

Gestion des déchets radioactifs

ISBN 92-64-02137-X

**Programme français de R-D
sur le stockage géologique
de déchets radioactifs**

**Revue internationale par des pairs
du Dossier 2001 Argile**

© OCDE 2003

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

ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES

En vertu de l'article 1^{er} de la Convention signée le 14 décembre 1960, à Paris, et entrée en vigueur le 30 septembre 1961, l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) a pour objectif de promouvoir des politiques visant :

- à réaliser la plus forte expansion de l'économie et de l'emploi et une progression du niveau de vie dans les pays Membres, tout en maintenant la stabilité financière, et à contribuer ainsi au développement de l'économie mondiale ;
- à contribuer à une saine expansion économique dans les pays Membres, ainsi que les pays non membres, en voie de développement économique ;
- à contribuer à l'expansion du commerce mondial sur une base multilatérale et non discriminatoire conformément aux obligations internationales.

Les pays Membres originaires de l'OCDE sont : l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, le Canada, le Danemark, l'Espagne, les États-Unis, la France, la Grèce, l'Irlande, l'Islande, l'Italie, le Luxembourg, la Norvège, les Pays-Bas, le Portugal, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse et la Turquie. Les pays suivants sont ultérieurement devenus Membres par adhésion aux dates indiquées ci-après : le Japon (28 avril 1964), la Finlande (28 janvier 1969), l'Australie (7 juin 1971), la Nouvelle-Zélande (29 mai 1973), le Mexique (18 mai 1994), la République tchèque (21 décembre 1995), la Hongrie (7 mai 1996), la Pologne (22 novembre 1996), la Corée (12 décembre 1996) et la République slovaque (14 décembre 2000). La Commission des Communautés européennes participe aux travaux de l'OCDE (article 13 de la Convention de l'OCDE).

L'AGENCE DE L'OCDE POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

L'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN) a été créée le 1^{er} 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 2003

Les permissions de reproduction partielle à usage non commercial ou destinée à une formation doivent être adressées au Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris, France. Tél. (33-1) 44 07 47 70. Fax (33-1) 46 34 67 19, pour tous les pays à l'exception des États-Unis. Aux États-Unis, l'autorisation doit être obtenue du Copyright Clearance Center, Service Client, (508)750-8400, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA, ou CCC Online : <http://www.copyright.com/>. Toute autre demande d'autorisation ou de traduction totale ou partielle de cette publication doit être adressée aux Éditions de l'OCDE, 2, rue André-Pascal, 75775 Paris Cedex 16, France.

PRÉFACE

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 revues indépendantes et internationales par des pairs d'études et de projets nationaux. Les revues de l'AEN aident les programmes nationaux à évaluer leur état d'avancement. Les rapports d'examen peuvent aussi être utiles aux autres pays membres grâce aux observations qu'ils contiennent sur des questions d'ordre général.

Le gouvernement français s'est adressé à l'AEN pour que le *Dossier 2001 Argile* de l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) fasse l'objet d'une revue internationale par des pairs. La portée et les objectifs de la revue sont précisés dans le mandat. Conformément à celui-ci, le Secrétariat de l'AEN a constitué un groupe international de revue (GIR), composé de huit experts internationaux, y compris un agent du Secrétariat de l'AEN. Ces experts ont été choisis pour leurs compétences complémentaires. L'opinion des experts devrait aider les autorités françaises, ainsi que les institutions, organisations et sociétés qui s'occupent de la gestion des déchets, à fixer leurs futurs programmes de travail et leurs priorités.

Le présent rapport rend compte de l'opinion consensuelle du GIR. Il s'appuie sur l'examen du *Dossier 2001 Argile* et ses pièces justificatives, sur les informations que l'Andra a fournies dans ses réponses aux questions soulevées par le GIR et, enfin, sur les interactions directes du GIR avec les agents de l'Andra au cours d'un atelier d'une semaine qui s'est déroulé en France.

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 GIR 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.

Remerciements

Tous les membres du GIR 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 l'excellent appui de l'Agence tout entière qui a facilité leur travail. Le GIR est particulièrement reconnaissant aux agents de l'Andra pour leur obligeance et leur souci de transparence dans les réponses qu'ils ont apportées dans le cadre de la revue.

Note de traduction

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 « repository, disposal, deep disposal » de la version anglaise, dans un souci de cohérence avec le mode d'expression en France.

