovalisation du chemisage et donc au blocage des colis en cas de retrait. On peut l'éviter en dimensionnant largement l'épaisseur du chemisage, avec l'inconvénient d'accroître son poids et de compliquer sa mise en place dans l'alvéole (les essais actuels de réalisation d'alvéoles chemisées ont été effectués avec un chemisage moins épais que le chemisage nominal). L'Andra a étudié dans le centre de Saudron les effets de défauts sur le retrait d'un colis de stockage : écartement de tronçons, défaut d'alignement transversal ou axial. Les défauts simulés étaient en principe très "enveloppe", ce qui a pu être vérifié pour les défauts initiaux de construction sur l'exemple des alvéoles creusés dans le laboratoire, mais reste à établir pour les risques d'évolution au cours du temps, ovalisation et perte d'alignement axial.

La Commission souhaite que lui soient présentés les calculs de dimensionnement vis-à-vis du risque d'ovalisation et estime qu'il faudra dès que possible mettre en œuvre des essais en place complètement représentatifs des conditions réelles, seuls susceptibles d'entraîner complètement la conviction quant au risque d'ovalisation.

Dans la direction axiale, l'hétérogénéité inévitable des propriétés mécaniques du massif et le développement inégal des augmentations de température, par exemple lié à la présence d'intercalaires qui ne produisent pas de chaleur, engendreront des déplacements du massif variables le long de l'axe de l'alvéole et des pertes possibles d'alignement, susceptibles elles aussi de créer des blocages de colis lors d'un retrait. L'Andra a vérifié par des essais de traction des colis à la surface du sol qu'on disposait de marges vis-à-vis d'une perte d'alignement. C'est une indication précieuse mais qui, là aussi, devra être confirmée par des essais en conditions réelles.

L'Andra envisage de réaliser des alvéoles d'une quarantaine de mètres de long, et, après quelques tâtonnements inévitables, a réussi un premier essai de creusement d'un alvéole chemisé de cette longueur. Ces tentatives sont évoquées dans une autre partie du rapport. L'Andra ne s'interdit pas d'explorer la possibilité de réalisation d'alvéoles plus longs, avec des avantages en termes de coût. Il est clair néanmoins qu'hormis sa faisabilité, qui ne paraît pas immédiatement acquise, un allongement de l'alvéole risque de compliquer le retrait, la perte d'alignement, et notamment de l'alignement initial, étant plus probable avec un alvéole plus long.

10.2.3. Retrait des colis MAVL

Les déchets MAVL seront rangés dans des conteneurs en béton de forme parallélépipédique placés au moyen de robots dans des galeries de 250 m de long fortement soutenues par un revêtement en béton. Deux rangées horizontales de conteneurs sont empilées, ce qui crée un risque de chute, que l'Andra juge toutefois peu probable. La stabilité des parties en béton doit être assurée pendant au moins un siècle ; l'Andra tirera partie de la réalisation prochaine dans le laboratoire souterrain de la galerie à comportement rigide (essai GCR), qui constitue une sorte d'analogie d'une alvéole MAVL, pour évaluer les déformations de diverses natures qui peuvent affecter un revêtement raide en béton. L'empilement des colis superposés doit être stable et un jeu suffisant doit subsister pour permettre la préhension, en cas de retrait, pendant la période de réversibilité. Les évolutions, surtout avant obturation, semblent devoir être modérées : le revêtement garantit en principe que les jeux laissés à l'intérieur de l'alvéole n'évolueront guère, seul le problème de conservation de son alignement, nécessaire pour le bon fonctionnement des robots, subsistant éventuellement.

48

Le retrait des colis MAVL est, plus fidèlement que dans le cas des colis HAVL, l'inverse de la mise en place car les colis ne sont pas extraits par traction mais repris par le même robot qui les a mis en place. L'obturation définitive des alvéoles de déchets MAVL n'est pas immédiate ; au contraire une ventilation est organisée pour évacuer les gaz produits et, à un moindre degré, pour refroidir les colis. La ventilation facilite la surveillance de l'atmosphère de l'alvéole ; en maintenant une atmosphère sèche dans l'alvéole, elle réduit considérablement les vitesses de corrosion.

En revanche, après obturation, de l'eau pourra être présente au moins localement avec, pour certains colis, formation d'hydrogène ou augmentation de la température jusqu'à des valeurs de l'ordre de 40 à 70 °C.

10.2.4. Conclusion sur l'évolution des alvéoles

L'Andra a réalisé, en s'appuyant sur l'approfondissement des APSS (Analyses Préliminaires des Situations de Stockage), un examen de l'évolution des alvéoles et des conditions qui y règnent. Cet examen contribue à l'analyse des conditions concrètes d'un retrait de colis.

