

**Sûreté du stockage géologique  
de déchets radioactifs HAVL  
en France**

**Examen international par des pairs du  
« Dossier 2005 Argile » concernant  
le stockage dans la formation  
du Callovo-Oxfordien**

© OCDE 2006  
NEA n° 6179

AGENCE POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE  
ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES

## ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES

L'OCDE est un forum unique en son genre où les gouvernements de 30 démocraties œuvrent ensemble pour relever les défis économiques, sociaux et environnementaux que pose la mondialisation. L'OCDE est aussi à l'avant-garde des efforts entrepris pour comprendre les évolutions du monde actuel et les préoccupations qu'elles font naître. Elle aide les gouvernements à faire face à des situations nouvelles en examinant des thèmes tels que le gouvernement d'entreprise, l'économie de l'information et les défis posés par le vieillissement de la population. L'Organisation offre aux gouvernements un cadre leur permettant de comparer leurs expériences en matière de politiques, de chercher des réponses à des problèmes communs, d'identifier les bonnes pratiques et de travailler à la coordination des politiques nationales et internationales.

Les pays membres de l'OCDE sont : l'Allemagne, l'Australie, l'Autriche, la Belgique, le Canada, la Corée, le Danemark, l'Espagne, les États-Unis, la Finlande, la France, la Grèce, la Hongrie, l'Irlande, l'Islande, l'Italie, le Japon, le Luxembourg, le Mexique, la Norvège, la Nouvelle-Zélande, les Pays-Bas, la Pologne, le Portugal, la République slovaque, la République tchèque, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse et la Turquie. La Commission des Communautés européennes participe aux travaux de l'OCDE.

Les Éditions de l'OCDE assurent une large diffusion aux travaux de l'Organisation. Ces derniers comprennent les résultats de l'activité de collecte de statistiques, les travaux de recherche menés sur des questions économiques, sociales et environnementales, ainsi que les conventions, les principes directeurs et les modèles développés par les pays membres.

*Cet ouvrage est publié sous la responsabilité du Secrétaire général de l'OCDE. Les opinions et les interprétations exprimées ne reflètent pas nécessairement les vues de l'OCDE ou des gouvernements de ses pays membres.*

## L'AGENCE POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

L'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN) a été créée le 1<sup>er</sup> février 1958 sous le nom d'Agence européenne pour l'énergie nucléaire de l'OECE. Elle a pris sa dénomination actuelle le 20 avril 1972, lorsque le Japon est devenu son premier pays membre de plein exercice non européen. L'Agence compte actuellement 28 pays membres de l'OCDE : l'Allemagne, l'Australie, l'Autriche, la Belgique, le Canada, le Danemark, l'Espagne, les États-Unis, la Finlande, la France, la Grèce, la Hongrie, l'Irlande, l'Islande, l'Italie, le Japon, le Luxembourg, le Mexique, la Norvège, les Pays-Bas, le Portugal, la République de Corée, la République slovaque, la République tchèque, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse et la Turquie. La Commission des Communautés européennes participe également à ses travaux.

La mission de l'AEN est :

- d'aider ses pays membres à maintenir et à approfondir, par l'intermédiaire de la coopération internationale, les bases scientifiques, technologiques et juridiques indispensables à une utilisation sûre, respectueuse de l'environnement et économique de l'énergie nucléaire à des fins pacifiques ; et
- de fournir des évaluations faisant autorité et de dégager des convergences de vues sur des questions importantes qui serviront aux gouvernements à définir leur politique nucléaire, et contribueront aux analyses plus générales des politiques réalisées par l'OCDE concernant des aspects tels que l'énergie et le développement durable.

Les domaines de compétence de l'AEN comprennent la sûreté nucléaire et le régime des autorisations, la gestion des déchets radioactifs, la radioprotection, les sciences nucléaires, les aspects économiques et technologiques du cycle du combustible, le droit et la responsabilité nucléaires et l'information du public. La Banque de données de l'AEN procure aux pays participants des services scientifiques concernant les données nucléaires et les programmes de calcul.

Pour ces activités, ainsi que pour d'autres travaux connexes, l'AEN collabore étroitement avec l'Agence internationale de l'énergie atomique à Vienne, avec laquelle un Accord de coopération est en vigueur, ainsi qu'avec d'autres organisations internationales opérant dans le domaine de l'énergie nucléaire.

### © OCDE 2006

Toute reproduction, copie, transmission ou traduction de cette publication doit faire l'objet d'une autorisation écrite. Les demandes doivent être adressées aux Éditions de l'OCDE [rights@oecd.org](mailto:rights@oecd.org) ou par fax (+33-1) 45 24 13 91. Les demandes d'autorisation de photocopie partielle doivent être adressées directement au Centre français d'exploitation du droit de copie, 20 rue des Grands Augustins, 75006 Paris, France ([contact@cfcopies.com](mailto:contact@cfcopies.com)).

## AVANT-PROPOS

L'une des principales activités de l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN) dans le domaine de la gestion des déchets radioactifs est d'organiser des examens internationaux indépendants d'études et de projets nationaux. Les examens aident les programmes nationaux à évaluer des travaux réalisés. Les observations d'ordre général faites dans les rapports des examens peuvent également présenter un intérêt pour d'autres pays membres.

Le gouvernement français s'est adressé à l'AEN pour que le *Dossier 2005 Argile* de l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) fasse l'objet d'un examen international. La portée et les objectifs de l'examen étaient précisés dans le mandat (Termes de référence). Conformément à celui-ci, l'examen devait indiquer au gouvernement français si le *Dossier 2005 Argile* était : i) en accord avec les pratiques internationales et avec les autres programmes nationaux de stockage géologique, en particulier ceux concernant les formations argileuses et ii) si les futurs besoins de recherche étaient cohérents avec le corpus des connaissances disponibles et les priorités bien identifiées. Les autorités françaises étaient particulièrement intéressées par des recommandations détaillées concernant des améliorations spécifiques, notamment si le processus de prise de décision conduisait à une phase de sélection d'un site de stockage. Conformément au mandat (Termes de références), le Secrétariat de l'AEN a constitué un groupe de revue international (GRI), composé de dix experts internationaux, y compris un agent du Secrétariat de l'AEN. Ces experts ont été choisis pour leurs compétences complémentaires.

Ce rapport rend compte de l'opinion consensuelle du GRI. Il s'appuie sur l'examen du *Dossier 2005 Argile* et ses pièces justificatives, sur les informations que l'Andra a fournies dans ses réponses aux questions soulevées par le GRI et, enfin, sur les interactions directes du GRI avec les agents de l'Andra au cours de deux ateliers qui se sont déroulés en France.

Conformément à la procédure adoptée par l'AEN pour les examens indépendants, ni les autorités françaises, ni l'Andra n'ont commenté le présent rapport ; l'Andra a toutefois eu l'occasion de vérifier l'exactitude des faits

rapportés. Le GRI a veillé, dans toute la mesure du possible, à ce que l'ensemble des informations présentées soit exact, et assume toute responsabilité en cas d'erreur dans l'exposé des faits.

### ***Remerciements***

Tous les membres du GRI tiennent à remercier le personnel de l'Andra pour l'accueil qui leur a été réservé lors de leurs brèves visites en France, ainsi que pour l'excellent appui en terme d'organisation qui a facilité leur travail. Le GRI est particulièrement reconnaissant aux agents de l'Andra pour leur obligeance et leur souci de transparence dans les réponses apportées dans le cadre de la revue. Enfin, l'AEN remercie les diverses organisations qui ont mis à disposition leurs experts pour effectuer l'évaluation.

*Nota* : La présente version française est une traduction du rapport original rédigé en anglais, qui demeure, *in fine*, le document de référence.

Le terme « stockage » a été employé pour traduire les termes anglais “repository”, “disposal” et “deep disposal” dans un souci de cohérence avec le mode d'expression en France.

## TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos.....	3
Relevé des résultats principaux et avis conclusif .....	7
1. Introduction .....	19
1.1 Contexte .....	19
1.2 Le <i>Dossier 2005 Argile</i> .....	21
1.3 Organisation de la revue internationale par des pairs.....	23
1.4 Mandat.....	24
1.5 Conduite de la revue.....	25
1.6 Organisation du rapport.....	26
2 Conclusions détaillées concernant l'objectif global de la revue .....	27
2.1 Cohérence avec les pratiques internationales .....	27
2.2 Cohérence avec les autres programmes nationaux concernant les formations argileuses.....	29
2.3 Cohérence des besoins futurs de recherche avec les connaissances disponibles.....	31
3. Conclusions détaillées de la revue concernant des aspects techniques spécifiques.....	37
3.1 Géologie, hydrogéologie et transport dans le COX et les formations encaissantes .....	37
3.1.1 Avancées majeures des connaissances depuis le <i>Dossier 2001 Argile</i> .....	38
3.1.2 Confirmation du transport contrôlé par la diffusion dans le COX.....	39
3.1.3 Confiance en la composition de référence des fluides interstitiels du COX .....	42
3.1.4 Rétention des radionucléides dans le COX.....	43
3.1.5 Impact des perturbations géochimiques sur le COX.....	45
3.1.6 Caractérisation et modélisation du COX et des formations environnantes .....	46
3.1.7 Zone de transposition .....	48

3.2	Base scientifique de la représentation des processus et des fonctions de barrière.....	48
3.3	Approche relative à la formation de gaz et à son transfert .....	51
3.4	Méthodologie des analyses de sûreté à long terme.....	52
3.4.1	Généralités .....	52
3.4.2	Analyses fonctionnelles .....	53
3.4.3	APSS (évolution normale et altérée).....	54
3.4.4	Gestion des incertitudes .....	54
3.4.5	Analyse qualitative de sûreté (AQS) .....	55
3.4.6	Gestion des différentes échelles de temps.....	56
3.4.7	Analyses de sensibilité.....	56
3.4.8	Conclusions globales concernant la méthodologie d'évaluation de sûreté .....	57
3.5	Choix de l'architecture et des solutions d'ingénierie et de gestion du stockage.....	58
4.	Aperçu général des conclusions .....	61
	Références .....	63
	<i>Annexe 1.</i> Membres du Groupe de revue international .....	65
	<i>Annexe 2.</i> Documents examinés.....	75
	<i>Annexe 3.</i> Listes des acronymes.....	79

## RELEVÉ DES RÉSULTATS PRINCIPAUX ET AVIS CONCLUSIF

### Contexte

Un groupe de revue international (GRI) composé de spécialistes indépendants œuvrant dans tous les domaines liés à la recherche, aux analyses de sûreté et aux sciences de la terre a évalué la documentation élaborée par l'Andra et connue globalement sous l'appellation de *Dossier 2005 Argile*. Comme développé ensuite, ce *Dossier* représente un jalon essentiel du programme de travail, dont l'Andra est responsable, visant à évaluer la faisabilité du stockage géologique profond des déchets radioactifs de haute activité et à vie longue (HAVL) en France. Ce rapport présente l'opinion consensuelle du GRI. Il s'appuie non seulement sur l'examen du *Dossier 2005 Argile*, mais aussi sur les informations que l'Andra a fournies dans ses réponses aux questions soulevées par le GRI, ainsi que sur les interactions directes du GRI avec les agents de l'Andra au cours des deux séminaires qui se sont déroulés en France. De plus, pour remplir son mandat, le GRI a examiné des pièces externes au dossier, à savoir le document, dans une version de travail provisoire, concernant le programme de R-D pour une nouvelle phase de travail potentielle couvrant 2006-2010.

L'Andra a accueilli un séminaire d'orientation pour le GRI avec une visite du laboratoire de recherche souterrain (LRS) de Meuse/Haute-Marne en mai 2005. Les membres du GRI ont reçu les nombreux documents composant le *Dossier 2005 Argile* et se sont répartis les principales responsabilités de l'examen selon leurs domaines techniques d'expertise. L'objectif principal de cette revue était ciblé sur le rapport de synthèse global et sur les trois tomes généraux décrivant respectivement :

- l'architecture et la gestion du stockage géologique (TAG) ;
- l'évolution phénoménologique du stockage géologique (TEP), et
- l'évaluation de sûreté du stockage géologique (TES).

De nombreux documents de niveau plus détaillé ont également été examinés, lorsque le GRI l'a jugé nécessaire. Certains ont dû être traduits en anglais. De façon globale, le GRI a examiné plus de 5 000 pages de texte. Le

GRI a utilisé les connaissances spécifiques de ses membres et sa compréhension collective de la meilleure pratique internationale pour évaluer les informations fournies et formuler des conclusions et des recommandations.

La portée et les objectifs de la revue sont exposés dans le mandat. Le GRI souhaite confirmer que des informations suffisantes ont été mises à sa disposition pour lui permettre de remplir son mandat. En particulier, le GRI a été en mesure de vérifier les connaissances disponibles et les méthodes de travail.

Le présent rapport documente les principales conclusions du GRI et a été rédigé au cours de la période du 18 novembre au 20 décembre 2005. Conformément à la procédure adoptée par l'AEN dans le cas des revues indépendantes, ni les autorités françaises ni l'Andra n'ont commenté le présent rapport, bien que l'Andra ait eu l'occasion de vérifier l'exactitude des faits rapportés. Le GRI a veillé, dans toute la mesure du possible, à ce que l'ensemble des informations présentées soit exact ; il assume donc toute responsabilité en cas d'erreur dans l'exposé des faits.

### **Conclusions générales**

L'objectif général de l'évaluation par des pairs était d'indiquer au gouvernement français si le *Dossier 2005 Argile* était (i) en accord avec les pratiques internationales et avec les autres programmes nationaux de stockage géologique, en particulier ceux concernant les formations argileuses et (ii) si les futurs besoins de recherche étaient cohérents avec le corpus des connaissances disponibles et si les priorités étaient bien identifiées.

*En ce qui concerne l'objectif global de l'évaluation*, le GRI a conclu que le programme scientifique et technique de l'Andra était cohérent avec les meilleures pratiques internationales et, dans plusieurs domaines, à l'avant-garde des programmes de gestion des déchets :

- l'Andra a su utiliser de manière efficace les programmes de recherche relatifs à d'autres formations argileuses, notamment l'argile à Opalinus, pour assurer la formation de ses équipes chargées des expérimentations et développer des techniques et équipements expérimentaux en vue de les utiliser dans le LRS de Meuse/Haute-Marne ;
- l'Andra a fait un travail approfondi d'identification des futurs besoins de recherche en accord avec le corpus de connaissances disponibles, bien que l'établissement de priorités pour ces besoins ne soit pas abordé dans le document programmatique correspondant. Les observations



et recommandations du GRI en la matière sont fournies dans le présent rapport de revue, et

- l'Andra a fait un effort manifeste et concluant pour prendre en compte les résultats de la revue internationale du rapport précédent, le *Dossier 2001 Argile*.

Plus spécifiquement, la revue était destinée à vérifier que le *Dossier 2005 Argile* s'appuyait sur des bases solides et était développé de manière compétente en termes d'approche, de méthodologie et de stratégie. Ainsi les éléments spécifiques de la revue comportaient :

**La stratégie globale d'évaluation de la sûreté à long terme :** Le GRI a estimé que la stratégie globale de l'Andra pour évaluer la sûreté à long terme était fiable et exhaustive. Elle repose sur la définition et le traitement de fonctions de sûreté multiples et comprend des méthodes formalisées d'intégration de la phénoménologie, de la science et de la sûreté (y compris l'intégration des équipes et du personnel) qui contribuent de manière significative à la fiabilité et à la traçabilité. Cette stratégie permet à la fois d'assurer la sûreté en pilotant la conception du stockage et d'apprécier cette même sûreté en orientant son évaluation. En général, les approches reposant sur la définition des fonctions de sûreté permettent de pallier certains inconvénients de l'approche « multibarrière ». Pour cette raison, elles sont désormais utilisées par plusieurs autres programmes nationaux. L'approche de l'Andra est l'une des plus systématiques au niveau international.

**Fiabilité scientifique et technique des méthodologies appliquées pour la sûreté à long terme :** Le GRI a conclu que la méthodologie d'évaluation de la sûreté était solide. Elle contient les éléments nécessaires et a été développée de façon pertinente dans le *Dossier 2005*, comme en témoignent l'évaluation réalisée par le GRI. Les éléments-clés de la méthodologie sont : la définition des fonctions de sûreté et leur analyse approfondie au moyen d'une méthode formalisée dénommée « analyse fonctionnelle », respectivement « externe » et « interne » (AFE, AFI) ; la méthode d'analyse formalisée des évolutions temporelles normales et altérées du système décomposé en composantes spatiales appropriées appelée « analyse phénoménologique des situations de stockage » (APSS), qui conduit à une modélisation numérique ; une vérification et justification essentiellement *a posteriori* de la gestion des incertitudes au moyen de l'« analyse qualitative de sûreté » formalisée (AQS).

Selon le GRI :

- la méthode AFE et AFI mise en œuvre par l'Andra représente une contribution intéressante à l'utilisation croissante des approches fonctionnelles pour les évaluations de sûreté. Cette méthode développée

par l'Andra gagnerait à être l'objet de discussions et de comparaisons avec d'autres méthodes dans un contexte international afin de mieux approfondir ses avantages et ses limites ;

- l'APSS fournit une méthode solide et originale pour structurer les processus et les décomposer dans l'espace et dans le temps. Elle joue également un rôle important en tant qu'outil pour la documentation interne et la communication, en augmentant ainsi la traçabilité, et
- l'AQS est un outil efficace de gestion des incertitudes. Le GRI a estimé que l'énumération et le traitement structurés des incertitudes à l'aide d'un vocabulaire normalisé et sous forme de tableaux étaient transparents et adaptés à ses objectifs. L'AQS semble également utile pour l'identification des « sensibilités couplées » à l'aide d'outils qualitatifs. Le GRI pense que l'AQS a aussi le potentiel d'aide à la décision concernant la conception du stockage ou le développement de scénarios à partir de principes de base. Cette possibilité pourrait être approfondie par l'Andra.

Globalement, l'Andra a développé une méthodologie originale et fiable qui aborde les problèmes sous différents angles et utilise l'expertise de différentes équipes, ce qui permet de diminuer les biais. La méthodologie contribue aussi de manière significative à la traçabilité des informations au sein de l'Andra et potentiellement aussi pour l'examen par les autorités de sûreté. Toutefois, prise dans son ensemble, la méthodologie est plutôt complexe et exigeante à comprendre comme l'illustre le fait que certains de ses aspects fondamentaux aient dû être éclaircis vers la fin du processus de revue et en analysant un certain nombre de documents de niveau plus détaillé.

***Fiabilité de l'approche relative à la réversibilité*** : L'Andra a été confrontée à la demande de développement d'un concept de stockage fondé sur le principe de réversibilité, sans qu'aucun critère ou norme spécifique n'ait été défini comme base pour ce concept. L'approche que l'Andra a développée se fonde sur une construction progressive et une fermeture progressive, les aspects de réversibilité étant évalués à chaque étape. Dans ce concept, la réversibilité est considérée comme un moyen de procurer aux décideurs une plus grande souplesse de manière à ce qu'aucune décision d'aller plus avant ne soit prise ou ne semble prise à la hâte. Ce concept de réversibilité progressive avait été initialement exposé par la Commission nationale d'évaluation (CNE) dans son rapport de 1998 sur le sujet. Lors de la conceptualisation du stockage, l'Andra a choisi de ne spécifier aucune période pour la fermeture et, via un processus interactif faisant intervenir tant l'évaluation de la conception que celle de la sûreté, a développé un concept qui devrait être adapté à une exploitation réversible et sans risque sur une période de

200 à 300 ans. Le GRI considère que la conception développée par l'Andra satisfait à la demande de prouver le principe de réversibilité.

Le GRI a également étudié si la réversibilité pendant la phase de pré-fermeture n'avait pas été obtenue au détriment de la sûreté à long terme. Le GRI a été convaincu que ce n'était pas le cas.

Enfin, tout en reconnaissant qu'une exigence de récupérabilité lors de la phase d'exploitation est formulée dans d'autres pays et peut être satisfaite à l'aide de conceptions différentes de celle développée par l'Andra, le concept de l'Andra est plus orienté que d'autres vers l'exploitation réversible du stockage sur des échelles de temps relativement grandes. Au regard de l'importance de l'inventaire des différents types de déchets et de la stratégie de fractionnement du stockage en plusieurs zones indépendantes les unes des autres tant en phase d'exploitation qu'après fermeture, le dimensionnement et la complexité des installations de stockage sont beaucoup plus grands que dans la plupart des autres programmes. Le GRI reconnaît le caractère élaboré et unique de l'approche d'ingénierie développée par l'Andra. Toutefois, suite à l'engagement de garantir un développement et une gestion réversibles du stockage, on ne peut pas dire que toutes les opérations seront simples. En particulier, des exigences importantes s'appliqueront à une ingénierie de précision pour les opérations nucléaires en milieu souterrain. Un travail considérable de démonstration sera nécessaire afin de montrer l'atteinte de cet objectif avec le niveau de fiabilité requis. La présentation du futur programme scientifique et technique, en version provisoire de travail, a conforté le GRI dans le fait que ces exigences sont appréhendées et peuvent être résolues.