Table des matières

Préface	3
Résumé	7
1. Introduction	15
1.1 Contexte.....	15
1.2 Le <i>Dossier 2001 Argile</i>	17
1.3 Mandat.....	20
1.4 Conduite de la revue.....	22
1.5 Organisation du rapport.....	23
2. Revue des aspects fondamentaux	25
2.1 Clarté de la documentation.....	25
2.2 Cohérence des méthodologies utilisées pour évaluer la sûreté à long terme et la performance d'un éventuel stockage.....	28
2.3 Cohérence interne entre les connaissances scientifiques et techniques et les hypothèses utilisées dans le rapport.....	29
2.4 Pertinence des conclusions.....	30
2.4.1 Un processus d'acquisition de connaissances d'ores et déjà riche en acquis.....	30
2.4.2 Des solutions de conception concrètes pour les études de faisabilité.....	31
2.4.3 Examen des méthodes d'analyse, d'évaluation et d'interprétation.....	31
2.4.4 Enseignements pour les recherches à conduire.....	32
2.4.5 Une étape importante du processus d'évaluation de faisabilité.....	32

3. Revue des aspects particuliers	33
3.1 Corrosion	33
3.2 Conception du système de barrières ouvragées	36
3.3 Terme-source des colis de déchets.....	36
3.4 Absence de traitement des gaz dans l'analyse de sûreté.....	39
3.5 Caractérisation et modélisation du Callovo-Oxfordien et de ses environs	39
3.5.1 Caractérisation géologique générale	39
3.5.2 Transferts dans les argilites du Callovo-Oxfordien	42
3.5.3 Perturbations induites.....	44
3.5.4 Contexte hydrogéologique	44
3.5.5 Marges de sûreté	45
3.6 Réversibilité	46
3.7 Approche et méthodologie mises au point pour l'évaluation de sûreté.....	50
3.7.1 Généralités	50
3.7.2 Analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS).....	51
3.7.3 Analyse qualitative de sûreté (AQS).....	53
3.7.4 Gestion des différentes échelles de temps.....	55
3.7.5 Gestion des incertitudes	55
3.7.6 Analyses de sensibilité	56
4. Conclusions	59
4.1 Présentation de la documentation	59
4.2 Cohérence et pertinence des méthodes utilisées	60
4.3 Cohérence interne entre la base de connaissances et les hypothèses	61
4.4 Pertinence des conclusions	62
5. Références	65
 <i>Annexes</i>	
1. Composition du groupe de revue international.....	67
2. Liste des documents examinés	75
3. Liste des acronymes	79

RÉSUMÉ

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 examiné la documentation élaborée par l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) et connue globalement sous l'appellation de *Dossier 2001 Argile*. Comme développé ensuite, le Dossier représente un jalon important du programme de travail de l'Andra, lequel a pour objectif d'évaluer la faisabilité du stockage géologique en profondeur pour les déchets radioactifs de haute activité à vie longue produits en France. L'un des objectifs essentiels de la revue était de formuler des recommandations sur les développements et les améliorations qui pourraient maximiser l'apport du programme de travail de l'Andra aux solutions que les autorités françaises doivent retenir, en 2006, pour gérer les déchets radioactifs. Le présent rapport décrit l'opinion consensuelle du GRI. Cette opinion s'appuie sur le *Dossier 2001 Argile* et ses pièces justificatives, sur les informations fournies par l'Andra dans le cadre des réponses apportées aux questions soulevées par le groupe de revue, ainsi que sur les interactions directes avec le personnel de l'Andra tout au long d'un séminaire d'une semaine qui s'est déroulé en France.

Le *Dossier 2001 Argile* représente une étape dans le processus d'études et de recherches qui doit aboutir, en 2005, à la présentation d'un rapport qui contiendra les conclusions de l'Andra sur la faisabilité d'un stockage de déchets dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien, située dans l'Est de la France. En ce sens, il a le statut d'un rapport intermédiaire et d'un test méthodologique :

- Il rassemble les connaissances disponibles en 2001, acquises sur le site du laboratoire de Meuse/Haute-Marne et dans le cadre des nombreuses recherches réalisées.
- Il présente un état d'avancement de l'ensemble des programmes de recherche conduits par l'Andra, précisant les acquis en matière de

conception dans une logique de réversibilité et d'analyse de sûreté, mais aussi dessinant les perspectives quant aux recherches à venir.