La Commission insiste sur l'importance d'une vérification de cet examen, à échéance rapprochée, au moyen d'essais complètement représentatifs des conditions réelles d'un stockage.

10.3 ANALYSE DES PERTURBATIONS

L'Andra a réalisé une analyse fonctionnelle du retrait, qui fait partie de l'analyse fonctionnelle générale du stockage, régulièrement mise à jour. Elle identifie les fonctionnalités d'intégrité des colis, d'intégrité des alvéoles, de préservation des jeux et de maintien des moyens de support au retrait. Cette analyse a conduit à la recherche systématique des facteurs susceptibles de perturber chacune des fonctionnalités et à les classer suivant les critères de probabilité, de détectabilité et de gravité (qui intègre l'existence d'un moyen de remédiation). Les classements présentent une dose d'arbitraire, mais la méthode a le mérite d'aider à une exploration systématique des possibilités de défaillance.

10.4 RÉVERSIBILITÉ ET ENTREPOSAGE

Le PNGMDR (Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs) prévoit qu'il faut *"prendre en compte la réversibilité du stockage, notamment en identifiant systématiquement des solutions d'entreposage pour accueillir des colis qui seraient retirés du stockage"*.

Le retrait de colis est une éventualité qui ne pourrait guère intervenir avant 2040, pour les déchets MAVL, et avant 2050, pour les déchets HAVL. Par ailleurs, compte tenu du rythme de retrait envisagé, il suffit de disposer d'une capacité locale d'entreposage suffisante pour laisser le temps de la construction, sur place ou à distance, de capacités supplémentaires, si elles apparaissaient nécessaires.

Enfin cette question n'est pas séparable de celle de capacités d'entreposage nationales dont l'entretien ou la création, d'ici 2040, dépend de choix plus généraux dont le spectre est *a priori* très large, de l'arrêt progressif de la production d'énergie nucléaire à la mise en œuvre à grande échelle de réacteurs de 4^{ème} génération. Notamment les questions de la réalisation d'un entreposage de grande capacité pour les déchets ultimes auprès du site de stockage, ou au contraire d'un retour après retrait du stockage de colis de déchets vers les entreposages des producteurs, sont encore loin d'être posées de manière complète, même sur le seul plan technique.

A l'intérieur de ce cadre, l'Andra s'efforce de concevoir des solutions innovantes d'entreposage caractérisées par une certaine polyvalence (l'entreposage pourrait recevoir une grande variété de colis, simultanément si nécessaire) et une durabilité séculaire.

Dans le cas des déchets MAVL, sont envisagés des rayonnages exploités par transstockeur et le placement des colis sur un palier avec longrines. La durabilité est assurée par la ventilation par air sec, qui limite la corrosion et la carbonatation atmosphérique.

Les colis HAVL, dont certains des plus récents sont fortement exothermiques, nécessitent, hors hypothèse d'un retrait, une capacité d'entreposage accrue, que l'on peut dimensionner pour qu'elle puisse de plus recevoir d'éventuels colis récupérés. Mais le besoin d'un module dédié au retrait de quelques centaines de m³ pourrait apparaître vers 2050.

Les principales solutions envisagées sont : l'empilement de paniers de 6 colis primaires (ou 6 colis de stockage) refroidis par convection naturelle (c'est-à-dire le brassage de l'air engendré par l'existence d'écart de température), dérivé de l'entreposage E-EV-SE de La Hague, mais avec un plus grand diamètre ; le positionnement vertical sur dalle des colis refroidis par convection forcée, dérivé de l'entreposage actuel des CSD-C, que l'on adapterait au cas de colis HAVL ; et la mise en casemate de béton, dérivée du Nuhoms® des combustibles usés. Les deux dernières solutions, moins bien adaptées à des déchets dégageant de fortes puissances thermiques, conviendraient à des déchets retirés du stockage.

La Commission constate que l'entreposage des déchets éventuellement retirés d'un stockage est une question qui n'appelle pas une réponse à courte échéance et que sa solution dépend en partie de l'évolution, dont il est difficile de préjuger, du paysage énergétique français dans les trente années à venir. Elle observe que l'Andra y consacre, et doit continuer d'y consacrer, des moyens de recherche suffisants pour apporter en temps voulu les réponses souhaitables.

10.5. COLLOQUE DE REIMS

L'Andra a contribué à l'organisation à Reims par l'AEN, en décembre 2010, d'un colloque consacré à la réversibilité et à la récupérabilité. Ce colloque a montré que l'Andra se place au premier rang de la réflexion internationale sur la réversibilité.

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

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

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