***Fiabilité du corpus scientifique*** : Le *Dossier 2005 Argile* repose sur une base scientifique solide. Comme pour la revue du *Dossier 2001*, le GRI considère que cela est dû, en grande partie, à l'engagement de l'Andra à faire participer la communauté scientifique la plus large à son programme. Au vu de son importance et de sa pertinence tant passée qu'actuelle, la conclusion du rapport de revue du *Dossier 2001* est rappelée ci-dessous :

*Les liens de l'Andra avec les établissements de recherche publics ressortent très clairement non seulement de sa politique d'appui à la recherche universitaire et post-doctorale, mais aussi de ses relations contractuelles à long terme avec plus de 100 laboratoires par le moyen d'accords de partenariat qui encouragent la formation de groupes de recherche ou de réseaux de laboratoires. La façon dont l'Andra a établi et appuyé les différents réseaux avec les établissements d'enseignement et de recherche français, a permis de promouvoir :*

- *le rassemblement des meilleures équipes et des meilleurs experts disponibles ;*
- *l'élaboration des techniques innovantes et le progrès de la compréhension fondamentale, et*
- *le partage des objectifs du programme.*

*Ces liens assurent un fondement scientifique solide tant pour les travaux actuels que pour la poursuite des travaux futurs.*

Le GRI n'a pas effectué d'évaluation détaillée des calculs et des valeurs de paramètre individuelles utilisées pour la modélisation phénoménologique et l'analyse de sûreté. En accord avec son mandat dans le cadre de la revue, le GRI a examiné, de manière approfondie, les investigations de l'Andra dans les domaines suivants :

- Géologie, hydrogéologie et transport dans le Callovo-Oxfordien (COX) et les formations encaissantes

La qualité des bases scientifiques du programme de l'Andra en ce qui concerne la caractérisation de la formation hôte et de son voisinage est considérée comme excellente, même en comparaison avec le bon niveau atteint dans les autres programmes nationaux.

Le GRI note que l'Andra a poursuivi intensivement la caractérisation de la formation du Callovo-Oxfordien et des formations encaissantes, à la fois à l'échelle du site (LRS de Meuse/Haute-Marne et son voisinage immédiat) et à l'échelle du secteur (zone de transposition). Ce travail de caractérisation supplémentaire a conduit à une représentation impressionnante de la stratigraphie et des propriétés hydrauliques du COX et de ses formations encaissantes par une modélisation complexe en trois dimensions (3D).

Le GRI note également de manière positive l'amélioration significative de la confiance dans les hautes performances du COX en tant que barrière à la migration de radionucléides et autres produits chimiques toxiques vers le milieu environnant et la biosphère. Cette confiance a été atteinte en utilisant des approches multiples et complémentaires combinant des expériences en laboratoire, des résultats préliminaires de mesures *in situ* au LRS de Meuse/Haute-Marne, différentes méthodes de modélisation, des observations naturelles (surpressions, profils naturels isotopiques et élémentaires), des analogies avec les connaissances acquises dans des milieux argileux ouvragés relativement plus simples (bentonite) et la caractérisation de l'espace poral à l'échelle microscopique.

Le document de synthèse et le TEP ne reflètent pas suffisamment le haut degré de confiance acquis par l'Andra en ce qui concerne la rétention des radionucléides dans le COX. La consultation de documents de niveau plus détaillé et les exposés oraux de l'Andra au cours de la semaine du séminaire de revue ont été nécessaires pour asseoir les opinions et la confiance du GRI. Dans l'ensemble, le GRI suggère que l'Andra accroisse de manière significative la visibilité des caractéristiques favorables de rétention du COX et de leur rôle essentiel en ce qui concerne la sûreté à long terme dans les futurs documents. Les recommandations se rapportant au futur programme R-D sont données dans le texte détaillé du rapport.

Le GRI a été surpris d'apprendre que certains des forages réalisés par l'Andra n'avaient pas pu, dans le cadre réglementaire des procédures d'autorisation, être maintenus comme forages de suivi à long terme, mais en revanche avaient dû être bouchés et abandonnés. Le développement d'un réseau d'observation à long terme à l'échelle du secteur sera très vraisemblablement exigé pour tout futur stockage et les informations qui auraient pu être obtenues au cours de la période précédant la sélection et le développement du site, s'il avait été possible de maintenir ces forages comme instruments d'observation, auraient été précieuses. Il en résultera probablement un travail additionnel significatif, si de nouveaux forages doivent être réalisés pour compléter un réseau d'observation conformément aux meilleures pratiques internationales.

- Modèles de relâchement des colis, dont la corrosion

À de nombreux égards, le chapitre du document de synthèse sur les modèles de relâchement des colis est excellent et complet. Il démontre une profonde compréhension des processus associés à la dégradation des divers déchets et présente des modèles conservatifs et de meilleure estimation (« best estimate ») pour le relâchement des radionucléides. L'analyse des processus de dissolution des déchets vitrifiés de haute activité et des déchets B ainsi que les modèles résultants sont particulièrement impressionnants et se situent au premier plan des études internationales.

En ce qui concerne l'argumentation relative aux processus et à la modélisation du combustible usé, celle se rapportant aux processus est généralement excellente, mais il n'est pas fait suffisamment référence aux études qui illustrent clairement que l'hydrogène dissous a un effet majeur sur la réduction de la vitesse de dissolution du combustible usé. Ceci tend à étayer le modèle extrêmement conservatif d'oxyda-

tion (dissolution complète en ~50 000 ans) utilisé actuellement pour la dissolution du combustible usé et qui serait, sinon, difficile à justifier.

On comprend la motivation de l'Andra pour utiliser des matériaux « non passivables ». Le comportement à long terme de ces matériaux est, en principe, plus simple à prédire comparé à d'autres alliages dont la résistance à la corrosion repose sur la stabilité d'une couche superficielle très protectrice. Les autres raisons incluent la facilité de fabrication (comme le soudage) et le coût. L'Andra fait preuve d'une compréhension des mécanismes de corrosion intéressant le stockage géologique, dont la prise en compte des contraintes mécaniques, de la présence d'hydrogène et de l'attaque microbienne, correspondant à l'état actuel des connaissances.

- Problématique des gaz

Considérant l'absence de traitement de la problématique des gaz dans le *Dossier 2001 Argile*, les progrès réalisés par l'Andra sont très impressionnants. Comme attendu, l'analyse des problèmes de production et transport de gaz apparaît comme ayant été réalisée une fois les études de conception terminées, pour confirmer que le gaz ne donne pas lieu à des problèmes significatifs vis-à-vis de la sûreté à long terme. De ce fait, les résultats de cette analyse ne sont pas utilisés en réitération dans le pilotage du processus de conception. Il est donc nécessaire d'intégrer le sujet du gaz dans les principes de conception. Malgré cette observation, le GRI note que le document d'analyse des gaz de l'Andra montre une excellente compréhension des processus intervenant dans la production et le transport du gaz en relation avec les divers composants du stockage. L'approche de la sûreté semble quelque peu conservatrice étant donné que les vitesses de corrosion utilisées se situent dans la fourchette haute des valeurs expérimentales mesurées et que certains facteurs pouvant réduire l'impact ne sont pas pris en compte (attitude prudente actuellement, car des études futures seront nécessaires pour confirmer l'importance de ces éléments). Les résultats de la modélisation montrent que, avec la conception actuelle, la plus grande partie du gaz se déplace le long des revêtements et à travers la zone perturbée par l'excavation dans les tunnels attenants aux alvéoles, puis s'échappe dans la roche hôte. Cela suggère que, pour augmenter la fiabilité des résultats, un plus grand nombre de données est nécessaire pour modéliser le transport par ces voies de transfert.

Au regard de la pratique internationale, le taux de production de gaz par unité de déchets stockés dépasse considérablement celui des autres concepts de stockage en milieu argileux, principalement à cause de la

superficie supplémentaire de métal introduite avec les revêtements des alvéoles de stockage. Comme la production et le transport de gaz dans les stockages est un problème important lorsque l'on communique avec des non-spécialistes, des études et des coopérations futures plus approfondies avec d'autres organisations sont nécessaires pour attester que les logiques des différences d'approche sont bien comprises et communiquées. Même en prenant en compte les taux de production de gaz actuels, la conclusion préliminaire – qui est que la sûreté à long terme n'est pas compromise – semble raisonnable. En ce qui concerne les études futures, l'Andra reconnaît la nécessité de réaliser des études à grande échelle concernant les phénomènes de transport de gaz dans le COX. En particulier, les modèles de transport biphasique ont besoin d'être validés et les pressions de seuil pour la dilatance et la fracturation doivent être confirmées lors de futures études au LRS de Meuse/ Haute-Marne.

- Choix de l'architecture, des solutions d'ingénierie et de gestion du stockage

La conception élaborée et présentée par l'Andra est une architecture de type « borgne » qui satisfait aux objectifs suivants :

- l'agencement modulaire pour accueillir différents types et quantités de déchets à différents moments et pour que les différents modules soient indépendants les uns des autres du point de vue des performances à long terme ;
- la simultanéité des opérations de construction des galeries et des alvéoles de stockage, d'une part, et de mise en place effective de déchets, d'autre part, et
- la conformité à l'exigence de réversibilité sans compromettre l'objectif final de sûreté à long terme après fermeture du stockage.

La revue du GRI a confirmé que l'architecture choisie peut être réalisée avec les techniques actuellement disponibles. Quelques commentaires, toutefois, sont indiqués à l'Andra pour l'optimisation et l'affinage ultérieurs. À savoir, la réalisation de la conception actuelle sera très exigeante : les techniques minières et de revêtement proposées exigent les normes de travail les plus élevées, notamment compte tenu du nombre important d'alvéoles de stockage différentes ; les techniques proposées par l'Andra de mise en place télé-opérée des colis de déchets exigent une propreté dans le stockage souterrain similaire à celle des installations nucléaires de surface. Le GRI recommande donc

de mettre en place un système d'assurance qualité strict (AQ) pour la construction souterraine. Également, l'expérience minière recommanderait la prudence en ce qui concerne des sections transversales d'ouvrage pouvant atteindre plus de 100 m<sup>2</sup> (alvéoles de stockage pour déchets de type B), car on ne possède qu'une expérience limitée de génie minier dans des formations argileuses comme le COX à des profondeurs d'environ 500 m. Le GRI considère que des essais appropriés de démonstration sont nécessaires.

De même, le système de ventilation proposé est régi par « l'architecture borgne » pour limiter l'écoulement d'eau dans les galeries, ce qui entraîne le regroupement des quatre puits dans un même emplacement. Le choix actuel du regroupement des puits devrait être revisité en prenant en compte les facteurs opérationnels et hydrauliques. Un test des différents aspects du système de ventilation proposé sera également nécessaire. Le GRI constate qu'un grand nombre de ces besoins est abordé dans le document du programme futur de R-D de l'Andra.

**Clarté de la documentation :** Le GRI a conclu que les différents documents composant le *Dossier 2005 Argile* présentaient une lisibilité impressionnante en tant que documents autonomes. Les documents sont des outils de communication efficaces, facilités par l'abondance et la qualité des illustrations, l'incorporation judicieuse d'encarts fournissant les détails techniques au lecteur intéressé sans couper le cours du texte et la qualité globale de la rédaction. Le document de synthèse, notamment, est de très grande qualité et se suffit à lui-même. Bien que le *Dossier 2005 Argile* soit présenté comme ayant une structure documentaire hiérarchique, le GRI a trouvé que les différents niveaux des documents ne formaient pas une hiérarchie stricte et que les informations contenues dans les documents de niveau général n'étaient pas toujours détaillées dans les documents de niveau immédiatement inférieur. Pour certains sujets, le GRI a dû examiner quelques documents plus détaillés techniquement afin d'appréhender l'approche et les résultats avec le niveau de conviction nécessaire en réponse au mandat de la revue. Le détail de la bibliographie pourrait également être amélioré.

### **Avis conclusif**

Le *Dossier 2005 Argile* réussit à établir la confiance en la faisabilité de la construction d'une installation de stockage dans les argilites du COX dans la région du LRS de Meuse/Haute-Marne :

- le *Dossier* établit une approche viable d'obtention de la réversibilité sans compromettre la sûreté opérationnelle et post-fermeture ;



- la base scientifique et technique est développée à partir de principes de base avec une grande traçabilité ;
- la méthode d'évaluation de la sûreté est solide et mise en œuvre avec pertinence ;
- la confiance en la fonction essentielle de sûreté du COX, c'est-à-dire, le contrôle du transport par la diffusion et la rétention des radionucléides, est importante, et
- l'Andra apparaît comme ayant bien intégré les défis à relever en terme d'ingénierie minière et opérationnelle et comme possédant les compétences pour y répondre.

Le *Dossier 2005 Argile* devrait fournir une base importante et pertinente d'informations pour les discussions et décisions à venir en France concernant la formulation d'une politique nationale actualisée de gestion finale des déchets radioactifs HAVL.



## 1. INTRODUCTION

### 1.1 Contexte

En France, la gestion des déchets radioactifs est un enjeu technique depuis que les premiers réacteurs ont été construits et mis en service en 1960. Dès l'origine, le stockage dans des formations géologiques profondes a été envisagé comme solution possible pour la gestion à long terme des déchets. La construction d'installations souterraines en vue de caractériser *in situ* toute formation hôte potentielle a été considérée comme la meilleure méthode pour évaluer la faisabilité du stockage géologique des déchets radioactifs.

Après les tentatives avortées du Commissariat à l'énergie atomique (CEA) pour commencer la reconnaissance géologique de quatre sites afin d'évaluer différents environnements géologiques (argile, granite, sel et schiste), le gouvernement français a décidé, en 1989, d'associer le Parlement au processus décisionnel, d'abord sous forme d'auditions, puis par l'adoption d'une loi relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs, à la fin de 1991 (République française, 1992).

La *Loi de 1991 sur les déchets* établit le cadre général de la recherche et du développement (R-D) pour la gestion des déchets radioactifs HAVL et prévoit trois axes de recherche. Elle fixe également comme date butoir l'année 2006 au cours de laquelle le Parlement devra décider de la mise en œuvre possible des solutions proposées. Conformément à ce cadre légal, l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) a été constituée comme établissement public indépendant chargé de la gestion des déchets radioactifs et mandatée spécialement pour assumer la responsabilité du deuxième axe de recherche qui consiste à étudier les « possibilités de stockage réversible ou irréversible dans les formations géologiques profondes, notamment grâce à la réalisation de laboratoires souterrains ». Les options de stockage réversible ou non devaient être examinées en vertu de la Loi de 1991, mais le gouvernement français a décidé, en 1998, qu'il faudrait privilégier une « logique de réversibilité ».

Le CEA est responsable des deux autres axes de recherche prévus par la Loi sur les déchets :

- la séparation et la transmutation, et
- le conditionnement des déchets et l'entreposage de longue durée.

La Loi de 1991 prévoit de présenter une évaluation détaillée de tous les axes de recherche en 2006. À cet effet, la Loi a aussi créé une Commission nationale d'évaluation (CNE) afin d'informer et de conseiller le gouvernement sur l'avancement des recherches du point de vue technique et scientifique.

Dans la poursuite de l'axe de recherche concernant le stockage des déchets dans des formations géologiques profondes et l'aménagement de laboratoires souterrains, une première phase lancée en 1993 a permis à une mission de consultation dirigée par un député, M. Bataille, de sélectionner quatre sites : la zone de Marcoule dans le département du Gard (formation argileuse), la zone de La-Chapelle-Bâton dans le département de la Vienne (formation granitique sous des couches sédimentaires), ainsi que deux zones comprises dans les départements de la Meuse et de la Haute-Marne (formation argileuse) dans l'est de la France et qui ont été réunies en un seul site, en 1995. À partir de 1994, l'Andra a procédé à une reconnaissance géologique et géophysique (y compris des profils sismiques 2-D) et à des forages de reconnaissance dans ces trois régions de France.

En 1996, l'Andra a déposé trois demandes d'autorisation d'installation et d'exploitation pour des laboratoires souterrains de manière à pouvoir poursuivre les programmes de R-D *in situ*. À la fin de 1998, le gouvernement français a pris une double décision politique à l'égard des projets de l'Andra :

- il a autorisé l'installation et l'exploitation d'un laboratoire souterrain de recherche (LRS) sur le site de l'Est, et
- il n'a *pas* autorisé de travaux sur les autres sites et a lancé un nouveau processus de sélection de sites sous la forme d'une autre mission de consultation afin d'identifier un site avec granite affleurant.

Après la publication du décret formalisant la décision sur le site de l'Est (août 1999), l'Andra a entrepris son programme de R-D *in situ* dans la région de la Meuse et de la Haute-Marne. La construction du LRS, situé près de la commune de Bure, a pu commencer en septembre 2000, après une campagne de sismique 3-D et la réalisation de forages supplémentaires pour caractériser les formations géologiques (et plus particulièrement la formation hôte potentielle, l'argilite du Callovo-Oxfordien [COX]) et après l'autorisation accordée le 7 août 2000 par le gouvernement de foncer les puits d'accès. La formation hôte

potentielle est horizontale et a une extension latérale de l'ordre de plusieurs dizaines de kilomètres ; elle atteint une épaisseur de 130 m sur le site du LRS et se situe à une profondeur médiane de 500 m.

Le programme de R-D de l'Andra concernant la faisabilité du stockage des déchets radioactifs de HAVL dans des formations géologiques profondes constituées d'argilite du COX dans l'est de la France est intitulé *Projet HAVL Argile*. Pour se préparer à l'évaluation complète de 2006 du gouvernement français et du parlement exigée par la Loi de décembre 1991, l'Andra a d'abord élaboré un rapport intermédiaire en 2001 pour le *Projet HAVL Argile*, le *Dossier 2001 Argile*, conduisant au *Dossier 2005 Argile* final. Ce *Dossier 2005 Argile* est une étude conclusive et une donnée d'entrée essentielle pour le processus de prise de décision politique futur en France ; il fait l'objet de la présente revue internationale par des pairs.

La méthodologie du *Dossier 2001 Argile* a été soumise à une évaluation par des pairs par une équipe internationale réunie sous l'égide de l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire en 2002-2003 (AEN, 2003).

## 1.2 Le Dossier 2005 Argile

En tant qu'élément de base pour le rapport d'évaluation global devant être rédigé par la Commission nationale d'évaluation (CNE) pour les organismes de prise de décision (gouvernement et parlement), selon les prescriptions de la Loi de décembre 1991, l'Andra a rédigé un rapport de faisabilité concernant le stockage géologique de déchets radioactifs HAVL<sup>1</sup> avec une logique de réversibilité dans la formation argileuse du COX, le *Dossier 2005 Argile*. Un rapport similaire concernant le *Projet HAVL Granite*, sur la base de données représentatives des formations granitiques françaises, mais sans site spécifique identifié, a également été produit.

Le *Dossier 2005 Argile* compile toutes les données (notamment *in situ*) et les connaissances acquises conduisant aux conclusions de l'Andra sur la faisabilité d'un stockage dans la formation argileuse du COX de la région de la Meuse/Haute-Marne. Il dresse en particulier l'inventaire des leçons tirées du

---

1. Il est important de savoir que, en France, les combustibles usés ne sont pas considérés comme des déchets. En effet, la politique sur l'aval du cycle de combustible nucléaire telle qu'elle a été définie par EDF stipule le retraitement des combustibles usés sur le site de La Hague. L'Andra a inclus les combustibles usés dans ses analyses afin de prendre en compte d'éventuels développements concernant la politique actuelle sur le cycle combustible.

rapport intermédiaire de 2001 (*Dossier 2001 Argile*) et, notamment, de la revue par des pairs effectuée en 2003 sous l'égide de l'AEN/OCDE.

Dans ce contexte, le *Dossier 2005 Argile* a le statut d'un rapport fournissant des conclusions pour le processus de prise de décision :

- il présente les connaissances et les résultats en termes de géologie locale (sur le site du LRS de Meuse/Haute-Marne) et régionale, matériaux, inventaire des déchets et radionucléides, impact sur la biosphère, phénoménologie et modélisation ;
- il décrit une conception possible du stockage avec sa construction, exploitation et fermeture avec une logique sous-jacente de réversibilité, tout en tenant compte de la sûreté opérationnelle ;
- il fournit une évaluation de sûreté complète contenant la définition et la décomposition des fonctions de sûreté, l'analyse des évolutions temporelles potentielles du système qui conduit à la modélisation numérique et une gestion structurée des incertitudes ;
- il expose les perspectives des futurs travaux complémentaires de recherche et d'analyse, au cas où le gouvernement approuverait le projet de développement du stockage, et
- il fournit un des éléments de base du rapport global d'évaluation que doit préparer la Commission nationale d'évaluation qui compilera les progrès de la recherche effectuée jusqu'ici pour les trois voies de R-D prévues par la Loi sur les déchets de décembre 1991.