- Il constitue un premier test des méthodes d'analyse en vue de soumettre ces dernières à la critique et de préparer suffisamment en amont le rapport remis en 2005.
- Cela signifie donc que le *Dossier 2001 Argile* ne se présente nullement comme un rapport définitif ou comme un document faisant partie d'une demande d'autorisation. Il est important de noter, en particulier, qu'il ne correspond pas à un examen de conformité par rapport au cadre réglementaire.

Le *Dossier 2001 Argile* est le premier rapport d'étape rédigé par l'Andra. Le gouvernement français souhaite que le document soit largement lu et débattu dans le but d'améliorer les méthodes et la rigueur de l'approche. Il a donc jugé utile de faire procéder à une revue de ce rapport par un groupe indépendant d'experts internationaux. L'expérience fructueuse des revues antérieures de l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN) a incité les autorités françaises à demander à l'AEN d'organiser un GRI pour examiner le *Dossier 2001 Argile* de l'Andra. Les membres du GRI ont été choisis en fonction de leur complémentarité selon leurs domaines de compétence respectifs.

Une réunion d'orientation s'est tenue les 14 et 15 novembre 2002 afin de s'assurer que le GRI soit en mesure de bien remplir son mandat. Après avoir examiné les documents prévus dans le cahier des charges, le GRI a demandé à l'Andra d'autres documents complémentaires. Le GRI a ensuite élaboré deux séries de questions écrites auxquelles l'Andra a répondu également par écrit dans des délais convenus. Du 3 au 7 février 2003 s'est tenu un séminaire alternant présentations et discussions sur des thèmes spécifiques déterminés par le GRI et s'achevant par une présentation orale de ses principales constatations préliminaires. La revue elle-même a été grandement facilitée par le climat d'ouverture et de transparence établi par la direction de l'Andra qui s'est engagée de manière permanente dans le processus de revue en mettant à disposition ses scientifiques et ingénieurs les plus qualifiés, de par leurs connaissances et leur expérience, pour répondre aux questions techniques et stratégiques.

Le présent rapport détaille les constatations du GRI ; il a été rédigé entre le 8 mars et le 8 avril 2003. Conformément à la procédure adoptée par l'AEN pour les revues indépendantes, ni le gouvernement français ni l'Andra n'ont eu l'occasion de commenter le présent rapport – l'Andra a seulement eu l'opportunité de vérifier l'exactitude des faits rapportés. Le GRI s'est efforcé, dans toute la mesure du possible, de veiller à ce que toutes les données

présentées soient exactes et il assume l'entière responsabilité de toute erreur dans l'exposé des faits. Le GRI tient à souligner qu'il disposait de renseignements suffisants pour remplir son mandat et qu'il a été en mesure, en particulier, de se faire une idée de la disponibilité des connaissances et la validité des processus visés.

Évaluation globale du point de vue international

Le GRI s'est appuyé sur les connaissances spécialisées de ses membres et leur compréhension collective des meilleures pratiques internationales pour évaluer les données présentées et formuler ses propres conclusions et recommandations.

Observations générales

- Une base de recherche et de développement solide et de haute qualité existe dans tous les domaines, bien que cela n'apparaisse pas toujours clairement dans la documentation disponible. La seule omission majeure en matière de recherche et développement concerne les questions liées aux gaz.
- Les facteurs de conception importants pour la sûreté sont clairement identifiés et les options de conception proposées semblent raisonnables. La conception modulaire semble prometteuse et devrait permettre de disposer d'architectures robustes au regard des incertitudes communément considérées.
- Le *Dossier 2001 Argile* permet de tester les méthodes d'analyse de sûreté. L'analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS) offre une méthode innovante pour atteindre un niveau de formalisme systématique souhaitable comme fondement de l'analyse de sûreté. Elle réussit à bien intégrer la science et l'évaluation de sûreté, tout en assurant une plate-forme utile pour communiquer avec la communauté scientifique. En principe, elle assure une analyse approfondie et traçable, mais certaines procédures ont besoin d'être encore développées pour y parvenir.
- Bien que le *Dossier 2001 Argile* ne constitue pas une analyse détaillée à ce stade, les informations qu'il contient sont conformes à la conclusion de l'analyse de sûreté qui ne décèle aucun facteur rédhibitoire quant à la faisabilité d'un stockage de déchets. Plus important encore, le *Dossier 2001 Argile* offre une base

méthodologique pertinente pour l'analyse plus complète qui doit être remise en 2005.