Le *Dossier 2005 Argile* est donc conclusif et constitue une donnée d'entrée essentielle pour le futur processus de prise de décision politique.

Il faut toutefois noter que, bien qu'établissant la faisabilité technique et la sûreté du stockage et, de ce fait, ouvrant la voie au processus de prise de décision pour une sélection de site, le *Dossier 2005 Argile* ne prend pas en compte :

- l'optimisation, par exemple, en termes de concepts, coût et sûreté ;
- l'implantation géographique exacte (à la surface et sous terre), par exemple, en termes d'emplacements des installations et bâtiments, accès par la route et transport, et
- certains problèmes scientifiques pour lesquels l'évaluation complète n'a pas encore été effectuée, mais dont une appréciation globale est fournie ; cela inclut, par exemple, le comportement à long terme qui a été évalué indirectement (via la modélisation et les données acquises au niveau échantillon) étant donné que certaines données expérimentales acquises dans le LRS proviennent d'expériences de courte durée.

Mais surtout, le *Dossier 2005 Argile* ne participe ni d'un processus de sélection d'un site de stockage dans la région de Bure, ni d'un processus d'autorisation réglementaire. De ce fait, il n'a pas pour objectif de démontrer la conformité à la réglementation.

Le *Dossier 2005 Argile* comprend un document de synthèse global, trois documents généraux et de nombreux rapports justificatifs.

### **1.3 Organisation de la revue internationale par des pairs**

Le gouvernement français souhaite que le *Dossier 2005 Argile* soit lu et débattu par un vaste auditoire avec l'objectif général de déclencher un débat et d'instaurer la confiance. De ce fait, le gouvernement français a considéré qu'il est essentiel de soumettre cet important rapport à une revue par une équipe indépendante d'experts internationaux. L'expérience fructueuse des revues antérieures de l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN), dont la revue par des pairs du *Dossier 2001 Argile*, a conduit les autorités françaises à solliciter l'AEN pour l'organisation d'une revue par des pairs du récent *Dossier 2005 Argile* de l'Andra.

Le groupe de revue international (GRI) a été composé de manière indépendante par l'AEN. Pour préserver cette indépendance et éviter les conflits d'intérêt, les experts choisis ne pouvaient pas être et n'ont pas été impliqués (en tant que consultants, experts ou contractants, par exemple) dans les activités de l'Andra contribuant directement au *Dossier 2005 Argile*. L'équipe de revue par des pairs a été choisie de manière à avoir une large composition internationale. Les membres de l'équipe ont été choisis de manière à apporter une expérience en ce qui concerne les évaluations de sûreté à long terme (y compris du point de vue des autorités de sûreté nucléaire), les formations argileuses, la conception technique et les problèmes d'exploitation, ainsi que les domaines techniques de première importance. La plupart des membres du GRI avaient également participé à la précédente revue par des pairs du *Dossier 2001 Argile* de l'Andra. L'annexe 1 de ce rapport donne la liste des membres du GRI avec de brèves notes biographiques. Un document récent de l'AEN (AEN, 2005) fournit des informations sur la nature des revues par des pairs organisées par l'AEN dans le domaine de la gestion des déchets radioactifs. Les directives générales décrites dans ce document ont été respectées pour la revue par des pairs du dossier de l'Andra, comme cela avait été le cas pour les revues précédentes.

## 1.4 Mandat

Comme énoncé dans le mandat, la revue par des pairs doit indiquer aux autorités françaises (Ministère de l'Industrie et Ministère de la Recherche) si le *Dossier 2005 Argile* est :

1. en accord avec les pratiques internationales et avec les autres programmes de stockage nationaux en particulier ceux concernant les formations argileuses, et
2. si les futurs besoins de recherche sont cohérents avec le corpus des connaissances disponibles et si les priorités étaient bien identifiées.

Les autorités françaises étaient particulièrement intéressées par des recommandations détaillées concernant des améliorations spécifiques qui pourraient être apportées à cet effet, notamment si le processus de prise de décision conduit à une phase de sélection d'un site de stockage.

L'évaluation était destinée à vérifier que le *Dossier 2005 Argile* s'appuyait sur des bases solides et était développé de manière compétente en termes d'approche, de méthodologie et de stratégie. Les éléments spécifiques de la revue comportaient :

- la stratégie globale d'évaluation de la sûreté à long terme ;
- la fiabilité scientifique et technique des méthodologies appliquées pour la sûreté à long terme ;
- la fiabilité de l'approche relative à la réversibilité ;
- le bien-fondé, en termes de raisonnement, des conclusions de l'étude, et
- la clarté de la documentation grâce à sa structure et sa synthèse.

De plus, le mandat prévoyait que les examinateurs prêtent une attention toute particulière aux aspects techniques, tels que :

- la modélisation géologique et hydrogéologique du COX et de ses formations encaissantes (situation actuelle et situation future prévue) ;
- la base scientifique de la représentation des processus et des fonctions de barrière (phénomènes majeurs tels que thermiques, hydrauliques, mécaniques, chimiques (THMC), dans le stockage à différentes échelles de temps) ;
- l'approche relative à la production de gaz et à son transfert ;
- la clarté et la traçabilité de la présentation des données, modèles et arguments ;



- la méthodologie de l'analyse de sûreté à long terme, avec une attention spécifique au traitement des données et incertitudes des modèles et à la dérivation de scénarios, et
- le choix de l'architecture et des solutions d'ingénierie et de gestion du stockage en ce qui concerne les exigences de conception ou les spécifications du système<sup>2</sup>.

Il peut être fait référence, lorsque cela est pertinent, aux conclusions de la revue par des pairs du précédent *Dossier 2001 Argile* effectuée sous l'égide de l'AEN/OCDE.

Le mandat spécifiait que l'évaluation par les pairs devait se concentrer sur quatre documents de base du *Dossier 2005 Argile* :

- le rapport de synthèse et
- les trois tomes généraux principaux, chacun traitant d'aspects spécifiques de l'étude de faisabilité :
  - l'architecture et la gestion du stockage géologique (TAG) ;
  - l'évolution phénoménologique du stockage géologique (TEP), et
  - l'évaluation de sûreté du stockage géologique (TES).

Les documents qui ont été soumis à revue par le GRI sont beaucoup plus nombreux et sont listés dans l'annexe 2. En particulier, pour remplir son mandat, le GRI a examiné des documents externes au *Dossier*, à savoir le document concernant le programme de R-D [9]<sup>3</sup> pour une nouvelle phase de travail potentielle couvrant la période 2006-2010<sup>4</sup>.

## 1.5 Conduite de la revue

Le GRI s'est réuni pour la première fois dans les bureaux de l'Andra à Châtenay-Malabry et sur le site du LRS de Meuse/Haute-Marne du 24 au 27 mai 2005. Pendant ces quatre jours, le personnel de l'Andra a présenté un

- 
2. Il faut noter que l'architecture du stockage proposée avec ses concepts de stockage et les options d'ingénierie qui s'y rapportent, notamment en termes de sûreté opérationnelle, ne doivent pas être considérées comme optimisées. Ces concepts sont encore optionnels au stade actuel, ont été choisis à l'aide d'une première approche préliminaire de type multicritère et servent de base à l'étude de faisabilité.
  3. Les numéros entre crochets (par exemple, [7]) font référence aux documents examinés énumérés dans l'annexe 2.
  4. Ce programme de R-D postérieur à 2005 a été présenté au GRI dans une version de travail provisoire.

aperçu du *Dossier 2005 Argile*. Un représentant des ministères français a également exposé le point de vue du gouvernement sur le contexte des études menées en France dans le domaine de la gestion des déchets radioactifs HAVL et l'objectif de la revue. Le GRI a également discuté du mandat relatif à la revue et de la répartition du travail parmi les membres de l'équipe de revue.

Des documents de niveau plus détaillé ont été examinés, lorsque le GRI l'a jugé nécessaire. Certains ont dû être traduits en anglais. De façon globale, le GRI a examiné plus de 5 000 pages de texte. Au cours du processus de revue, le GRI a posé par écrit des questions à l'Andra auxquelles celle-ci a également répondu par écrit. Un séminaire de revue par des pairs d'une semaine s'est tenu du 14 au 18 novembre 2005 au cours duquel les questions en suspens identifiées par le GRI ont été discutées en tête-à-tête avec les équipes de l'Andra. Le GRI confirme que toute information nécessaire a été mise à sa disposition pour lui permettre de remplir son mandat.

## **1.6 Organisation du rapport**

La présentation du contexte, du *Dossier 2005 Argile*, du mandat et de la conduite de la revue a été faite dans les paragraphes précédents du présent chapitre.

Le chapitre 2 traite de la cohérence du programme scientifique de l'Andra avec les meilleures pratiques internationales en général et spécifiquement avec les autres programmes nationaux concernant les milieux argileux. Il traite également de la cohérence des futurs domaines de recherche identifiés par l'Andra avec le corpus des connaissances disponibles.

Le chapitre 3 est destiné aux lecteurs plus intéressés techniquement et présente les observations détaillées sur des aspects spécifiques du *Dossier 2005 Argile*. Ses paragraphes sont structurés en fonction des différentes disciplines qui ont contribué au *Dossier 2005 Argile*, notamment celles concernant la qualité du corpus technique et scientifique du travail entrepris.

Le chapitre 4 comporte un résumé des conclusions générales, qui sont considérées importantes en tant que contribution requise pour le processus de prise de décision à venir.

Le destinataire de référence du présent rapport est le gouvernement français. Les autres institutions, organisations, sociétés et parties généralement intéressées par la gestion des déchets peuvent également en profiter. Le présent rapport de revue suppose que le lecteur est au moins familier avec les objectifs et le contenu du *Dossier 2005 Argile* en général, mais pas nécessairement avec tous les détails de la documentation.

## 2. CONCLUSIONS DÉTAILLÉES CONCERNANT L'OBJECTIF GLOBAL DE LA REVUE

L'objectif global de la revue par des pairs était d'indiquer aux autorités françaises si le *Dossier 2005 Argile* était (i) en accord avec les pratiques internationales et avec les autres programmes nationaux de stockage, en particulier ceux concernant les formations argileuses et (ii) si les futurs besoins de recherche étaient cohérents avec le corpus des connaissances disponibles et si les priorités avaient été bien identifiées. Ces questions sont traitées dans le présent chapitre.

### 2.1 Cohérence avec les pratiques internationales

*Le GRI a conclu que le programme scientifique de l'Andra était largement en accord avec les meilleures pratiques internationales et, dans plusieurs domaines, était à l'avant-garde des programmes de gestion des déchets.*

Le GRI pense que la méthodologie utilisée par l'Andra pour évaluer la sûreté à long terme est en accord avec l'état de l'art en la matière. L'Andra a développé ses propres méthodes pour traiter certains aspects, à savoir comment appréhender la phénoménologie avec une décomposition dans l'espace et dans le temps à l'aide de l'APSS, comment utiliser les méthodes formelles pour en déduire les fonctions de sûreté (et autres) et comment vérifier la gestion des incertitudes *a posteriori* (AQS). De l'avis du GRI, ces aspects accroissent la fiabilité de l'évaluation de sûreté en abordant les problèmes sous différents angles et en utilisant l'expertise de différentes équipes ce qui permet de diminuer les biais. Ils contribuent aussi de manière significative à la traçabilité des informations au sein de l'Andra et potentiellement aussi lors de l'examen par les autorités de sûreté.

Le GRI pense que les approches fondées sur l'utilisation de fonctions de sûreté, comme celle choisie par l'Andra, sont en accord avec les meilleures pratiques internationales. La façon dont l'Andra traite les fonctions de sûreté est parmi les plus systématiques de celles utilisées internationalement. Certains aspects, à savoir les outils plutôt formalisés pour décomposer les fonctions

(l'analyse fonctionnelle) qui dérivent des méthodes industrielles normalisées, gagneraient à être l'objet de discussions et comparaisons avec d'autres méthodes dans un contexte international, afin de mieux étudier leurs avantages et leurs limites.

La modélisation hydrogéologique 3-D de l'Andra, tant à l'échelle du bassin qu'à celle du secteur, est à la pointe des programmes de gestion des déchets. Le programme de catalogage des échantillons carottés, de diagraphies et de tests par l'Andra établit une norme que peu d'autres programmes peuvent égaler. Sa compréhension de l'histoire géologique du site de Meuse/Haute-Marne est comparable aux meilleures pratiques de tout autre programme. Toutefois, le fait, attribuable à des contraintes de temps et aux procédures d'autorisation correspondantes, que l'Andra n'a pas pu maintenir tous les forages d'exploration et d'essai comme puits d'observation à long terme est malheureux. Il en résultera probablement un travail additionnel significatif, si de nouveaux forages doivent être réalisés pour compléter un réseau d'observation conformément aux meilleures pratiques internationales.

Du fait de l'application internationalement acceptée des méthodes utilisant les familles de l'uranium pour la caractérisation de sites, le GRI estime que cette analyse aurait dû être effectuée plus tôt dans le programme (comparé aux efforts faits pour utiliser des profils isotopiques « exotiques » comme  $^{81}\text{Kr}$ ,  $^{7/6}\text{Li}$ ). Toutefois, le GRI félicite l'Andra pour l'emploi de la méthode du déséquilibre radioactif dans les familles de l'uranium, sur plusieurs échantillons du COX issus de deux forages du secteur de Meuse/Haute-Marne et recommande sa mise en œuvre systématique pour vérifier que cet équilibre sur une base séculaire est présent en tous points de l'argilite du COX. Cela fournirait à l'Andra une observation exhaustive du type « analogue naturel » pour démontrer l'immobilisation de l'uranium provenant des déchets sur le site de Meuse/Haute-Marne.

L'analyse des processus de dissolution des déchets vitrifiés de haute activité et des déchets B, ainsi que les modèles résultants, sont particulièrement impressionnants et à l'avant-garde des études internationales. Les options alternatives pour la modélisation conceptuelle de la dissolution du verre sont clairement décrites et leur application à différents types de verre est tout à fait élaborée. Le modèle de dégradation des déchets de type B2 (déchets bitumineux) illustre clairement qu'un impressionnant travail sous-jacent de caractérisation a été effectué, en combinaison avec une modélisation élaborée. Globalement, les investigations dans ces domaines sont en avance par rapport aux autres programmes.

## 2.2 Cohérence avec les autres programmes nationaux concernant les formations argileuses

### *Approche globale de sûreté et de conception*

L'approche globale de sûreté et conception est cohérente avec les stratégies adoptées dans d'autres programmes de stockage nationaux fondés sur une roche hôte argileuse, particulièrement en ce qui concerne :

- l'accent porté sur la formation hôte pour la sûreté à long terme (à long terme, la rétention des radionucléides dans le COX éclipse les fonctions de toutes les autres barrières) ;
- le fait d'éviter (ou réduire au minimum) les perturbations THMC de la formation hôte pour que les fonctions (transport dominé par la diffusion, rétention, stabilité et capacités d'atténuation) attribuées au COX puissent être assurées comme prévu ; à cet effet, la construction de l'installation de stockage dans le plan médian de la formation pour maximiser l'épaisseur utile du COX est similaire aux autres programmes, et
- la modularité pour réduire les interactions entre les diverses parties de l'installation de stockage et entre les divers types de déchets. Le GRI note de manière positive que l'Andra a appliqué l'approche modulaire de manière plus systématique et a développé ce concept de manière plus poussée que dans les autres programmes nationaux.

Toutefois, dans la mise en œuvre détaillée de cette approche, certaines différences avec les autres programmes nationaux apparaissent :

- la taille, la complexité, et la durée de l'exploitation (due notamment aux dispositions pour la réversibilité) des installations de stockage sont beaucoup plus grandes que dans la plupart des autres programmes. En conséquence, une longue période opérationnelle augmentera presque certainement l'étendue des perturbations, comme l'oxydation de la pyrite de la zone perturbée, provoquée dans le COX, bien que légèrement par rapport aux perturbations précoces inévitables et communes à tout autre programme. Cela peut retarder la resaturation du COX et donc l'autocicatrisation des fractures et diaclases présentes dans la zone perturbée (induites lors des travaux d'excavation) ;
- le taux de production de gaz par unité de déchets stockés dépasse considérablement celui des autres concepts de stockage en milieu argileux, principalement à cause de la superficie supplémentaire de métal introduite avec les revêtements des alvéoles de stockage. Comme la production et le transport de gaz dans les stockages posent un important

problème de communication, de nombreuses études et coopérations approfondies avec d'autres organisations seront nécessaires pour s'assurer que les raisons des différences d'approche sont bien comprises et communiquées, et

- la complexité des opérations souterraines semble être plus grande que pour les concepts proposés dans d'autres programmes de stockage en milieu argileux, en particulier l'obligation d'avoir une ingénierie de précision associée aux opérations nucléaires en milieu souterrain. En particulier, la mise en place télé-opérée des colis de haute activité et de combustible usé, avec un robot poussant les colis à l'intérieur d'un tube métallique de petit diamètre, est un concept unique avec de nombreux défis de développement.

Ces différences sont simplement notées par le GRI et ne devraient pas poser aucune difficulté insurmontable.

#### *Migration des radionucléides et compréhension du COX*

En ce qui concerne la migration des radionucléides, l'Andra a acquis un grand volume de données sur les mesures en batch de la sorption au cours de la période 2001-2005, comparable à celui des autres programmes nationaux. Parallèlement à ces expériences en laboratoire, l'Andra a développé et continuera à développer une caractérisation détaillée à l'échelle nanométrique de la structure des pores du COX, ainsi qu'une compréhension plus mécanistique des interactions entre la roche et l'eau. Les approches et techniques de l'Andra sont en accord avec les développements les plus récents dans ces domaines.

Une caractéristique du *Dossier 2005 Argile* est la quantité limitée d'information provenant d'expérimentations de longue durée dans le LRS de Meuse/Haute-Marne. Cela est bien sûr lié au stade de développement du LRS de Meuse/Haute-Marne au moment de la rédaction du présent rapport, et ne peut donc pas être critiqué<sup>5</sup>. La disponibilité limitée des informations du LRS de Meuse/Haute-Marne a été compensée, d'une part, par les données acquises dans les forages et lors du fonçage des puits et, d'autre part, par un « transfert » efficace de connaissance du projet Mont Terri dans l'argile à Opalinus, en Suisse, au programme de l'Andra. Les essais directs par l'Andra au Mont Terri des montages expérimentaux et de leurs outils d'interprétation en prévision de leur application dans le LRS de Meuse/Haute-Marne, ainsi que la formation efficace des équipes expérimentales de l'Andra, lui ont permis d'optimiser

---

5. L'Andra a assuré le GRI que toutes les nouvelles informations utiles acquises dans le LRS seront incorporées dans la deuxième version du *Dossier 2005 Argile* qui devrait être disponible pour publication en décembre 2005.

rapidement l'utilisation du LRS de Meuse/Haute-Marne. De plus, l'Andra a pris soin de justifier la validité du transfert à l'aide d'une comparaison systématique du COX sur le site de Meuse/Haute-Marne et de l'argile à Opalinus au Mont Terri (*Analyse comparée des contextes géologiques et pétrographiques avec l'argile à Opalinus Mont Terri (Suisse)*, annexe au *Référentiel du site de Meuse/Haute-Marne*) [7].

Une comparaison couvrant les autres programmes et thématiques peut davantage étayer le dossier de l'Andra en aidant à mieux comprendre les spécificités et les différences :

- du COX vis-à-vis des autres formations hôtes argileuses, et
- de la stratégie de l'Andra pour la sûreté et la conception par rapport aux autres programmes.

### **2.3 Cohérence des besoins futurs de recherche avec les connaissances disponibles**

En général, le programme de travail proposé par l'Andra constitue un ensemble bien planifié et complet de tests en laboratoire et *in situ*, combiné à une modélisation appropriée qui devrait permettre à l'Andra de passer avec succès à la sélection du site. L'Andra a réalisé un travail approfondi d'identification des futurs besoins de recherche en accord avec le corpus de connaissances disponibles, bien que l'établissement de priorités pour ces besoins ne soit pas abordé dans le document du programme technique et scientifique correspondant [9].

Le programme scientifique et technique proposé HAVL-Argile 2006-2010 [9] établit un lien permanent entre les « connaissances déjà acquises » et les futurs « projets » visant à réduire les incertitudes les plus importantes ou à répondre à des manques de connaissance. Tout en reconnaissant la nature préliminaire et provisoire de ce document et son statut de document prévisionnel développé par l'Andra pour établir la continuité du travail de R-D, on note que des parties du document sont peu claires et le GRI suggère la prise en compte des points suivants dans sa version future :

- les nombreux recoupements entre les différentes sections (par exemple, les sections 4.4.1, 4.4.2.2 et 4.4.2.3 proposent d'étudier les structures des pores et les effets de la charge superficielle de l'argile ; le lecteur doit étudier de nombreuses sections pour avoir un aperçu de ce qui est prévu en ce qui concerne la matière organique naturelle et l'évaluation de son rôle pour la mobilité des radionucléides), et

- le mélange dans le même paragraphe de considérations sur la compréhension du COX non perturbé et du transport des radionucléides en son sein, ainsi que sur les effets des diverses perturbations (hydrogène dû à la corrosion, produits de dégradation de la cellulose, etc.). Cela est plutôt confus, surtout parce que la logique justifiant la prise en compte de perturbations spécifiques n'est pas toujours claire.

En mettant en regard le travail proposé avec les recommandations du GRI données dans la section 3, les observations suivantes sont notées :

- le travail proposé sur la matière organique présente naturellement dans le COX couvre l'influence possible de la matière organique sur l'équilibre entre le fluide et la roche, ainsi que sur la spéciation, la complexation et le transport des radionucléides. Ceci est de particulière importance pour étayer l'observation préliminaire de rétention d'iode dans le COX. Ce travail correspond donc aux recommandations du GRI ;
- l'Andra propose également d'évaluer le rôle, en tant qu'agent complexant, des produits de dégradation de la matière organique présente dans les déchets. Cela est de première importance pour les déchets cimentés B qui peuvent contenir de la cellulose. La logique d'orientation des travaux concernant les ligands organiques exogènes sur les produits de dégradation de la cellulose, alors que d'autres types de déchets contiennent de la matière organique, est justifiée par le fait que l'Andra considère ces produits comme particulièrement préjudiciables en comparaison du comportement d'autres ligands dans un système de matériaux cimentaires ;
- la compréhension fondamentale de l'Andra de l'évolution de la roche hôte et des interactions entre l'eau et les minéraux est déjà très développée. L'Andra va poursuivre ce travail (par exemple, via une représentation conceptuelle de la double couche électrostatique pour mieux comprendre l'exclusion anionique, la caractérisation poussée des géométries et propriétés de l'espace poral à l'échelle nanométrique, une compréhension approfondie de la diagénèse du COX au niveau minéral, et l'analyse isotopique des espèces minérales néoformées). Conformément au travail de caractérisation détaillée, l'Andra va chercher à développer une interprétation mécanistique des phénomènes de rétention chimique dans le COX. À cet effet, l'Andra tirera profit de sa compréhension actuelle (et future prévue) d'un milieu « plus simple » (en particulier, la bentonite devant être utilisée comme barrière ouvragée). Du point de vue scientifique, ces efforts sont à l'avant-garde. La participation de l'Andra au projet FUNMIG de l'Union européenne devrait permettre une comparaison des différentes



approches utilisées pour définir les paramètres de transport à grande échelle dans les argiles ;

- le GRI note également de manière positive :
  - l'intégration progressive des données de diffusion et géochimiques *in situ* collectées dans le LRS de Meuse/Haute-Marne (expérience PAC [prise d'échantillons d'eau pour analyses chimiques et isotopiques], expérience DIR [diffusion et rétention dans l'argilite]) afin d'étayer les données de laboratoire ;
  - les campagnes sismiques 2-D et 3-D prévues sur un secteur plus vaste dans la zone de transposition ;
  - la réalisation prévue de forages supplémentaires avec essais et modélisation visant à développer une meilleure compréhension de l'hydrodynamique du Dogger et de l'Oxfordien ;
  - la vérification de la validité pour toute la zone de transposition des paramètres de rétention établis pour le site de Meuse/Haute-Marne, et
  - l'évaluation préliminaire prévue de la capacité de rétention des formations encaissantes du COX (établissement de marges de sûreté) ;
- en sus de l'expérience DIR, il pourrait être intéressant, pour étayer davantage le caractère diffusif du transport à travers le COX, d'effectuer des expériences de traceurs *in situ* à long terme (>10 ans) et à grande échelle (échelle décimétrique à métrique). Pour conforter cette conclusion avec un ensemble de lignes d'argumentation multiples, il serait souhaitable d'utiliser un montage expérimental différent de celui utilisé dans l'expérience DIR ;
- la rétention des radionucléides au voisinage immédiat des colis, et dans le champ proche en général, n'est habituellement (et de façon conservative) pas prise en compte. L'Andra prévoit des travaux d'envergure sur le comportement des radionucléides en contact avec (i) les produits de corrosion métalliques du complément de colisage à base de fer et les produits d'altération des matrices de déchets et (ii) le béton, dont le béton dégradé par le temps. Grâce à ses travaux prévus sur ce sujet, l'Andra devrait pouvoir définir une représentation plus réaliste du comportement des radionucléides au voisinage immédiat des colis. Cela devrait renforcer la confiance en la capacité de rétention du voisinage immédiat des colis dégradés et doit être recommandé car cela aide à établir des marges de sûreté supplémentaires ;
- le GRI n'a pas pu déterminer la quantité de travail que l'Andra propose pour obtenir une meilleure couverture des profils de diffusion de

la zone de transposition. Le programme scientifique et technique 2006-2010 [9] suggère que plus de données seront disponibles, mais il n'indique pas si plus de profils seront de fait obtenus au cours des futurs travaux. Identifier la zone de transposition comme une zone où la diffusion dans le COX est le seul mécanisme de transport sera important pour obtenir l'approbation d'un site ;

- l'Andra devrait également chercher à mieux comprendre la cause du phénomène de surpression dans le COX. L'osmose est généralement mentionnée comme futur sujet de recherche, mais aucun plan spécifique n'est indiqué ;
- le GRI regrette l'absence apparente de travaux supplémentaires sur l'utilisation de la concentration en uranium et des rapports isotopiques dans l'eau de la formation pour renseigner sur les conditions rédox et la mobilité naturelle de l'uranium sur une échelle de temps d'un million d'années ;
- les rôles potentiels de l'activité microbienne n'ont pas été complètement étudiés à ce jour et le GRI approuve le programme proposé par l'Andra, à la fois sur les micro-organismes introduits lors des opérations de stockage et sur ceux préexistants dans le COX, pour traiter ce sujet ;
- l'Andra devrait développer une méthode pour intégrer la gestion du gaz dans le processus de conception du stockage afin de répondre à cet aspect important des futures études d'optimisation, et
- le GRI a conclu que les plans pour effectuer les calculs probabilistes et les analyses de sensibilité globales, présentés par l'Andra au cours de l'évaluation, possèdent les éléments essentiels d'un calcul probabiliste. De plus, le niveau d'élaboration de l'approche probabiliste semble approprié.

Le GRI fait également les observations et recommandations suivantes :

- le GRI note que la plupart des programmes internationaux de stockage de déchets radioactifs recherchent des analogues naturels pour étayer et instaurer la confiance dans le stockage sur un site particulier. L'utilisation actuelle et future d'analogues naturels pour étayer le dossier de l'Andra n'est pas très apparent, que ce soit dans le TEP ou dans le programme scientifique et technique 2006-2010 [9], bien que l'Andra ait toutefois participé à des programmes internationaux d'analogues naturels. L'Andra devrait mieux argumenter son avis en ce qui concerne l'utilisation (ou non) d'analogues naturels ;

- l'Andra devrait déterminer si la perturbation oxydante provenant du relâchement de nitrates par les déchets B bitumineux peut s'étendre hors des alvéoles de stockage et avoir un impact sur le COX ;
- dans le cadre de son futur programme, l'Andra devrait développer un réseau de forages d'observation hydrogéologique à long terme à l'échelle du secteur. Ce type de réseau doit être mis en place, pour développer un état de référence, quelques années avant le début de la construction d'un stockage ;
- le GRI suggère que la documentation à venir mette beaucoup plus l'accent sur les caractéristiques favorables de rétention du COX et leur rôle essentiel pour garantir la sûreté à long terme. Cela devrait inclure une présentation claire d'utilisation de lignes d'argumentation multiples pour définir les caractéristiques de sorption du COX, ainsi que d'utilisation d'hypothèses conservatives, et
- bien que le modèle hydrogéologique actuel soit adéquat pour démontrer que tout relâchement de radionucléides dans l'environnement serait inférieur aux niveaux réglementaires, la confiance en la modélisation pourrait être accrue en la rendant plus réaliste. L'Andra devrait envisager d'intégrer directement le maillage du modèle hydrogéologique du secteur, où les propriétés hydrauliques sont établies à partir des investigations sur le terrain, dans le modèle hydrogéologique régional (bassin) afin de définir les conditions aux limites (latérales et verticales) qui seront utilisées pour la modélisation du secteur. La calibration devrait essayer de se caler sur la piézométrie observée avec un niveau de précision supérieur à celui obtenu jusqu'ici. Il pourrait être envisagé un traitement stochastique de l'incertitude des paramètres, créant plusieurs schémas possibles de la distribution de la perméabilité pour chaque couche importante. Après l'obtention de calibrations acceptables, le modèle secteur révisé devrait être réincorporé dans le modèle régional pour vérifier que les conditions aux limites utilisées pour la modélisation à l'échelle du secteur restent valables. Enfin, plusieurs réalisations des modèles monocouches Dogger et Oxfordien devraient être créées pour générer des distributions de voies de migration et de temps de transport. Les résultats de ces modèles devraient être comparés, au moins de manière générale, aux variations géochimiques observées dans le Dogger et l'Oxfordien (concentrations en Cl, par exemple) en tant que moyen supplémentaire de démontrer la cohérence conceptuelle globale.



### **3. CONCLUSIONS DÉTAILLÉES DE LA REVUE CONCERNANT DES ASPECTS TECHNIQUES SPÉCIFIQUES**

Le mandat précisait que les aspects techniques spécifiques du *Dossier 2005 Argile* devaient être soumis à revue. Les sujets qui devaient finalement faire l'objet d'une revue détaillée ont été affinés suite aux discussions avec l'Andra et les autorités françaises au cours de la première réunion en mai 2005. Les aspects spécifiques revus sont les suivants :

- la modélisation géologique, hydrogéologique et du transport dans le COX et ses formations encaissantes (situation actuelle et situation future prévue) ;
- la base scientifique de la représentation des processus et des fonctions de barrière (phénomènes majeurs tels que thermiques, hydrauliques, mécaniques, chimiques (THMC) et les modèles de relâchement des colis dans le stockage à différentes échelles de temps) ;
- l'approche relative à la production de gaz et son transfert ;
- la méthodologie de l'analyse de sûreté à long terme, avec une attention spécifique au traitement des données et incertitudes des modèles et sur la dérivation de scénarios, et
- le choix de l'architecture et des solutions d'ingénierie et de gestion du stockage en ce qui concerne les exigences de conception ou les spécifications du système.

#### **3.1 Géologie, hydrogéologie et transport dans le COX et les formations encaissantes**

D'après les résultats présentés dans le *Dossier 2001 Argile* et les conclusions et recommandations de la revue par des pairs de l'AEN en 2003, la revue de 2005 était orientée principalement sur les mécanismes de transport dans le COX, et notamment sur la prépondérance de la diffusion comme mécanisme de transport et sur la capacité de rétention de l'argile, ainsi que sur la modélisation hydrogéologique. La caractérisation géologique globale du COX, de son évolution antérieure (enfouissement, diagénèse, etc.) et de son évolution future

possible était déjà très détaillée et bien établie dans le *Dossier 2001 Argile*. Toutefois, les performances du COX en tant que barrière à la migration des radionucléides y étaient peu étayées. La modélisation hydrogéologique des formations encaissantes avait également été considérée comme insuffisante lors de la revue de 2003.

La documentation présentée dans le TEP et le *Référentiel du site de Meuse/Haute-Marne* [7] est, du point de vue des sciences de la Terre, exhaustive et impressionnante. La qualité des bases scientifiques du programme de l'Andra en ce qui concerne la caractérisation de la formation hôte et de ses encaissants est considérée comme excellente, même en comparaison avec le bon niveau atteint dans les autres programmes nationaux. Le GRI note, en particulier, l'effort important fait par l'Andra pour fournir des illustrations graphiques claires des informations et concepts géologiques dans le TEP et le *Référentiel du Site de Meuse/Haute-Marne*. Certaines imperfections de la documentation sont, toutefois, soulignées ci-dessous.

### **3.1.1 Avancées majeures des connaissances depuis le Dossier 2001 Argile**

Le GRI note que l'Andra a poursuivi intensivement la caractérisation de la formation du Callovo-Oxfordien (COX) et des formations encaissantes, à la fois à l'échelle du site (LRS de Meuse/Haute-Marne et son voisinage immédiat) et à l'échelle du secteur (zone de transposition) :

- de nouveaux forages réalisés à l'échelle du secteur (*forage scientifique profond* – FSP) ont permis d'améliorer la caractérisation des propriétés hydrauliques et chimiques des formations du Dogger et de l'Oxfordien, ainsi que d'affiner la définition de la zone de transposition, et
- les forages déviés (*forage de reconnaissance de la formation* – FRF) réalisés sur le site de Meuse/Haute-Marne étaient d'un haut niveau technologique. Ils confirment la continuité lithologique verticale et latérale, et l'homogénéité du COX à l'échelle du site ainsi que l'absence de possibilités de convection d'eau dans le COX sur le site de Meuse/Haute-Marne.

Ce travail de caractérisation supplémentaire a conduit à une représentation impressionnante de la stratigraphie et des propriétés hydrauliques du COX et de ses formations encaissantes en une modélisation 3-D complexe, tant à l'échelle du bassin qu'à celle du site.

Le GRI note également de manière positive l'amélioration importante de la confiance en la haute performance du COX en tant que barrière à la

migration de radionucléides et autres produits chimiques toxiques vers le milieu environnant et la biosphère. Cette confiance a été atteinte en utilisant des approches multiples et complémentaires combinant des expériences en laboratoire, des résultats préliminaires de mesures *in situ* au LRS de Meuse/Haute-Marne, différentes approches de modélisation, des observations naturelles (surpressions, profils naturels isotopiques et élémentaires), des analogies avec les connaissances acquises dans des milieux argileux ouvragés relativement plus simples (bentonite) et la caractérisation de l'espace poral à petite échelle.

Ces avancées du point de vue des connaissances depuis le *Dossier 2001 Argile* sont conformes aux recommandations de la revue par des pairs de l'AEN de 2003.

### **3.1.2 Confirmation du transport contrôlé par la diffusion dans le COX**

Un certain nombre d'arguments et d'observations physiques/chimiques étayent ou confirment la prépondérance de la diffusion comme mécanisme de transport des solutés dans le COX. Ces aspects sont résumés ci-dessous.

#### *3.1.2.1 Forages déviés*

Depuis le *Dossier 2001 Argile*, un grand nombre de forages réalisés sur le site de Meuse/Haute-Marne ont été déviés afin de pénétrer dans le COX avec un angle subhorizontal ce qui augmente leur intersection avec les couches horizontales des lithologies du COX. Ces forages déviés ont également été orientés par rapport au champ de contrainte local pour assurer la plus grande probabilité de rencontrer toute structure géologique verticale ou subverticale (e.g., failles, fractures) pouvant être présente et conduire l'eau. Le GRI approuve l'utilisation de cette technique, qui a été développée par l'industrie pétrolière, pour fournir le maximum d'information sur les aspects géologiques. Les résultats ont montré qu'il y avait une absence remarquable de ces types de structures conductrices d'eau dans le COX, ce qui étaye donc les arguments de l'Andra concernant l'homogénéité et la faible perméabilité du COX sur le site du LRS de Meuse/Haute-Marne.

#### *3.1.2.2 Profils élémentaires et isotopiques*

La démonstration de la diffusion comme étant le principal mécanisme de transport des solutés dans le COX est primordiale vis-à-vis du concept de stockage et importante pour garantir la sûreté à long terme. Plusieurs profils d'éléments chimiques (comme les ions) et d'isotopes choisis avec des hypothèses

conservatives se sont révélés utiles pour identifier le transport par diffusion dans le COX. Le principal paramètre utilisé a été la concentration en chlore (Cl) des fluides interstitiels dans des échantillons carottés des forages verticaux interceptant le COX. Les modifications progressives des concentrations en Cl dans les fluides interstitiels se sont révélées correspondre au modèle décrivant le transport par diffusion dans une matrice rocheuse à faible perméabilité. Dans le TEP, la preuve en est fournie sous forme de profils de Cl verticaux pour cinq forages. Alors que trois des profils montrent nettement la prédominance de la diffusion, allant d'environ 4 000 mg/L dans le Dogger à 1 000 mg/L dans l'Oxfordien, les résultats des deux autres forages ne présentent qu'une modification mineure de la concentration en Cl.

Les faibles concentrations en Cl des eaux de formation du Dogger à certains endroits n'étaient pas initialement prévues et pourraient être interprétées comme une indication d'écoulement convectif et de dilution par la recharge qui pénètre le Dogger via la fracturation située au sud-ouest de la zone de transposition. L'Andra indique que tous les profils de concentration en Cl des fluides interstitiels à chaque endroit, dilués ou salins, sont caractéristiques de processus contrôlés par la diffusion, parce que les concentrations en Cl dans les fluides de la formation Dogger sous-jacente sont encore supérieures à celles du COX et de l'Oxfordien sus-jacent. L'Andra attribue la présence de fluides dilués dans le Dogger à l'entrée d'eau de recharge à une période antérieure (il y a plus de 40 000 ans) bien qu'il soit clair que les *fortes* concentrations en Cl dans la zone de recharge principale (vers le nord) ne sont pas en accord avec les *faibles* concentrations trouvées le long du sens d'écoulement. Le GRI pense que ces anomalies ne peuvent être résolues que par l'analyse permanente de l'eau de la formation et des fluides interstitiels depuis des forages actuels et nouveaux dans la zone, et par un effort maintenu pour comprendre l'hydrodynamique du Dogger à l'échelle du secteur.

Des informations sur les profils des isotopes  $^{37}\text{Cl}$  et  $^{18}\text{O}$  ont également été obtenues par l'Andra et sont présentées dans le *Référentiel du site de Meuse/ Haute-Marne* [7] et deux documents de niveau plus détaillé [13 et 25]. Ces informations supplémentaires sont utiles, car elles montrent que des profils de diffusion existent également pour d'autres éléments en solution (et choisis avec des hypothèses conservatives). Le TEP ne traite que des profils de Cl sans explication appropriée, et ces résultats avec leurs implications n'y sont que peu évoqués.

Enfin, la modélisation de multiples profils de diffusion au travers du COX fournit un moyen ingénieux et innovant de vérifier la nature diffusive du transport des solutés dans le COX, et le GRI encourage l'Andra à tester plus de carottes et à obtenir des échantillons représentatifs d'eau de la formation qui serviront de « points de calibration » de fin de courbes de profil.



### 3.1.2.3 Coefficients de diffusion des anions

Une investigation considérable a été faite par l'Andra pour déterminer les effets de l'argile sur la rétention des ions des solutés diffusant dans le COX. Ce travail a été effectué en partie pour comprendre la surpression hydraulique dans le COX et pour examiner les processus d'échange d'ions dont, en particulier, l'exclusion anionique, processus par lequel les anions sont repoussés des petits pores par l'interaction avec les feuillettes d'argile chargés négativement. Alors que l'exclusion anionique explique de manière satisfaisante le transport plus rapide des anions dans l'argile comparé aux éléments non interactifs comme  $^3\text{H}$  ou les isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène dans l'eau, des parties du TEP (e.g., encart 3.9) donnent involontairement la fausse impression que les anions sont significativement séparés des cations, tandis que les observations sont complètement en accord avec l'exigence fondamentale d'électroneutralité globale.

La détermination des coefficients de diffusion des anions grâce à des essais de laboratoire sur des carottes de forage intactes du COX a été effectuée et une importante base de données a été obtenue. Une autre confirmation des effets de l'exclusion anionique et des différences de coefficients de diffusion est en cours d'obtention à l'échelle de l'expérimentation de terrain en utilisant des forages spécialement réalisés dans le COX à partir du niveau de la galerie expérimentale du LRS de Meuse/Haute-Marne (-445 m). Cette expérience, appelée DIR (diffusion et rétention), comporte la mesure de la diffusion des radionucléides dans la roche environnante située à l'extrémité d'un forage dans le LRS. Les résultats obtenus à ce jour indiquent que les coefficients de diffusion des ions sont comparables à ceux estimés à partir des modèles fondés sur les résultats des mesures effectuées en laboratoire. Le GRI approuve cette étude comparative, tout en conseillant une évaluation minutieuse de la possibilité que le transport convectif, qui peut être provoqué par la conception et la mise en œuvre des expérimentations, interfère avec l'évaluation du transport par diffusion.