- Le programme scientifique pour 2002-2005 tire bien profit du *Dossier 2001 Argile* et les besoins de recherche et développement futurs sont clairement formulés. L'ensemble des besoins de recherche mentionnés dans le *Dossier 2001 Argile* sont abordés dans les programmes de travail proposés qui sont susceptibles de fournir les informations voulues en 2005.
- L'état actuel du projet et les questions importantes à étudier sont notés, mais ils auraient pu être explicités plus efficacement dans le *Dossier 2001 Argile*. Grâce à l'ensemble des informations et des méthodes qu'elle a mises au point, l'Andra dispose d'une plateforme solide pour étayer son programme des années à venir et, en particulier, pour s'acheminer vers une analyse plus approfondie et plus exhaustive en 2005.
- L'approche de « réversibilité » adoptée par l'Andra est prometteuse dans la mesure où elle fournit une base capable de maintenir la flexibilité technique tout au long de la phase d'exploitation du stockage de déchets. Une telle flexibilité technique pourrait être intégrée dans un modèle de prise de décision pas à pas qui n'a pas encore été fixé. La documentation pertinente ne définit pas les principes de base et la hiérarchie des valeurs qui sous-tendent le choix d'une conception de stockage de déchets réversible, et elle ne traite pas des compromis requis pour réaliser tel ou tel niveau plus ou moins important de réversibilité.

Solidité des bases techniques et pertinence de leur mise en œuvre

Le *Dossier 2001 Argile* repose sur une base technique solide qui a été de manière générale mise en œuvre de façon compétente. Le GRI considère qu'une telle réalisation est liée en partie à l'esprit d'ouverture de l'Andra et aussi à une intégration d'une large communauté scientifique dans son programme. 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 ;
- le partage des objectifs du programme.

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

Cohérence avec les normes et pratiques internationales

En ce qui concerne les bases scientifiques générales, les capacités de modélisation et l'approche de sûreté, les efforts de l'Andra sont jugés conformes aux normes et pratiques internationales.

Dans certains domaines, comme l'approche méthodique de tous les types de déchets comme terres sources (par exemple, le bitume, les coques et embouts), la conception de barrières multiples pour les déchets de type B, l'utilisation d'analogues archéologiques et industriels pour appuyer les choix de matériaux et l'évaluation de la stabilité géologique, le GRI considère que l'Andra est à *l'avant-garde* des travaux au niveau international.

Dans d'autres domaines, comme la description phénoménologique et les méthodes d'analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS), la prise en compte de la phase d'exploitation (réversibilité) et la conception modulaire du stockage de déchets, l'Andra est perçue comme *innovante*.

Travaux prévus et perspectives

Au vu du futur programme de travail de l'Andra et des orientations visibles dans les travaux en cours, le GRI est impressionné et félicite l'Andra pour la qualité du programme scientifique 2002-2005. Le GRI reconnaît le bien-fondé des priorités visant à brosser un tableau plus précis des aspects-clés du système de stockage en 2005. Le programme scientifique prévu est conforme avec ces priorités et s'avère un outil systématique pour obtenir les informations souhaitées. Sur l'état actuel de la science, l'Andra exprime des vues réalistes qu'elle nourrit par un processus permanent d'audits au sein de, et en liaison entre, chaque direction concernée. Le GRI a obtenu des preuves patentes d'un engagement dans ce processus qui ne s'appuie pas exclusivement sur les analyses numériques et les calculs de sensibilité et prend bien en compte le

besoin d'une compréhension scientifique de base. La seule lacune importante concerne l'impact des gaz sur la conception et la performance du stockage de déchets. Le GRI a aussi constaté que toute mise au point ultérieure de modèles numériques, qui sont déjà très robustes, devrait être mise en regard de la disponibilité des données et des connaissances requises.

Recommandations

Le GRI a formulé un certain nombre de suggestions destinées à améliorer le *Dossier 2001 Argile*. Les trois principales recommandations touchent la clarté de la documentation, la prise en compte des questions liées aux gaz dans la conception et la performance du stockage de déchets, ainsi qu'une meilleure explication du concept de réversibilité et des moyens de le justifier et de l'appliquer.