### 3.1.2.4 Analyse des familles de l'uranium

Une confirmation supplémentaire du mouvement lent des fluides dans le COX peut être obtenue en utilisant les méthodes de déséquilibre radioactif des familles de l'uranium dans l'analyse de l'ensemble de la roche du site de Meuse/Haute-Marne. L'âge du COX dépassant largement deux millions d'années, la mesure de roches ayant des ratios  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  inférieurs ou supérieurs à 1.00 indique s'il y a eu perte ou gain d'un isotope (habituellement  $^{234}\text{U}$ ) au cours des deux millions d'années précédentes. En revanche, l'observation de ratios  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  avec des valeurs d'équilibre dans les échantillons de COX indique que l'uranium n'a pas migré dans le COX. Cela fournit un argument supplémentaire en faveur de la nature non convective du transport dans le COX.

Certains travaux précédents sur la méthode du déséquilibre radioactif des familles de l'uranium et son application à la compréhension de la mobilité de l'uranium ont été cités par l'Andra dans le TEP pour les calcaires du Dogger, formation sous-jacente du COX sur le site de Meuse/Haute-Marne [23]. Les analyses montrent un déséquilibre du ratio  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  dans les discontinuités stylolitiques du calcaire avec un appauvrissement en  $^{234}\text{U}$  pouvant atteindre 20 %. Inversement, les calcaires adjacents ont un ratio pouvant atteindre 1.05. Ce type d'analyse a également été réalisé par l'Andra sur l'argilite du COX avec quelques échantillons provenant de deux forages [7] et tous les résultats ont indiqué un équilibre à l'échelle séculaire, démontrant l'immobilité de l'uranium dans les échantillons analysés. La poursuite des analyses d'échantillons d'argilite est recommandée afin de montrer que cet état d'équilibre peut être présent en toute partie de la zone de transposition.

### **3.1.3 Confiance en la composition de référence des fluides interstitiels du COX**

La connaissance de la composition chimique des fluides interstitiels du COX et de sa relation avec les propriétés du transport constitue une partie importante des études de caractérisation sur le site de Meuse/Haute-Marne. Depuis la compilation du *Dossier 2001 Argile*, qui comportait peu de données disponibles sur la composition des fluides interstitiels, une quantité considérable de données pour le COX a été obtenue par l'Andra. Cela n'est pas apparent dans les documents de niveau général (spécifiquement le TEP) où il est très peu fait mention des compositions des fluides interstitiels. Cela donne initialement l'impression que ces données ne sont pas disponibles, mais une recherche dans les documents de niveau 3 et 4 (par exemple [21]) a montré qu'un effort important avait été fait pour obtenir cette information.

Diverses techniques d'extraction des fluides interstitiels pour l'analyse ont été essayées, y compris le pressage poussé, la diffusion et la lixiviation après broyage. Les difficultés d'échantillonnage de l'eau interstitielle sont dues à la très faible conductivité hydraulique ( $10^{-13}$  à  $10^{-14}$  m/s) de l'argilite, à la présence de composants réactifs comme les minéraux secondaires et les matières organiques, et au gain ou à la perte de gaz. Une technique qui semble conduire à des résultats fiables avec un minimum de perturbation de l'échantillon est la méthode de percolation [22]. L'application de cette technique est un bon exemple de travail en collaboration avec différentes équipes internationales, dans le cas présent, avec les Suisses travaillant sur l'argile à Opalinus.

Le GRI note que des progrès sérieux ont été faits par l'Andra pour la détermination de la composition des fluides interstitiels dans le COX et

recommande de poursuivre les travaux pour continuer à définir de manière plus détaillée les variations de la composition et leurs causes.

### **3.1.4 Rétention des radionucléides dans le COX**

Une fonction essentielle de la formation hôte est la rétention, par divers processus, des radionucléides qui peuvent éventuellement migrer hors de l'installation de stockage. Cette fonction joue un rôle majeur pour assurer la sûreté à long terme.

Les propriétés de rétention du COX et la confiance que l'Andra a acquise en ce qui concerne leur caractérisation sont très superficiellement traitées dans le TEP : deux pages sans argumentation sur la fiabilité et la qualité des données présentées pour les solubilités et les coefficients de sorption ( $K_d$ ). Il est cependant tout à fait clair, après avoir consulté le chapitre 5 « Comportement des radionucléides et des toxiques chimiques dans le Callovo-Oxfordien – Site de Meuse/Haute-Marne » du *Référentiel de comportement des radionucléides et des toxiques chimiques d'un stockage dans le Callovo-Oxfordien jusqu'à l'homme* [8], qui n'était pas spécifiquement inclus dans le mandat initial du GRI, que l'acquisition des valeurs de solubilité et de  $K_d$  des radionucléides et autres éléments chimiques toxiques constitue un effort majeur tant expérimental que de modélisation réalisé par l'Andra depuis le *Dossier 2001 Argile*. Cet effort étaye convenablement les valeurs de solubilité et de  $K_d$  qui ont été utilisées pour les calculs de sûreté du *Dossier 2005 Argile*. Il se conforme également à l'une des recommandations de la revue de 2003.

Sur la base des documents susmentionnés, le GRI conclut que :

- l'Andra a effectué un travail impressionnant en ce qui concerne la caractérisation de l'espace poral, du réseau de pores, de la texture et de la porosité à l'échelle microscopique du COX, ce qui a permis de développer un solide corpus de connaissances facilitant une meilleure compréhension de l'interaction entre l'eau et la roche ; ce travail est certainement à la pointe de la recherche dans ce domaine ;
- l'Andra a utilisé convenablement plusieurs sources d'information pour étayer le choix des valeurs de  $K_d$ , en sus des expériences de mesures en batch de la sorption en milieu dispersé, en particulier :
  - une interprétation plus mécanistique des processus de rétention sur des phases minérales d'argile pure (illite ou smectite) dérivée de ses études de sorption sur la bentonite, et

- l’analogie avec l’argile à Opalinus en Suisse. La pertinence de l’analogie avec cette formation est étayée notamment par une comparaison systématique entre le COX et l’argile à Opalinus documentée dans une annexe du *Référentiel du site de Meuse/Haute-Marne* [7] (*Analyse comparée des contextes géologiques et pétrographiques avec l’argile à Opalinus du Mont Terri, Suisse*) ;
- l’utilisation, pour les expériences en batch, d’échantillons provenant de différentes couches du COX sur le site de Meuse/Haute-Marne et de forages situés dans toute la zone de transposition contribue à établir la fiabilité en la représentativité des valeurs de  $K_d$  choisies ;
- l’Andra a défini une composition géochimique de référence des fluides interstitiels du COX, dont la qualité représentative a été confirmée par de multiples approches (modélisation, échantillonnage, expérience PAC *in situ* sur le site de Meuse/Haute-Marne). L’existence de cette composition de référence a été une aide précieuse pour étayer les expériences en batch et leur interprétation, et
- un autre élément positif à noter est la prise en compte de la dépendance des caractéristiques de sorption pour certains éléments (et des valeurs correspondantes de  $K_d$ ) vis-à-vis de la température et des concentrations variables en radionucléides ainsi que le traitement cohérent de  $K_d$  pour les radionucléides et les éléments chimiques toxiques.

Sur ces bases, le GRI conclut que l’Andra a fondé une confiance solide en la grande capacité de rétention du COX pour la plupart des radionucléides et, en particulier, pour les actinides.

Le GRI souligne la nécessité pour l’Andra d’améliorer la compréhension des processus de rétention dans le COX. En particulier, l’influence potentielle de la matière organique naturellement présente sur le comportement migratoire global reste à étudier et à clarifier. Bien que l’Andra ait largement analysé la matière organique pour définir les conditions paléogéologiques rencontrées par le COX au cours de son évolution géologique (par exemple, profondeur maximale d’enfouissement et température), le rôle de la matière organique naturellement présente dans l’augmentation ou la réduction de la mobilité des radionucléides n’a pas été explicitement considéré jusqu’ici. Il faut cependant reconnaître que la contribution de la matière organique est implicitement incluse dans les valeurs de  $K_d$  issues des expériences de mesures en batch de la sorption. Une telle étude peut conduire à une meilleure argumentation de l’efficacité de la rétention de l’iode dans le COX et de sa prise en compte dans les calculs de sûreté (étant donné que l’iode a été jusqu’ici considéré comme un élément complètement non sorbant).

L'Andra a prévu, dans son programme scientifique et technique en version provisoire de travail 2006-2010 [9], un travail pertinent sur la matière organique solide et dissoute qui devrait correspondre à la recommandation précédente (e.g., l'évaluation de la réactivité de la matière organique et de sa capacité à complexer les radionucléides et les toxiques chimiques, la détermination expérimentale des types de groupes fonctionnels, la réactivité et le rôle des fluides interstitiels pour la régulation du pH, la solubilité et la spéciation des éléments en solution).

La synthèse et le TEP ne traduisent pas suffisamment le haut degré de confiance acquis par l'Andra en ce qui concerne la rétention des radionucléides dans le COX. La consultation de documents de niveau plus détaillé et les exposés oraux de l'Andra au cours de la semaine de revue par des pairs ont été nécessaires pour asseoir les opinions et la confiance du GRI. De façon générale, le GRI suggère que l'Andra accroisse significativement la visibilité des caractéristiques favorables de rétention du COX et de leur rôle essentiel pour assurer la sûreté à long terme, dans la documentation à venir.

Également, la différence entre les observations phénoménologiques et les choix conservatifs de  $K_d$  pour les besoins des calculs de sûreté devrait être indiquée dans le TEP. Par exemple, le chapitre sur le *Comportement des radionucléides et des toxiques chimiques dans le Callovo-Oxfordien – Site de Meuse/ Haute-Marne* [8] traite de la démonstration de la rétention d'iode dans le COX alors que le TEP précise que cet élément n'a aucune affinité pour le COX, justifiant de ce fait une valeur de  $K_d$  de zéro. Il aurait été plus exact d'indiquer que, au vu des incertitudes relatives à l'efficacité et à la compréhension de la rétention d'iode dans le COX, une valeur de  $K_d$  de zéro a été, de manière conservative (et justifiable), choisie pour les besoins des calculs de sûreté.

### **3.1.5 Impact des perturbations géochimiques sur le COX**

L'Andra possède une bonne compréhension de l'ampleur limitée des perturbations géochimiques les plus importantes induites par le stockage sur le COX (i.e., front d'oxydation et panache alcalin). Une solide démonstration de la limitation de ces perturbations à la zone perturbée est disponible.

La possibilité que les sites de sorption du COX se saturent avec des éléments migrants autres que les radionucléides (générés, par exemple, par la dégradation progressive de matériaux à base de ciment ou par la corrosion des matériaux métalliques) a également été évaluée. Une telle compétition pour les sites de sorption – qui pourrait conduire à l'éventuelle indisponibilité de sites de sorption pour les radionucléides migrants – est très limitée du fait de la très grande superficie des feuillets d'argile du COX et se limitera de toute façon à la zone perturbée.

L'impact de ces perturbations géochimiques sur les propriétés de rétention du COX est traité convenablement et de manière conservative dans les calculs de sûreté étant donné qu'aucune propriété de rétention n'est attribuée à la zone fracturée du COX dans le calcul de sensibilité concerné.

La dégradation thermique de la matière organique du COX et ses conséquences sur les caractéristiques de rétention de la formation devraient être mieux évaluées. La matière organique naturellement présente dans le COX est plutôt immature et, en conséquence, peut rapidement réagir et se dégrader (oxydation, interaction avec les fluides alcalins, contraintes thermiques).

Les perturbations chimiques se limitent à la zone perturbée et sont bien atténuées par la minéralogie du COX (e.g., atténuation par la calcite de l'acidification créée par l'oxydation de la matière organique). Ainsi, elles ne devraient pas avoir de conséquences sur la sûreté (étant donné qu'une rétention nulle est attribuée à la zone fracturée). Toutefois, la charge thermique sur le COX, même limitée (la température maximale dans l'argile reste inférieure à 90 C) et plutôt de courte durée au cours de l'évolution du stockage (typiquement 10 000 ans), s'étendra au-delà de la zone perturbée du COX et peut avoir un impact sur la matière organique naturelle. En fait, les informations provenant des autres programmes indiquent qu'une faible énergie d'activation (e.g., une faible contrainte thermique) suffit à provoquer une dégradation de la matière organique immature, accompagnée de modifications de structure et de relâchements de CO<sub>2</sub>.

Les rôles potentiels de l'activité microbienne (micro-organismes introduits au cours des opérations du stockage ou associés aux matériaux utilisés pour la construction, ainsi que les organismes préexistants dans le COX) sur la mobilité des radionucléides dans le COX n'ont pas été complètement étudiés dans le *Dossier 2005 Argile*. Le GRI a reçu l'assurance que l'Andra tiendra compte dans ses futurs travaux de R-D tant des microbes introduits au cours des opérations que de ceux existant éventuellement dans le COX.

### ***3.1.6 Caractérisation et modélisation du COX et des formations environnantes***

En règle générale, les paramètres hydrogéologiques du site de Meuse/Haute-Marne sont favorables au développement d'un stockage : par exemple, une formation hôte où la diffusion est le mécanisme de transport prédominant, des formations encaissantes aquifères peu exploitables du fait de leur faible perméabilité, la disponibilité d'autres ressources en eau et le niveau élevé de chlore dans le Dogger. L'Andra a effectué un travail impressionnant de représentation de la stratigraphie et des propriétés hydrauliques dans un modèle 3-D

complexe en utilisant des méthodes et des technologies développées par l'industrie pétrolière. À cet égard, ces méthodes et technologies sont à la pointe des programmes de stockage de déchets. L'Andra a utilisé des études sismiques 3-D et les programmes des forages FSP et FRF pour démontrer de manière convaincante la continuité des couches et les faibles perméabilités dans le COX, le Dogger et l'Oxfordien. La faible perméabilité du COX a aussi été démontrée par la confirmation de la suppression de cette unité géologique, y compris par la réalisation de profils de pression verticaux.

L'Andra a utilisé des lignes d'argumentation multiples pour étayer le concept de vitesses convectives extrêmement lentes dans le COX, dont :

- la datation des eaux de formation ;
- les faibles perméabilités mesurées ;
- les résultats des modèles numériques, et
- la démonstration de l'absence de failles et fractures à l'échelle du site.

L'Andra a également utilisé convenablement la modélisation pour identifier les zones où des forages et données supplémentaires étaient nécessaires, par exemple, pour expliquer les variations géochimiques et charges hydrauliques.

Toutefois, ni le TEP ni aucun des documents individuels de niveau plus détaillé, revus par le GRI, ne contenaient une explication complète et exhaustive des types, échelles et objectifs des modèles hydrogéologiques développés par l'Andra. Les informations nécessaires pour comprendre quels modèles avaient été développés et leurs interrelations, étaient isolées et sans liaison. Une revue complète des documents de niveau 3 et 4 a été nécessaire au GRI pour se faire une idée de la modélisation généralement excellente qui avait été effectuée.

Le GRI a été surpris d'apprendre que certains des forages réalisés par l'Andra n'avaient pu, à cause du cadre réglementaire des procédures d'autorisation, être maintenus comme forages de suivi à long terme, mais en revanche avaient dû être bouchés et abandonnés. Le développement d'un réseau d'observation à long terme à l'échelle du secteur sera très vraisemblablement exigé pour tout stockage futur et les informations qui auraient pu être obtenues au cours de la période précédant la sélection et le développement du site, s'il avait été possible de maintenir ces forages comme instruments d'observation, auraient été précieuses. Une conséquence regrettable de l'obligation d'abandon de ces forages signifie que la modélisation hydrogéologique de l'Andra devra reposer en partie sur l'hypothèse que les mesures de charge effectuées à des moments différents en différents endroits sur une période s'étalant sur un certain nombre d'années reflètent le même état du système.

### 3.1.7 Zone de transposition

Comme noté dans la revue de 2003, la définition d'une « zone de transposition » est très utile pour instaurer la confiance en ce qui concerne l'utilisation des résultats obtenus sur le site de Meuse/Haute-Marne pour de futurs exercices de sélection de sites possibles. Le GRI note une amélioration de la délimitation de la zone de transposition depuis le *Dossier 2001 Argile*.

Le GRI recommande que la définition et l'étendue de la zone de transposition continuent à être vérifiées par rapport aux nouvelles données. En particulier, les résultats positifs issus des forages déviés sur le site de Meuse/Haute-Marne devraient être extrapolés à toute la zone de transposition notamment par la corrélation avec des campagnes sismiques de haute résolution supplémentaires.

## 3.2 Base scientifique de la représentation des processus et des fonctions de barrière

Les bases scientifiques soutenant la compréhension des phénomènes majeurs influant sur l'évolution d'un stockage et de son environnement géologique sont incorporées dans le TEP ainsi que dans plusieurs « référentiels » de niveau 3 et documents techniques de niveau 4.

Étant donné que la modélisation géologique et hydrogéologique du COX et des formations encaissantes est revue dans la section 3.1, la présente section se concentre sur la représentation des processus THMC appropriés pour décrire l'évolution phénoménologique des composants naturels et ouvrages faisant fonction de système multibarrière pour protéger l'homme et l'environnement contre la dissémination d'éléments radioactifs.

Tirer parti du milieu géologique (e.g., préserver ses propriétés favorables), est le fil conducteur de la conception et de l'architecture du stockage, notamment en limitant les perturbations dues (i) aux travaux d'excavation des structures souterraines, (ii) aux matériaux introduits et (iii) à la présence de déchets, notamment en ce qui concerne leur dégagement de chaleur. Les concepts et architectures sont donc testés, chaque fois que cela est pertinent, en utilisant les modèles conceptuels présentés dans le TEP. Les descriptions des processus THMC sont adéquatement présentées une par une en fonction de leur influence relative sur le développement d'autres phénomènes.

L'Andra a utilisé pleinement les capacités technologiques actuelles pour modéliser le transfert de chaleur en fonction du temps dans toutes les différentes



zones du stockage. Les principales incertitudes sont liées à l'incertitude sur les valeurs des paramètres d'entrée (charge thermique, conductivité thermique, chaleur spécifique, etc.) et la représentation spatiale du stockage (espace de jeu nécessaire pour la mise en place des colis, etc.). Les critères thermiques sont choisis de manière à être raisonnablement conservatifs quant aux besoins de (i) préserver les propriétés favorables du milieu géologique et (ii) de réduire au minimum l'impact des incertitudes associées à la modélisation de la dégradation des colis.

La motivation de l'Andra en ce qui concerne l'utilisation de matériaux « non passivables » est compréhensible. Le comportement à long terme de ces matériaux est, en principe, plus simple à prédire comparé à d'autres alliages dont la résistance à la corrosion repose sur la stabilité d'une couche superficielle très protectrice. Les autres raisons incluent la facilité de fabrication (comme le soudage) et le coût. Il existe un corpus de connaissances significatif sur le comportement vis-à-vis de la corrosion des aciers faiblement alliés et non alliés qui est bien documenté dans le *Référentiel des matériaux d'un stockage de déchets à haute activité et à vie longue – Tome 3 : Corrosion des matériaux métalliques* [5]. En particulier, les chapitres 2 à 4 traitant de la corrosion des aciers faiblement alliés et non alliés donnent un excellent aperçu des mécanismes de corrosion présentant un intérêt pour le stockage géologique, incluant la prise en compte des contraintes mécaniques, de la présence d'hydrogène et de l'attaque microbienne.

Conformément aux recommandations faites en 2003 suite à la revue par des pairs du *Dossier 2001 Argile*, un gros progrès a été fait en détaillant l'évolution potentielle du système « complément de colisage-argile », en particulier en ce qui concerne les interactions entre le fer et l'argile, documentée dans le chapitre 5 du *Référentiel des matériaux d'un stockage de déchets à haute activité et à vie longue – Tome 1 : Matériaux à base d'argiles gonflantes*. L'argumentation et les conclusions concernant l'extension de l'altération de la bentonite sont raisonnables et bien justifiées, bien que les incertitudes concernant l'importance de l'influence du Fe(II) relâché sur la bentonite soient peut-être plus grandes que celles mentionnées. Néanmoins, ces incertitudes n'ont pas d'implications significatives pour la sûreté.

Il est démontré (en particulier dans [19]) qu'il existe une compréhension approfondie des processus associés à la dégradation des différents déchets, permettant la présentation de modèles conservatifs et phénoménologiques pour le relâchement de radionucléides. L'analyse des processus concernant les déchets vitrifiés de haute activité et les déchets B ainsi que les modèles résultants sont particulièrement impressionnants et se situent à l'avant-garde des études internationales. Dans ces domaines, la présentation illustre clairement pour le lecteur la compréhension actuelle des matériaux et de leur comportement.

Quant à la discussion des processus et modélisations concernant le combustible usé, l'exposé se rapportant aux processus est généralement excellent, mais il n'y est pas fait suffisamment référence aux études qui illustrent clairement que l'hydrogène dissous a un effet majeur sur la réduction de la vitesse de dissolution du combustible usé. Ceci tend à étayer le modèle extrêmement conservatif d'oxydation (dissolution complète en ~50 000 ans) utilisé actuellement pour la dissolution du combustible usé et qui serait, sinon, difficile à justifier. En particulier, le GRI note que plusieurs articles de revues et rapports majeurs (Röllin *et al.*, 2001; Spahiu *et al.*, 2000; King *et al.*, 1999; King et Shoesmith, 2004) confirmant l'impact de l'hydrogène ne sont pas référencés<sup>6</sup>. Il y a une argumentation abondante sur l'utilisation « prudente » du modèle radiolytique oxydant, à la différence du modèle (ou vitesse de dissolution) fondé sur l'action de H<sub>2</sub> annihilant la dissolution. Le modèle radiolytique surestime très certainement les vitesses de dissolution et son utilisation est en partie justifiée par le fait que la présence permanente de H<sub>2</sub> ne peut pas être prouvée. Pourtant, dans ce même dossier, on admet que H<sub>2</sub> ne peut pas diffuser bien loin et cela transparait tant dans le TEP que dans la note conceptuelle sur les gaz [10]. La radiolyse n'étant importante qu'au cours des 100 000 premières années, lorsque la pression gazeuse dans les alvéoles de stockage est élevée, cette argumentation est contradictoire.

Il est toujours difficile de répondre à la question de savoir quand la connaissance a le niveau requis pour utiliser un modèle « réaliste » ou « *best estimate* » (meilleure estimation) pour l'évaluation de sûreté au lieu d'adopter prudemment un modèle très conservatif. Il est vrai que si ce dernier indique qu'il n'y a pas de problème de sûreté, cela peut ne pas être important. Dans ce cas, toutefois, l'utilisation du modèle conservatif donne des doses de 0,02 mSv, alors que l'utilisation d'un modèle tenant compte de conditions réductrices pourrait donner une dose environ dix fois plus faible. Étant donné que les modèles oxydants pour la dissolution du combustible usé ont été sans cesse contredits par les observations expérimentales révélant de faibles vitesses de dissolution en présence d'hydrogène (y compris des études auxquelles le CEA a récemment participé), c'est certainement un sujet qui mérite d'être étudié de manière plus approfondie. Ce point est clairement admis par l'Andra, mais son importance peut passer inaperçue lorsque l'on consulte les résultats de débits de dose dans le rapport de synthèse qui peuvent conduire à de fausses conclusions en ce qui concerne les doses relatives provenant de différents types de déchets. Le GRI recommande à l'Andra de considérer attentivement les études se rapportant aux effets de l'hydrogène sur la dissolution du combustible usé pour garantir une évaluation complète de toutes les données disponibles.

---

6. Notamment, l'étude de Röllin *et al.* (2001) montre une réduction de quatre ordres de grandeur pour 1 bar d'hydrogène par rapport à 0,2 bar d'oxygène.

### 3.3 Approche relative à la formation de gaz et à son transfert

Plusieurs processus dans le stockage de l'Andra conduisent à la génération de gaz (en particulier, corrosion métallique, radiolyse et biodégradation des déchets B) et la corrosion des métaux est reconnue comme étant de loin le processus le plus important en termes de débits gazeux et de volumes totaux engendrés. La conception du stockage propose l'utilisation de quantités d'acier considérables, notamment comme revêtements pour les alvéoles de stockage des déchets C et du combustible usé, ce qui conduit à une importante production de gaz hydrogène. Le taux de production total étant proportionnel à la superficie de métal, le taux de production d'hydrogène par unité de surface de déchets stockés dépasse celui des autres concepts de stockage dans l'argile d'au moins un facteur dix. Du fait de la faible perméabilité du COX, il se produit une accumulation de gaz et une analyse exhaustive est nécessaire pour déterminer si cela porte à des conséquences importantes vis-à-vis de la sûreté. Une évaluation de ces processus n'était pas incluse dans le *Dossier 2001 Argile*, mais le GRI note que les progrès faits depuis ont été impressionnants.

Comme attendu, l'analyse de la problématique de la production et du transport de gaz apparaît comme ayant été réalisée une fois les études de conception terminées pour confirmer que le gaz ne donne pas lieu à des problèmes significatifs vis-à-vis de la sûreté à long terme. De ce fait, les résultats de cette analyse ne sont pas utilisés en réitération dans le pilotage du processus de conception. Il est nécessaire d'intégrer le sujet du gaz dans les principes de conception (il n'est actuellement pas traité en tant que facteur de conception dans le TAG, où l'on pourrait s'attendre à ce qu'il le soit sous une rubrique telle que « limitation des perturbations pour la roche hôte »), car le traitement du gaz exige qu'il soit entièrement incorporé dès le début du processus de conception. L'avantage d'une intégration complète de la gestion du gaz dans le processus de conception est que le sujet de la réduction de production de gaz, y compris la question de savoir si cela devrait ou non être un objectif explicite de l'optimisation de la conception, peut être étudié de manière plus approfondie.

Malgré cette observation, le GRI note que le document d'analyse des gaz de l'Andra montre une excellente compréhension des processus intervenant dans la production et le transport de gaz en ce qui concerne les divers composants du stockage. Cette analyse semble plutôt conservatrice étant donné que les vitesses de corrosion utilisées se situent dans la partie haute des valeurs expérimentales mesurées et que certains facteurs pouvant réduire l'impact (e.g., faibles débits d'entrée d'eau et réduction de la pression gazeuse due à la consommation d'eau) ne sont pas pris en compte (attitude prudente actuellement, car des études futures seront nécessaires pour confirmer l'importance de ces processus). En tant qu'outil de conception, une évaluation plus réaliste peut, *in fine*,

être nécessaire. Néanmoins, certains résultats de l'analyse sont assurément pertinents pour la conception ; par exemple, l'Andra envisage d'étudier la possibilité de cellules de stockage plus longues d'où le gaz s'échapperait en partie directement dans la roche et en partie vers le tunnel d'accès. Le pour et le contre doivent être considérés et les outils d'analyse disponibles devraient permettre d'approfondir ce sujet. Les résultats de la modélisation montrent que, avec la conception actuelle, la plus grande partie du gaz se déplace le long des revêtements et à travers la zone perturbée dans les tunnels attenants aux alvéoles, puis s'échappe dans la roche hôte. Cela suggère que, pour obtenir des résultats fiables, un plus grand nombre de données est nécessaire pour modéliser le transport par ces voies de transfert.

En ce qui concerne la sûreté à long terme, même en prenant en compte les taux actuels de production de gaz, la conclusion préliminaire – qui est que la sûreté à long terme n'est pas compromise – semble raisonnable. En ce qui concerne la nécessité d'études futures, l'Andra reconnaît le besoin d'étudier à grande échelle les phénomènes de transport de gaz dans le COX. En particulier, les modèles de transport biphasique ont besoin d'être validés et les pressions de seuil pour la dilatance et la fracturation doivent être confirmées lors de futures études au LRS de Meuse/Haute-Marne.

### **3.4 Méthodologie des analyses de sûreté à long terme**

#### **3.4.1 Généralités**

La méthodologie appliquée dans le *Dossier 2005 Argile* contient les éléments essentiels auxquels on peut s'attendre, sous une forme ou sous une autre, pour une évaluation de la sûreté à long terme. Elle comporte :

1. une description complète du système à analyser ;
2. la définition et la décomposition des fonctions de sûreté du système ;
3. une analyse de l'évolution dans le temps du système décomposé en composants spatiaux appropriés dans l'APSS ;
4. la dérivation structurée, issue de la compréhension des fonctions de sûreté et de l'évolution temporelle du système, d'un scénario d'évolution normale (SEN) pour la quantification des conséquences radiologiques ;
5. la définition d'un nombre limité de scénarios stylisés d'évolution altérée (SEA) fondés sur les exigences réglementaires et sur les informations tirées des évaluations précédentes ;

6. la dérivation de modèles et données pour les calculs des conséquences ;
7. les calculs des conséquences pour les SEN et SEA ;
8. les analyses déterministes de sensibilité pour ces scénarios, et
9. une justification essentiellement *a posteriori* du traitement des incertitudes (AQS).

Les étapes précédentes sont guidées par les résultats provenant des travaux de R-D en cours.

### 3.4.2 Analyses fonctionnelles

L'utilisation de fonctions de sûreté constitue un élément-clé de la méthodologie d'évaluation de sûreté de l'Andra pour le *Dossier 2005 Argile*. Le GRI note que des approches fondées sur des fonctions de sûreté sont actuellement utilisées dans plusieurs programmes nationaux et que les méthodes reposant sur la définition et le traitement de fonctions de sûreté (multiples) permettent de pallier certains inconvénients de l'approche multibarrière. Comme le prouve par exemple le *Dossier 2005 Argile*, les fonctions sont utiles à la fois comme moyen d'assurer la sûreté (en pilotant la conception en tant qu'élément d'une stratégie de sûreté) et comme moyen d'apprécier la sûreté (en orientant l'évaluation).

La méthode de l'Andra pour définir les fonctions primaires et les décomposer en sous-fonctions est dérivée des méthodes industrielles normalisées. Cela présente des avantages, mais on pourrait se demander si la complexité introduite par ces méthodes compromet inutilement la lisibilité. Le GRI a également noté les difficultés pour obtenir un aperçu clair de la méthode de dérivation de ces fonctions, de leur définition, et des contraintes imposées par la suite lors de l'affinage de l'analyse. Vu le rôle-clé que jouent les fonctions de sûreté pour la structuration de l'évaluation de sûreté, la description de l'analyse fonctionnelle aurait dû apparaître dans des documents de niveau plus général dans le *Dossier 2005 Argile* [17, 18].

La méthode de l'Andra est plus formalisée que plusieurs autres « approches fonctionnelles ». De l'avis du GRI, cela contribue à la traçabilité des informations au sein de l'Andra, par exemple en ce qui concerne les décisions relatives à la conception, la sélection des scénarios, le transfert d'informations entre les équipes et la prise de décision en général, et potentiellement aussi lors de l'examen par les autorités de sûreté.

En conclusion, le GRI estime que la méthode utilisée par l'Andra représente une contribution intéressante à l'utilisation croissante des approches

fonctionnelles pour les évaluations de sûreté. La méthode de l'Andra gagnerait à être l'objet de discussions et comparaisons avec d'autres méthodes dans un contexte international afin de mieux étudier ses avantages et ses limites.

### **3.4.3 APSS (évolution normale et altérée)**

Comme pour le *Dossier 2001 Argile*, l'Andra utilise la méthode appelée APSS pour structurer les processus se rapportant à l'évolution du stockage et pour les décomposer dans l'espace et dans le temps. Le GRI trouve que la méthode est solide vis-à-vis de son objectif et, de ce fait, est également un outil important pour gérer les échelles de temps. Elle joue également un rôle important en tant qu'outil pour la documentation et communication internes, augmentant ainsi la traçabilité.

En accord avec les conclusions de la revue du *Dossier 2001 Argile*, l'APSS du *Dossier 2005 Argile* s'est améliorée dans le sens où (i) elle possède également de brèves variantes pour les évolutions altérées sous la forme d'enregistrements d'écarts par rapport à la variante de base couvrant l'évolution normale et (ii) elle a fait l'objet d'une vérification vis-à-vis de la base de données des caractéristiques, événements et processus (*features, events and processes – FEP*). Les modifications de l'APSS depuis le *Dossier 2001 Argile* ont conduit, entre autres choses, à retirer la dérivation des modèles et des données de l'APSS. Les modifications apportées par l'Andra sont considérées comme une amélioration pour la traçabilité de l'approche globale de l'analyse de sûreté.

Comme le reconnaît l'Andra, il est nécessaire de considérer de manière plus approfondie la question de savoir si les SEA doivent être traités à l'aide de la méthode APSS et, si oui, dans quelle mesure et comment. De plus, la dérivation des modèles est plus développée et séparée de l'APSS par rapport au *Dossier 2001 Argile*. Le développement des modèles et les hypothèses s'y rapportant sont clairement documentés et la traçabilité est assurée dans un certain nombre de documents de niveau plus détaillé, mais le GRI estime que les informations générales concernant ce sujet devraient être reflétées à un niveau plus général dans l'architecture de la documentation du *Dossier 2005 Argile*.

Selon le GRI, la méthode APSS peut désormais être considérée comme mûre pour le traitement du SEN.

### **3.4.4 Gestion des incertitudes**

Le traitement des incertitudes est prédominant dans tout le TES. Les fonctions de sûreté aident à centrer l'analyse et donc indirectement à hiérarchiser les incertitudes. Les incertitudes sont identifiées dans l'APSS qui aide

également à définir le périmètre du domaine d'évolution normale, permettant ainsi de séparer les incertitudes se rapportant à l'évolution normale de celles se rapportant à des évolutions altérées. Les analyses déterministes de sensibilité fournissent une évaluation de l'impact des incertitudes au sein de chaque scénario. L'analyse qualitative de sûreté, AQS, est un instrument servant à vérifier que toutes les incertitudes ont été traitées de manière appropriée lors des étapes précédentes de l'analyse et donc de justifier, *a posteriori*, par exemple le choix des SEA. Elle conduit également à l'identification de quelques cas de calcul supplémentaires et a, en principe, le potentiel de renseigner le concepteur et d'aider à la définition de scénarios supplémentaires.

De l'avis du GRI, la gestion des incertitudes dans le *Dossier 2005 Argile* est bien développée. Des commentaires plus détaillés sur l'AQS sont fournis ci-dessous.

#### **3.4.5 Analyse qualitative de sûreté (AQS)**

Le GRI note que l'analyse qualitative de sûreté (AQS), a fait l'objet d'un développement considérable depuis le *Dossier 2001 Argile*. L'analyse automatisée des modes de défaillance, qui avait été critiquée lors de la revue par le GRI du *Dossier 2001 Argile*, a désormais été remplacée par une méthode exhaustive supportant la gestion des incertitudes.

Plus spécifiquement, la version *Dossier 2005 Argile* de l'AQS fait la distinction entre les types d'incertitudes suivants :

- les incertitudes gérées par le dimensionnement ;
- les incertitudes incluses dans les hypothèses de calcul pour le SEN ;
- les incertitudes couvertes par un SEA ;
- les incertitudes liées à des événements extérieurs (traitées dans les SEN et les SEA), et
- les incertitudes mentionnées pour mémoire, avec les raisons pour lesquelles elles ne sont pas traitées ensuite dans le *Dossier 2005 Argile*.

Dans le *Dossier 2005 Argile*, l'AQS est essentiellement utilisée comme évaluation *a posteriori* de la manière dont les fonctions de sûreté pourraient se détériorer et donc une justification et une vérification *a posteriori* des SEN et des SEA, des cas de calcul et des mesures de conception. Cette utilisation de l'AQS est essentielle en particulier pour justifier les SEA qui sont dans une certaine mesure stylisés, du fait qu'ils ont été définis sur la base d'exigences

réglementaires et de résultats d'évaluations antérieures au lieu d'être dérivés directement des résultats obtenus dans le cadre du *Dossier 2005 Argile*.

Le GRI a trouvé que l'énumération et le traitement structurés des incertitudes à l'aide d'un vocabulaire normalisé et sous forme de tableau, étaient transparents et adaptés à leur objectif. L'AQS apparaît également utile pour l'identification des « sensibilités couplées » à l'aide d'outils qualitatifs.

L'application *a posteriori* de l'AQS dans le *Dossier 2005 Argile* a consisté essentiellement à vérifier que toutes les incertitudes correspondantes avaient été traitées de manière adéquate et, seulement en quelques occasions, a conduit à la définition de cas de calculs supplémentaires. Le GRI croit toutefois que l'AQS a le potentiel de renseigner pour les décisions concernant la conception du stockage ou le développement de scénarios à partir de principes de base. Ces possibilités pourraient être examinées ultérieurement par l'Andra.

#### **3.4.6 Gestion des différentes échelles de temps**

La méthodologie présentée par l'Andra dans le *Dossier 2005 Argile* traite explicitement la question des échelles de temps. Cela se fait principalement via la discrétisation temporelle dans l'APSS.

Le traitement des couplages dans l'APSS, avec des étapes de relativement courte durée et le traitement des couplages THMC à chaque étape, apparaît bien établi et fondé sur la nature physique des processus impliqués.

Le GRI conclut donc qu'il a été démontré que la méthodologie présentée par l'Andra dans le *Dossier 2005 Argile* était en mesure de gérer les différentes échelles de temps correspondant au stockage géologique profond conformément à la Règle fondamentale de sûreté française RFS III.2.f (Direction de la sûreté des installations nucléaires, 1991).

#### **3.4.7 Analyses de sensibilité**

Les analyses de sensibilité sont principalement traitées à l'aide d'un certain nombre de cas de calculs déterministes définis *a priori* qui traitent les sensibilités aux écarts des valeurs de paramètres du cas de référence pour les SEN et les SEA. Ces cas traitent ainsi les sensibilités locales où un ou quelques paramètres varient par rapport au cas de référence. Le GRI a conclu que l'approche de l'Andra concernant les analyses déterministes de sensibilité était adéquate et concernait les propriétés pertinentes du système analysé. Le GRI



prend acte du traitement supplémentaire des sensibilités à l'aide de moyens qualitatifs (AQS).

Au cours de la revue, le GRI a été informé que l'Andra prévoit d'effectuer des calculs probabilistes permettant également des analyses dites « de sensibilité globale » où les sensibilités sont examinées dans le cadre général des incertitudes, c'est-à-dire que sont examinées toutes les combinaisons de paramètres possibles dans le cadre d'un ensemble corrélé de distributions de données. Le GRI a estimé que les programmes présentés par l'Andra possédaient les éléments essentiels d'un calcul probabiliste. De plus, le niveau d'élaboration de l'approche probabiliste apparaît approprié pour ce problème particulier.

### ***3.4.8 Conclusions globales concernant la méthodologie d'évaluation de sûreté***

Le GRI a conclu que la méthodologie utilisée pour l'évaluation de sûreté dans le *Dossier 2005 Argile* est solide et contient les éléments nécessaires pour une analyse de sûreté bien développée.

La méthode a été mise en œuvre de manière appropriée dans le *Dossier 2005 Argile* comme le démontre la revue effectuée par le GRI, dont la prise en compte de certains documents de niveaux plus détaillés.

La méthode inclut des moyens formalisés d'intégration de la phénoménologie/science et de la sûreté, y compris la gestion des équipes/personnel, ce qui contribue significativement à la fiabilité et à la traçabilité.

Ceci est illustré par l'analyse fonctionnelle via son impact tant sur la conception que sur l'analyse de sûreté, et par l'analyse qualitative de sûreté, AQS, par la manière dont elle renforce l'interaction entre les équipes réalisant les analyses de sûreté et les scientifiques.

Selon le GRI, la méthodologie est plutôt complexe et exigeante à appréhender comme le montre le fait que certains de ses aspects fondamentaux ont dû être éclaircis vers la fin du processus de revue.

Le TES est bien structuré et assimilable. Toutefois, un certain nombre d'informations qui, selon le GRI, sont essentielles pour comprendre le travail de l'Andra et la méthodologie appliquée, n'est documenté que dans les documents de niveau plus détaillé. Cela concerne ? en particulier ? l'analyse fonctionnelle et l'analyse qualitative de sûreté. Certains aspects de l'aperçu de la méthodologie dans le chapitre de présentation du TES peuvent prêter à confusion ? car ils

ne reflètent pas de manière adéquate, par exemple, la relation entre les éléments et l'ordre chronologique des étapes de la méthodologie telle que mise en œuvre par l'Andra dans sa démarche d'évaluation de sûreté.

### **3.5 Choix de l'architecture et des solutions d'ingénierie et de gestion du stockage**

La conception du stockage choisie par l'Andra a été principalement guidée par quatre objectifs :

- le stockage doit avoir un agencement modulaire de manière à accepter différents types et quantités de déchets à différents moments ;
- le concept de stockage doit permettre la simultanéité des opérations de construction des galeries et des alvéoles de stockage, d'une part, et de mise en place de déchets, d'autre part ;
- la conception doit inclure le concept de réversibilité sans critères de conception et/ou échelles de temps explicites donnés à l'Andra, et
- la sûreté du stockage est l'objectif primordial de la conception.

La conception élaborée et présentée par l'Andra est une architecture de type « borgne » qui satisfait aux objectifs susmentionnés.

La revue du GRI a confirmé que l'architecture choisie peut être réalisée avec les techniques actuellement disponibles. Certains commentaires, toutefois, sont fournis à l'Andra pour l'optimisation et l'affinage ultérieurs de l'architecture du stockage.

La conception actuelle semble être fortement influencée par les technologies de génie civil pour la construction de tunnels, ponts et de barrages avec des durées de vie d'environ 100 ans. L'expérience minière recommanderait la prudence en ce qui concerne les sections transversales pouvant atteindre plus de 100 m<sup>2</sup> (alvéoles de stockage de déchets de type B), car l'on ne possède qu'une expérience limitée de génie minier dans des formations argileuses comme le COX à des profondeurs d'environ 500 m.

La principale particularité technique introduite en réponse à l'exigence de réversibilité est l'utilisation de revêtements en acier et/ou béton plus résistants et plus épais qu'il n'aurait été nécessaire, sinon pour garantir la stabilité mécanique à long terme des structures excavées. Cela n'apparaît pas comme ayant d'implications importantes pour la sûreté à long terme. Il est clair que l'épaisseur des revêtements pourrait être ajustée pour correspondre à toute durée inférieure à la

période de 200 à 300 ans, pendant laquelle il était prévu que le stockage reste ouvert, lors de toute future révision de l'approche relative à la réversibilité.

La mise en œuvre de la conception actuelle sera très exigeante. Les techniques minières et de revêtement proposées exigent les normes de travail les plus élevées, notamment compte tenu du nombre élevé d'alvéoles de stockage différentes. Le GRI recommande donc de mettre en place un système d'assurance qualité strict (AQ) pour la construction souterraine. Les techniques proposées par l'Andra de mise en place télé-opérée de déchets exigent une propreté dans le stockage souterrain similaire à celle des installations nucléaires en surface. Le GRI pense qu'un essai approprié de démonstration est nécessaire.

Étant donné la période de réversibilité de 200 à 300 ans, le retour d'expérience est limité pour des durées aussi longues en ce qui concerne la maintenance et les réparations des structures souterraines et des équipements techniques. Il en va de même pour l'observation et la surveillance. L'Andra a identifié les besoins dans ce domaine dans le programme scientifique et technique 2006-2010 [9] qu'elle a proposé.

Le système de ventilation proposé est régi par « l'architecture borgne » pour limiter l'écoulement d'eau dans les galeries. Cela entraîne le regroupement des quatre puits dans un même emplacement. Également, la ventilation des alvéoles de déchets B une fois remplies n'est pas définitivement décidée. Le GRI a des recommandations spécifiques en vue d'une future optimisation du système de ventilation :

- le regroupement des puits, option actuellement choisie, devrait être réévalué en tenant compte des facteurs hydrauliques et opérationnels ; l'avis du GRI ne coïncide pas avec l'argumentation fondée sur la force motrice des charges hydrauliques entre les puits comme un motif probant de regroupement de ces mêmes puits. En effet, les gradients hydrauliques horizontaux dans le COX n'apparaissent pas comme suffisamment grands pour influencer sur la sûreté à long terme, même si les puits se trouvaient aux différentes extrémités d'un stockage ;
- la ventilation des alvéoles de déchets B une fois remplies (arrivée d'air autour des conteneurs empilés, sortie via des parois perforées et des gaines de conduction d'air) devrait être testée avec et sans ventilateurs, et
- comme les systèmes miniers de ventilation essayent d'éviter les gaines et les tubes, l'Andra devrait étudier ou tester des solutions alternatives.



#### 4. APERÇU GÉNÉRAL DES CONCLUSIONS

Le *Dossier 2005 Argile* réussit à créer la confiance en la faisabilité de la construction d'un stockage dans les argilites du COX dans la région du LRS de Meuse/Haute-Marne.

- le *Dossier* établit une approche viable d'obtention de la réversibilité sans compromettre la sûreté opérationnelle et post-fermeture ;
- la base scientifique et technique est développée dès l'amont avec une grande traçabilité ;
- la méthode d'évaluation de la sûreté est solide et mise en œuvre avec pertinence ;
- la confiance en la fonction essentielle de sûreté du COX, c'est-à-dire, le contrôle du transport par la diffusion et la rétention des radionucléides, est importante, et
- l'Andra apparaît comme ayant bien intégré les défis à relever en terme d'ingénierie minière et opérationnelle et comme possédant les compétences pour y répondre.

Le *Dossier 2005 Argile* devrait fournir une base importante et pertinente d'informations pour les discussions et décisions à venir en France concernant la formulation d'une politique nationale actualisée de gestion finale des déchets radioactifs HAVL.



## RÉFÉRENCES

CNE (Commission nationale d'évaluation). 1998. *Réflexions sur la réversibilité des stockages* (résumé disponible en anglais "Thoughts on Retrievability"). CNE. Paris, France.

République française. 1992. Loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs (1), *Journal officiel des lois et décrets*, 1<sup>er</sup> janvier 1992: 124<sup>e</sup> année, n° 1. ISSN 0373-0425.

F. King, M.J. Quinn and H.H. Miller. 1999. *The Effect of Hydrogen and Gamma Radiation on the Oxidation of UO<sub>2</sub> in 0.1 mol-dm<sup>-3</sup> NaCl Solution*. Technical Report TR-99-27. SKB. Stockholm, Sweden.

F. King and D. Shoesmith. 2004. *Electrochemical Studies of the Effect of H<sub>2</sub> on UO<sub>2</sub> Dissolution*. Technical Report TR-04-20. SKB. Stockholm, Sweden.

Ministère de l'Industrie et du Commerce extérieur. 1991. *Règle fondamentale de sûreté, Règle n° III.2.f (10 juin 1991), Stockage définitif de déchets radioactifs en formation géologique profonde*. Paris, France.

Nagra (*Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle*). 2002. *Project Opalinus Clay. Safety Report. Demonstration of Disposal Feasibility for Spent Fuel, Vitrified High-level Waste and Long-lived Intermediate-level Waste (Entsorgungsnachweis)*. Nagra Technical Report NTB 02-05. Nagra. Wettingen, Switzerland.

AEN (Agence pour l'énergie nucléaire). 2003. *Le Programme français de R-D sur le stockage géologique des déchets radioactifs*. Paris, France. (<http://www.nea.fr/html/rwm/reports/2003/nea4588-andrafr.pdf>)

AEN (Agence pour l'énergie nucléaire). 2005. *Revue internationale par des pairs pour la gestion des déchets radioactifs : Informations générales et lignes directrices*, OCDE/AEN, Paris, France. (<http://www.oecdnea.org/html/rwm/reports/2005/nea6082-peer-review.pdf>)

ONDRAF/NIRAS (Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles de Belgique). 2001. *Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2*. Report NIROND 2001-06 E. ONDRAF/NIRAS. Brussels, Belgium.

S. Röllin, K. Spahiu, and U.-B. Eklund. 2001. "Determination of Dissolution Rates of Spent Fuel in Carbonate Solutions Under Different Redox Conditions With a Flow-through Experiment", *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 297, p. 231-243.

K. Spahiu, L. Werme and U.B. Eklund. 2000. "The Influence of Near-field Hydrogen on Actinide Solubilities and Spent Fuel Leaching", *Radiochimica Acta*, Vol. 88, p. 507-511.



*Annexe 1*

**MEMBRES DU GROUPE DE REVUE INTERNATIONALE**

**Alan Hooper, *président***

Alan Hooper est conseiller scientifique principal de UK Nirex Limited, l'organisme britannique chargé d'élaborer des concepts sûrs et acceptés par le public pour la gestion à long terme des déchets radioactifs. Son rôle est non seulement de fournir des conseils sur les programmes scientifiques et techniques généraux de Nirex et sur ses principaux rapports, mais aussi d'en informer les institutions scientifiques.

Alan Hooper a obtenu une licence avec spécialisation en chimie mention très bien, en 1968 à l'Université de Nottingham. Il y a obtenu un doctorat pour sa thèse sur les systèmes d'oxydes complexes, en 1971. Il a œuvré pendant 17 ans au sein de la Division de la recherche de l'Office central de production d'électricité (CEGB) où il a d'abord étudié la sûreté de l'exploitation et de la maintenance des systèmes avancés de réacteurs électronucléaires. En 1980, il a intégré le Projet de démantèlement nucléaire et s'est occupé de recherches sur les conséquences des stratégies de démantèlement sur la sûreté pour la première génération de réacteurs britanniques Magnox refroidis au gaz. À partir de 1985, il a été responsable de la mise au point et de l'application du programme de recherche pour étayer la reprise et le conditionnement des déchets de moyenne activité du CEGB en vue de leur éventuel stockage dans des formations géologiques profondes.

Depuis son arrivée chez Nirex, en 1988, M. Hooper a occupé un certain nombre de positions à la direction générale. Il a notamment dirigé le programme de recherche et d'évaluation pendant quelques années et, pendant un certain temps, il s'est occupé de la mise au point et de l'application des études de caractérisation de sites à Dounreay et à Sellafield. Il a intensément participé à des présentations et auditions de l'enquête publique consacrée à la sélection du site d'une « installation souterraine de caractérisation de la roche », à Sellafield, ainsi qu'à des auditions devant plusieurs commissions parlementaires. Il est l'inventeur attitré du matériau de remblayage spécialement conçu et proposé pour le concept de stockage progressif de Nirex pour les déchets de moyenne activité.

Il fait actuellement partie de la délégation britannique auprès du Comité de la gestion des déchets radioactifs de l'AEN et de son Groupe d'intégration pour les dossiers de sûreté du stockage des déchets (IGSC). Par le passé, il a présidé le Groupe de coordination sur l'évaluation des sites et la conception des expériences pour le stockage des déchets radioactifs (SEDE), jouant un rôle actif dans la promotion de certaines initiatives, y compris le *Clay Club*, le projet GEOTRAP et des séminaires sur des thèmes spécialisés, comme la modélisation conceptuelle. Il a aussi présidé divers groupes d'experts techniques de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) traitant de la base scientifique et technique de la gestion des déchets radioactifs et des exigences de sûreté connexes. Il participe actuellement au Comité de développement pour le Programme de protection de l'environnement du Service géologique britannique (BGS).

En 2002-2003, il présida la revue par des pairs du *Dossier 2001 Argile* de l'Andra.

### **Richard Beauheim**

Richard Beauheim occupe la position de Membre principal de l'Équipe technique des *Sandia National Laboratories* et est actuellement chef hydrogéologue de l'Installation pilote de confinement des déchets (WIPP) à Carlsbad (Nouveau-Mexique, États-Unis). De 1984 à 1996, il a été chercheur principal chargé de la caractérisation hydrogéologique du site du WIPP. Au cours de la constitution du dossier de demande de création du WIPP, il était responsable de l'intégration et de la cohérence des informations de terrain et des modèles d'évaluation de performance. Après l'obtention du permis de construire du WIPP en 1998, il a été responsable des composants hydrologiques du système de surveillance du WIPP. Il est actuellement coordonnateur et directeur des études hydrogéologiques de terrain et des études de sûreté liées au renouvellement de l'autorisation du WIPP.

Il a étudié à l'Université du Wisconsin (Madison, États-Unis) où il a obtenu une licence en anthropologie, en 1974, et d'une maîtrise en géologie et en gestion des ressources en eau, en 1980. Avant d'intégrer l'équipe de Sandia, en 1984, il a été, durant quatre ans, consultant en hydrogéologie auprès de diverses industries d'exploitation minière et de gestion de déchets nucléaires. Pendant cette période, il faisait partie du Groupe de revue du Bureau sur l'isolation des déchets nucléaires des États-Unis qui évaluait sept sites candidats dans des formations salines en vue d'y installer des stockages de déchets radioactifs de haute activité. Il est aussi l'auteur de 20 articles publiés dans des périodiques ou des actes de conférences, ainsi que de plus d'une trentaine de rapports techniques. Ses compétences techniques concernent plus particulièrement les domaines de la réalisation et de l'interprétation des tests hydrauliques et de tests avec traceurs, ainsi que la caractérisation des sites.

En 2000-2001, M. Beauheim a pris un congé sans solde de Sandia pour travailler à la Division de la gestion des déchets radioactifs et de la protection radiologique de l'AEN, à Issy-les-Moulineaux (France), où il a supervisé l'achèvement du projet GEOTRAP et rédigé un certain nombre de rapports et de documents. Au nom de Sandia et du Projet WIPP, il a participé activement aux projets INTRAVAL et GEOTRAP, et fait actuellement partie des groupes de direction des récents projets internationaux de l'AEN sur les systèmes de barrières ouvragées (EBS) et sur les approches et les méthodes pour intégrer les données géologiques dans les dossiers de sûreté (AMIGO). En 2002-2003, il fut membre du Groupe de revue international du *Dossier 2001 Argile* de l'Andra.

### **Melvyn Gascoyne**

Mel Gascoyne est consultant en géochimie depuis 1998. Avant cela, il a été pendant 16 ans maître de recherches à Énergie atomique du Canada Limitée (EACL) et chef de la Section d'hydrogéochimie de la Division des sciences de la Terre appliquées aux Laboratoires de Whiteshell (Manitoba).

Mel Gascoyne a été chargé d'obtenir et d'interpréter les données géochimiques du programme canadien de gestion des déchets de combustible nucléaire pour la caractérisation de plusieurs formations de roches cristallines du Bouclier canadien. Ses domaines de compétence particuliers comprennent l'utilisation d'isotopes stables présents dans la nature et d'isotopes radioactifs dans l'eau de formation pour déterminer son temps de séjour (âge), les sources des sels dissous et l'évolution géochimique, et l'application des méthodes de décroissance de l'uranium pour la datation des minéraux de fracture et la détermination du rythme de l'altération récente.

Après avoir quitté EACL, Mel Gascoyne a fondé la Gascoyne Geo-Projects Incorporated (GGP Inc.) et a exercé des activités de conseil pour la revue de documents, la rédaction de rapports, l'analyse isotopique d'eaux de formation pour SKB (Suède), POSIVA OY (Finlande), Ontario Power Generation (OPG), EACL (Canada), US Geological Survey (Denver), Duke Engineering (Canada), et NOVA Chemicals (Canada). Il a également participé à la revue internationale par des pairs de l'évaluation de sûreté du projet de Yucca Mountain par l'USDOE aux États-Unis (TSPA) menée sous l'égide de l'AEN.

Mel Gascoyne a obtenu sa licence (avec mention) en chimie (1969) et une maîtrise en sciences de l'environnement (1974) à l'université de Lancaster (Royaume-Uni), suivie d'un doctorat en géologie à l'université McMaster de Hamilton (Ontario, Canada). Après deux années de travaux post-doctoraux à McMaster, il a rejoint EACL pour travailler sur les aspects géochimiques du

stockage de déchets nucléaires. Il a collaboré en tant qu'auteur à l'Étude d'impact environnemental (EIS) du stockage de déchets nucléaires présenté au gouvernement fédéral canadien en 1995 qu'il a ensuite défendu lors d'audiences publiques.

Mel Gascoyne est l'auteur de plus de 60 articles et communications et de plus de 50 rapports techniques et documents d'assurance qualité (AQ) pour des projets commerciaux. Il est rédacteur en chef adjoint de la revue *Applied Geochemistry* depuis 1988, a été secrétaire de l'*International Association of Geochemistry and Cosmochemistry* de 1992 à 2002, et membre du conseil d'administration de l'*ISOTRACE Accelerator Mass Spectrometry*, Université de Toronto de 1997 à 2002.

### **Allan Hedin**

Allan Hedin est spécialiste principal des analyses de sûreté à la Société suédoise de gestion du combustible et des déchets nucléaires (SKB) où il dirige les projets d'analyse de sûreté des stockages de déchets de haute activité dans des formations profondes.

À l'Université d'Uppsala, il a obtenu sa maîtrise en génie physique, en 1983, puis son doctorat en physique des ions en 1987. Sa thèse portait sur des travaux théoriques et expérimentaux concernant les interactions entre les ions lourds rapides et les solides, ainsi que sur les applications à des techniques spectrométriques de masse. Après quatre années de recherches universitaires plus poussées sur la désorption par laser et la microscopie électronique par balayage et pénétration, il a rejoint les rangs du Service national suédois d'inspection chimique, en 1991, pour s'occuper des évaluations de risque liées aux substances et produits chimiques.

Il travaille à SKB depuis 1994. Il a d'abord traité des calculs probabilistes du transport des radionucléides et s'est vu graduellement confier plus de responsabilités générales concernant les questions de méthodologie de l'analyse de sûreté. Il s'intéresse particulièrement à l'élaboration de modèles mathématiques simplifiés qui couvrent les propriétés fondamentales de représentations plus complexes dans le domaine des analyses de sûreté. Il a été l'auteur principal, l'éditeur et le chargé de projet adjoint de la dernière analyse de sûreté (SR 97) de SKB et dirige maintenant les analyses de sûreté à réaliser au cours de la phase de recherche de sites de SKB.

M. Hedin a fait partie de l'ancien Groupe consultatif de l'AEN sur l'évaluation des performances des systèmes de stockage des déchets radioactifs (PAAG)

et est actuellement membre du groupe d'intégration pour les dossiers de sûreté des stockages de déchets radioactifs (IGSC). Il a participé activement à plusieurs projets internationaux dans le cadre du PAAG et de l'IGSC. Lors de la revue internationale par des pairs, sous l'égide de l'AEN, du *Dossier 2001 Argile* de l'Andra, il fut responsable des aspects méthodologiques de l'évaluation de sûreté.

### **Lawrence Johnson**

Lawrence Johnson est expert scientifique senior à la Coopérative nationale pour l'entreposage des déchets radioactifs (CEDRA) de Suisse où il travaille depuis 1999, sur divers aspects de la performance des barrières ouvragées y compris le comportement de la forme des déchets, la conception des conteneurs et l'élaboration de modèles pour l'évaluation de la performance du champ proche.

En 1977, il a obtenu son diplôme de chimie à l'Université de Lethbridge (Alberta, Canada) et a intégré les Laboratoires de Whiteshell d'EACL, en 1978. Après plusieurs années consacrées à l'étude de la dissolution du combustible usé et des déchets vitrifiés de haute activité, il a pris la direction des études sur les barrières ouvragées au sein du Programme canadien de gestion des déchets de combustible nucléaire, pilotant le groupe chargé de la recherche et du développement sur les barrières ouvragées des systèmes de stockage du combustible usé, y compris les études d'ingénierie, le développement d'un modèle de terme-source pour le combustible usé, des modèles de corrosion des conteneurs de déchets de combustible usé, des modèles de transport dans les barrières argileuses, ainsi que l'intégration des modèles du champ proche. De plus, il a dirigé les études sur la tenue du combustible usé dans des conditions d'entreposage à sec ou en piscine. Il est le principal auteur de deux études détaillées de sûreté des barrières ouvragées, la première détaillant la mise en place de conteneurs en titane renfermant du combustible usé dans des cavités, et l'autre portant sur la mise en place de conteneurs en cuivre dans des alvéoles. Les deux études ont joué un rôle crucial dans l'examen fédéral des études d'impact sur l'environnement d'EACL dans le cadre du processus d'évaluation et d'examen en matière d'environnement qui s'est déroulé entre 1994 et 1997. Il a également rédigé plus de 80 rapports ou communications sur la dissolution du combustible usé, l'entreposage du combustible usé et l'évaluation de la performance du champ proche.

En 1997, il a fait partie du Groupe de revue international de l'AEN chargé de l'étude de sûreté du projet SITE-94 du SKI de Suède et, en 1997-1998, il a siégé au Groupe d'experts du Département de l'Énergie des États-Unis sur la dissolution des matrices de déchets et la mobilisation des radionucléides. En 2002-2003, il fut membre du Groupe de revue international du *Dossier 2001*

*Argile* de l'Andra. Il est actuellement membre du Conseil scientifique international du programme PRECCI du CEA.

### **Klaus Kühn**

Klaus Kühn est un professeur retraité en gestion des déchets radioactifs à la *Technische Universität (TU) Clausthal*. Simultanément, il a été directeur du GSF – Institut für Tieflagerung in Braunschweig. Ses principales activités ont porté sur tous les aspects du stockage de déchets radioactifs dans les formations géologiques.

Klaus Kühn a obtenu son diplôme d'ingénieur (Dipl.-Ing.) en génie minier en 1963 à l'École des Mines de Clausthal (actuellement *TU Clausthal*). En 1968, il a obtenu son doctorat dans la même université. Il a été le premier scientifique à intégrer GSF – *Institut für Tieflagerung* fondé en 1965 pour le gouvernement fédéral en Allemagne dans le but de mener des programmes de recherche et développement dans le domaine du stockage de déchets radioactifs. De 1973 à 1995, il a été directeur de cet institut. En 1987, il a été nommé professeur honoraire à *TU Clausthal*.

Il a été membre de nombreuses commissions nationales et internationales. Sur le plan national, il a été membre de la *Reaktor-Sicherheitskommission* (RSK – Commission de la sûreté des réacteurs) de 1983 à 1998. Entre 1999 et 2002, il a rejoint l'*AkEnd*, comité consultatif pour le gouvernement et chargé de formuler un ensemble de critères scientifiques et sociaux pour trouver de nouveaux sites de stockage. En récompense de ses services éminents, il a été décoré de l'ordre du mérite (*Bundesverdienstkreuz*) par le président de la République fédérale d'Allemagne. Tout récemment, il a été nommé membre honoraire de la Société Nucléaire Allemande KTG (*Kerntechnische Gesellschaft*).

Sur le plan international, Klaus Kühn a participé à et/ou a présidé plusieurs comités de l'AIEA, de l'AEN/OCDE et de la Commission européenne. Parmi ceux-ci, il a participé à l'évaluation internationale conjointe sous l'égide de l'AEN et de l'AIEA de l'analyse de performance de l'Installation pilote américaine de confinement des déchets (WIPP) en 1996.

Après sa retraite en avril 2003, Klaus Kühn travaille encore comme consultant pour GSF sur le déclassé de la Centre de recherche situé dans la mine d'Asse. De plus, il préside le Comité scientifique consultatif pour les activités de déclassé de VKTA à Rossendorf/Dresde. Il est membre du Comité consultatif de Nagra (Suisse), de l'*International Technical Advisory Committee* (ITAC) de NUMO (Japon), et du *Nuclear and Radiation Studies Board* (NRSB) de l'Académie des sciences des États-Unis.

## **Philippe Lalieux**

Philippe Lalieux est le responsable du programme de stockage des déchets HLW/MLW à l'Organisme national belge des déchets radioactifs et des matières fissiles (ONDRAF/NIRAS). Géologue et géophysicien, il possède 15 ans d'expérience dans le domaine du stockage des déchets radioactifs.

Il est diplômé de l'Université de Bruxelles (Belgique) où il a obtenu sa licence en géologie, en 1983, et sa maîtrise en sciences géophysiques, en 1984. De 1986 à 1994, il a travaillé à l'Organisme national belge des déchets radioactifs et des matières fissiles (ONDRAF/NIRAS). Ses fonctions comprenaient, entre autres, la coordination et la défense du Rapport intérimaire d'évaluation de la sûreté et de la faisabilité (SAFIR), ainsi que la supervision de la caractérisation géoscientifique des sites de stockage potentiels, en profondeur ou sub-surface, ainsi que des études portant sur les analogues naturels.

En 1995, il a intégré le Secrétariat de l'AEN/OCDE où il était chargé, au sein de la Division de la gestion des déchets radioactifs et de la protection radiologique, des programmes de l'Agence sur la caractérisation et l'évaluation des sites de stockage en profondeur. Plus particulièrement, il était responsable du secrétariat scientifique du Groupe de coordination sur l'évaluation des sites (SEDE), le Projet GEOTRAP sur le transport des radionucléides dans la géosphère, ainsi que le *Clay Club*. Il a participé à l'évaluation internationale conjointe sous l'égide de l'AEN et de l'AIEA de l'analyse de performance de l'Installation pilote américaine de confinement des déchets (WIPP), en 1996, et de l'évaluation internationale sous l'égide de l'AEN concernant le Projet suédois SITE-94 du SKI.

En 2000, il est retourné à l'ONDRAF/NIRAS pour coordonner, publier et défendre le second rapport SAFIR qui présente une évaluation exhaustive de la possibilité de stocker des déchets radioactifs à vie longue dans des formations argileuses peu indurées en Belgique. Le rapport SAFIR-2 a été présenté aux autorités en 2001 et permet à l'ONDRAF/NIRAS de poursuivre son programme de R-D sur le stockage géologique en Belgique

Depuis son retour à l'ONDRAF/NIRAS, il préside également le Groupe de travail de l'AEN sur la caractérisation, la compréhension et la performance des roches argileuses comme formations hôtes de stockage de déchets, mieux connu sous le nom de *Clay Club* et fut membre du Groupe de revue international du *Dossier 2001 Argile* de l'Andra. Il est également du *Safety Committee* de POSIVA, la société finlandaise en charge du stockage des déchets radioactifs.

## **Albert Machiels**

Albert Machiels est directeur technique principal de l'Institut de recherches sur l'énergie électrique (EPRI) des Etats-Unis, où il est chargé de plusieurs programmes de R-D portant sur l'aval du cycle du combustible, la corrosion des matériaux, ainsi que les applications après évaluation des risques et de la fiabilité. Ses travaux actuels se concentrent actuellement sur le développement d'une meilleure compréhension de la corrosion provoquée par l'environnement (y compris la corrosion fissurante sous tension provoquée ou non par l'irradiation) et d'autres phénomènes de dégradation des matériaux applicables à l'entreposage, au transport et au stockage du combustible usé, ainsi qu'aux environnements des réacteurs à eau sous pression (REP) et à eau bouillante (REB).

Il est titulaire de diplômes d'ingénieur civil chimiste et d'ingénieur en génie nucléaire de l'Université de Liège (Belgique), ainsi que d'une maîtrise en sciences et d'un doctorat en ingénierie de l'Université de Californie (Berkeley).

Avant de rejoindre les rangs de l'EPRI, il a été professeur associé à l'Université de l'Illinois (Urbana-Champaign). Avant de s'installer aux États-Unis, il a passé quatre ans à l'Université de Liège (Belgique) dont une année à l'usine de retraitement d'EUROCHEMIC, y enseignant et travaillant sur les questions liées au retraitement du combustible usé.

M. Machiels a participé comme membre/évaluateur dans divers comités sur les besoins scientifiques pour la technologie de confinement des déchets nucléaires, la lixiviation du verre et les questions d'ordre technique du Programme américain de stockage de déchets nucléaires. Il a aussi présidé le Troisième Symposium international sur les céramiques utilisées pour la gestion des déchets nucléaires de la Société américaine des céramiques, à Chicago, en 1986, de même qu'il a été le président technique pour les États-Unis à la Réunion thématique internationale sur la performance du combustible des réacteurs à eau ordinaire des Sociétés nucléaires française et américaine, en France, en 1991. En 2002-2003, il fut membre du Groupe de revue international du *Dossier 2001 Argile* de l'Andra.

## **Claudio Pescatore**

Claudio Pescatore détient un doctorat en génie nucléaire de l'Université de l'Illinois (Urbana-Champaign, États-Unis). Il a plus de 20 ans d'expérience dans le domaine des déchets nucléaires, notamment à propos de l'entreposage et du stockage des déchets de faible activité, de haute activité et du combustible usé.

En 1982, il a intégré le Brookhaven National Laboratory et s'est occupé de l'étude des concepts de stockage des déchets de haute activité et du combus-



tible usé dans des formations de basalte, de sel et de tuf. Ses travaux portaient sur la fiabilité et la modélisation des matériaux des colis de déchets pendant l'entreposage et le stockage, l'analyse des voies de transfert aqueuses et gazeuses favorisant la migration des radionucléides, ainsi que sur la revue des études d'impact sur l'environnement et des plans de caractérisation des sites. À Brookhaven, il était chef du groupe d'évaluation de performance pour les déchets. Jusqu'en 1995, il a aussi été professeur des sciences de l'environnement du milieu marin à l'Université de l'État de New York, à Stony Brook.

Depuis 1992, il fait partie de la Division de la gestion des déchets radioactifs et de la radioprotection de l'AEN/OCDE, où il occupe le poste de directeur adjoint de la gestion des déchets radioactifs. Il s'est trouvé récemment au cœur de plusieurs initiatives internationales, comme les projets ASARR et GEOTRAP, ainsi que les études IPAG. Il est aussi co-auteur de plusieurs rapports de l'AEN sur la situation de la gestion des déchets radioactifs à travers le monde ou sur des questions connexes et a participé à la rédaction du document de l'AEN sur la confiance. Il agit à titre de secrétaire technique de plusieurs comités de l'AEN : le Comité de la gestion des déchets radioactifs (RWMC), le Forum des régulateurs du RWMC, le Groupe de travail sur le déclassement et le démantèlement et le Forum sur la confiance des parties prenantes. Il a organisé, au nom de l'AEN, de nombreuses revues internationales d'études nationales sur la sûreté. Celles-ci comprennent notamment le Projet 90 du SKI de Suède, l'Étude d'impact sur l'environnement d'EACL sur le stockage des déchets de combustible nucléaire au Canada, l'analyse de performance de l'Installation pilote de confinement des déchets (*Waste Isolation Pilot Plant – WIPP*) aux États-Unis, la méthodologie de Nirex pour la mise au point de scénarios et de modèles conceptuels au Royaume-Uni, le Projet H-12 du JNC pour établir la base technique du stockage des déchets de haute activité au Japon, l'étude SR-97 du SKB, la compagnie chargée de la gestion du combustible usé et des déchets en Suède, le dossier d'évaluation de sûreté du projet de Yucca Mountain par l'USDOE aux États-Unis (TSPA-SR), le rapport SAFIR-2 élaboré par l'Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles (ONDRAF/NIRAS) de Belgique, le *Dossier 2001 Argile* de l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra, France) et le rapport de sûreté du projet *Entsorgungsnachweis* de la Coopérative nationale pour l'entreposage des déchets radioactifs (CEDRA, Suisse).

### **Klaus-Jürgen Röhlig**

Klaus-Jürgen Röhlig a reçu son diplôme en mathématiques de l'Académie des mines (*Bergakademie*) de Freiberg (Saxe), en 1985. En 1989, il a obtenu un doctorat (Dr. rer. nat.) dans le domaine de la théorie mathématique de la bifurcation et de son application aux problèmes d'écoulement des fluides.

De 1989 à 1991, il a travaillé à l'Institut des technologies de l'énergie (IfE) de Leipzig (Saxe). Il a mis au point et appliqué des codes de calcul en vue de la simulation numérique des écoulements de fluides et des transports de contaminants. Au cours de cette période, il s'est de plus en plus intéressé aux questions environnementales, notamment dans le domaine de la gestion des déchets radioactifs.

En 1991, il a rejoint la Société pour la sécurité des réacteurs (GRS), à Cologne, oeuvrant tout d'abord dans la modélisation hydrogéologique et la simulation numérique des écoulements d'eau et de la migration des contaminants dans le champ proche des stockages définitifs de déchets radioactifs. Au cours des années suivantes, le champ de ses activités s'est élargi vers d'autres domaines liés aux études de sûreté des stockages de déchets radioactifs, tels la méthodologie des études et démonstrations de sûreté, l'élaboration de scénarios, l'assurance de la qualité des codes de calcul utilisés pour les évaluations, et les méthodes probabilistes. Il s'intéresse tout particulièrement à l'utilisation des méthodes géostatistiques pour les analyses de sûreté probabilistes. Responsable du projet de support technique au Ministère fédéral de l'Environnement, de la Protection de la nature et de la Sûreté des réacteurs (BMU), qui est le régulateur allemand, dans le domaine des études de sûreté après fermeture, il participe à l'élaboration des critères de sûreté et des lignes directrices réglementaires liés au stockage des déchets radioactifs.

M. Röhlig a fait partie du Groupe consultatif de l'AEN sur l'évaluation des performances des systèmes de stockage des déchets radioactifs (PAAG) et siège actuellement au Groupe d'intégration pour le dossier de sûreté des stockages de déchets radioactifs (IGSC). Il a participé et participe toujours à plusieurs activités de ces groupes, notamment le PSAG, l'IPAG et le GEOTRAP. Il préside le Groupe d'orientation du récent Projet international de l'AEN/OCDE sur les approches et les méthodes pour intégrer les données géologiques dans les dossiers de sûreté (AMIGO). En 2000, il a travaillé comme consultant au siège de l'AEN, à Issy-les-Moulineaux.

Il participa à la revue du *Dossier 2001 Argile* de l'Andra, sous l'égide de l'AEN et, en 2004, fut membre du Groupe de revue international qui examina, à la demande de SKI/SSI, le rapport d'étape SR-Can de SKB.

*Annexe 2*  
**DOCUMENTS EXAMINÉS**

Les principaux documents examinés ont été :

- [1] *Synthèse, Évaluation de faisabilité du stockage géologique en formation argileuse*, 175 p. (*Synthesis Report – Evaluation of the Feasibility of a Geological Repository in a Clay Formation*).
- [2] *Évolution phénoménologique du stockage géologique*, TEP, C.RP.ADS.04.0025, 520 p. (*Phenomenological Evolution of a Geological Repository*).
- [3] *Évaluation de sûreté du stockage géologique*, TES, C.RP.ADSQ.05.0018, 705 p. (*Safety Assessment of a Geological Repository*).
- [4] *Architecture et gestion du stockage géologique*, TAG, C.RP.ADP.04.0001, 483 p. (*Architecture and Management of a Geological Repository*).
- [5] *Référentiel des matériaux d'un stockage de déchets à haute activité et à vie longue*, C.RP.ASCM.04.0015.A.
- [6] *Référentiel de connaissance et modèle d'inventaire des colis de déchets à haute activité et à vie longue*, (C.RP.AHVL.04.0006.A, 364 p.).
- [7] *Référentiel du site de Meuse/Haute-Marne* (C.RP.ADS.04.0022.A), y compris : Annexe « Analyse comparée des contextes géologiques et pétrographiques avec l'argile à Opalinus (Mont Terri, Suisse) ».
- [8] *Référentiel de comportement des radionucléides et des toxiques chimiques d'un stockage dans le Callovo-Oxfordien jusqu'à l'homme, Site de Meuse/Haute-Marne* (C.RP.ASTR.04.0032.A) et examen particulier du Chapitre 5 « Comportement des radionucléides et des toxiques chimiques dans le Callovo-Oxfordien ».
- [9] Programme scientifique et technique HAVL – Argile 2006-2010 (version A provisoire, 96 p.).

Le GRI a revu les documents suivants de niveau 4 et 5 dans leur version anglaise :

- [10] *Gas Production and Transfer in the Repository and in the Callovo-Oxfordian Layer: Relation to the Hydraulic Transient – Meuse/Haute-Marne Site* (C.NT.ASCM.03.0042B, 51 p.).
- [11] *The Corrosion of Metal Disposal Components: (Over)packs of Vitri-fied Waste Packages and Spent Fuel and Metal Infrastructures – Meuse/Haute-Marne Site*, (C.NT.ASCM.03.0046C, 65 p.).
- [12] *Geological and Hydrogeologic Models of the Formations Surrounding the Callovo-Oxfordian Layer in Their Initial State – Meuse/Haute-Marne Site* (C.NT.ASMG.03.0108B, 83 p.).
- [13] *Model of Flow and Solute Transport in the Callovo-Oxfordian (Sound and Disturbed) – Meuse/Haute-Marne Site* (C.NT.ASTR.03.0022B, 66 p.).
- [14] *Geological Model of the Callovo-Oxfordian Formation in Initial State – Meuse/Haute-Marne Site* (C.NT.ASMG.03.0101C, 44 p.).
- [15] *The “Phenomenological » Conceptualisation of the Normal Evolution Scenario (NES): Proposals – Meuse/Haute-Marne Site*, (C.NT.ASIT.03.0128B, 214 p.).
- [16] *Qualitative Long-term Safety Analysis of a Deep Clay Formation Repository – Meuse/Haute-Marne Site*, C.NT.AMES.04.0049A, 590 p.).
- [17] *Internal Functional Analysis of a Deep Clay Repository in Post-closure Phase – Meuse/Haute-Marne Site* (C.RP.AHVL.01.031D, 68 p.).
- [18] *External Functional Analysis of a Repository in a Deep Clay Formation – Meuse/Haute-Marne Site* (C.RP.AHVL.00.140D, 55 p.).
- [19] *Synthesis of Waste Package Release Models – Meuse/Haute-Marne Site* (C.NT.ASCM.03.0045B, 122 p.).
- [20] *Chemical Evolution of Swelling Clay Based Structures in a Repository: Disposal Cells for C Waste and Spent Fuel, Drift and Shaft Seals – Meuse/Haute-Marne site* (C.NT.ASCM.03.043B, 64 p.).
- [21] *The Chemistry of Interstitial Water in the Callovo-Oxfordian Layer in Its Initial State – Meuse/Haute-Marne Site* (C.NT.ASTR.03.023C, 50 p.).
- [22] *Porewater Chemistry, Porosity and Hydraulic Conductivity of Callovo-Oxfordian Claystone at the EST-322 Deep Drilling Site*

*Sampled by the Method of Advective Displacement – Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne. Draft Bure Project Nagra Report (NAB), U. Mäder, University of Bern, Suisse.*

- [23]  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  Disequilibrium Along Stylolitic Discontinuities in Deep Mesozoic Limestone Formations of the Eastern Paris Basin: Evidence for Discrete Uranium Mobility Over the Last 1-2 Million Years. C. Hillaire-Marcel, J.-L. Michelot, R. Doucelance, B. Ghaleb, and S. Buschaert. 2004. *Hydrogeology and Earth System Science*, Vol. 8, No. 1, p. 35-46.

Le GRI a revu les documents suivants de niveau 4 et 5 dans leur version française:

- [24] *L'Architecture des calculs de sûreté d'un stockage en formation argileuse profonde – Site de Meuse/Haute-Marne* (C.NT.ACSS.03.113B, 67 p.).
- [25] *Événements sédimentaires, diagénétiques et post-diagénétiques dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordian (Bassin de Paris, France) : enregistrement isotopique des minéraux et de l'eau porale*. V. Lavastre. Thèse de doctorat de l'université de Paris VII, Rapport FORPRO 2002/13Th, Paris, France, 195 p.

L'Andra a également présenté d'autres documents justificatifs et disponibles en français à la demande du GRI. La revue s'est aussi inspirée des informations fournies dans les réponses aux questions soulevées par le GRI et des échanges approfondis avec les scientifiques et ingénieurs de l'Andra (voir section 1.4).



*Annexe 3*  
**LISTES DES ACRONYMES**

<b>Acronyme français</b>	<b>Désignation française</b>	<b>Désignation anglaise</b>	<b>Acronyme anglais</b>
AEN	Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire	OECD Nuclear Energy Agency	NEA
AFE	analyse fonctionnelle externe	external functional analysis	EFA
AFI	analyse fonctionnelle interne	internal functional analysis	IFA
Andra	Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs	National Radioactive Waste Management Agency	
APSS	analyse phénoménologique des situations de stockage	phenomenological analysis of repository situations	PARS
AQS	analyse qualitative de sûreté	qualitative safety analysis	QSA
ASN	Autorité de sûreté nucléaire	Nuclear Safety Authority	
CEA	Commissariat à l'énergie atomique	Atomic Energy Commission	
CNE	Commission nationale d'évaluation	National Review Board	
COX	argilite du Callovo-Oxfordien	Callovo-Oxfordian argillite	COX
FRF	forage de reconnaissance de la formation	formation reconnaissance borehole	
FSP	forage scientifique profond	deep scientific borehole	
GPD	Groupe permanent déchets auprès de l'Autorité de sûreté nucléaire	Standing Advisory Group of the Nuclear Safety Authority	
GRI	Groupe de revue international	International Review Team	IRT

HAVL	[déchets à] haute activité et à vie longue	high-level long-lived [waste]	LL-HLW (ou HLLLW)
LRS	Laboratoire de recherche souterrain	Underground Research Laboratory	URL
R-D	recherche et développement	research and development	R-D
RFS III.2.f	<i>Règle fondamentale de sûreté III.2.f</i>	<i>Basic Safety Rule III.2.f</i>	
SEA	scénario d'évolution altérée	altered evolution scenario	AES
SEN	scénario d'évolution normale	normal evolution scenario	NES
THMCR	[phénomènes] thermiques, hydrauliques, mécaniques, chimiques et radiologiques	thermal, hydraulic, mechanical, chemical and radiological [phenomena]	THMCR
	zone perturbée [lors de l'excavation]	excavation disturbed zone	EDZ
	caractéristiques, événements et processus	features, events and processes	FEP
	mandat	Terms of reference	ToR



LES ÉDITIONS DE L'OCDE, 2, rue André-Pascal, 75775 PARIS CEDEX 16  
IMPRIME EN FRANCE