Le *Dossier 2001 Argile* ne précise pas le ou les publics auxquels il s'adresse et n'est pas rédigé en conséquence. Il comporte des incohérences de détails à propos des différents domaines techniques et présente un exposé incomplet de certaines informations importantes, ce qui engendre une confusion, même involontaire, dans la compréhension du Dossier. Le GRI constate que cela pourrait susciter des critiques qui ne seraient pas justifiées au regard du contenu technique de qualité du *Dossier 2001 Argile*. Ces problèmes sont largement attribuables à la grande ampleur du *Dossier 2001 Argile*, à l'état inégal de l'avancement des recherches dans les différents domaines au moment où le Dossier a été rédigé et au fait que l'Andra se trouve forcément en « phase d'apprentissage » pour tout ce qui concerne l'élaboration de ce type de documents. Le GRI recommande des efforts d'ensemble pour surmonter de telles difficultés lorsque viendra le moment de rédiger le rapport de 2005.

La production de gaz dans les stockages de déchets est reconnue à travers le monde comme un problème qui a des incidences aussi bien sur la conception que sur la performance du stockage. Le GRI a noté que des informations suffisantes manquaient au moment de terminer la rédaction du *Dossier 2001 Argile* pour traiter correctement des questions liées aux gaz. À mesure que l'Andra progresse dans ses travaux, toutefois, le GRI recommande que les problèmes attribuables aux gaz soient pleinement pris en compte dans les analyses de sûreté tant qualitatives que quantitatives.

Étant donné le rôle central que l'Andra sera amenée à jouer dans le débat national qui aura lieu en France en vue de définir des solutions pour la gestion à long terme des déchets radioactifs, il semble opportun que l'Andra entreprenne des travaux en vue de préciser les principes de base et la hiérarchie des valeurs

liées à la réversibilité et la récupérabilité des colis. Compte tenu du contexte sociétal de ce sujet, il serait aussi avantageux d'utiliser ces travaux pour encourager un débat général quant à tout développement ultérieur des architectures de stockage.

Aperçu général

Le GRI a été impressionné par les progrès accomplis depuis 1991 par l'Andra en partenariat avec les institutions de recherche et les universités sur son programme de R-D concernant le stockage dans des formations géologiques profondes. Une base méthodologique solide existe désormais pour évaluer la sûreté du stockage des déchets radioactifs de haute activité à vie longue dans des formations argileuses. Un corpus imposant de résultats de recherche et de données spécifiques au site a été établi et les priorités visant à son amélioration d'ici à 2005 sont bien étayées. Il est démontré que de solides procédures de gestion ont été mises en place pour intégrer les analyses de sûreté, la recherche et la conception technique, ce qui devrait assurer que la décision à prendre en 2006 sur les solutions proposées sera bien argumentée. Le GRI recommande qu'une attention particulière soit dévolue à la structure de la documentation à produire en 2005, ainsi qu'à la présentation et la traçabilité de l'information qu'elle contiendra. Il est capital que les bases scientifique et technique soient présentées de manière claire à tous les publics concernés.

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 profond des déchets radioactifs.

Après les tentatives avortées du Commissariat à l'énergie atomique (CEA) pour réaliser la reconnaissance géologique des quatre sites et évaluer les 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 [17]¹.

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 de haute activité à vie longue 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 irréversibles 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,

1. Les chiffres figurant entre crochets (e.g., [17]) renvoient au document correspondant énuméré à l'Annexe 2.

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 ;
- 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 Gard (formation argileuse), la zone de La-Chapelle-Bâton (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 2D) 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 de recherche souterrain sur le site de l'Est ;
- 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 en 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 laboratoire de recherche souterrain situé près de la commune de Bure, a pu commencer en

septembre 2000, après une campagne sismique 3D et la réalisation de forages supplémentaires pour caractériser les formations géologiques (et plus particulièrement la formation hôte potentielle, l'argilite du Callovo-Oxfordien) 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 laboratoire de recherche souterrain et se situe à une profondeur moyenne de 500 m.

Le programme de R-D de l'Andra concernant la faisabilité du stockage des déchets radioactifs de haute activité à vie longue dans des formations géologiques profondes constituées d'argilite du Callovo-Oxfordien dans l'est de la France est intitulé « Projet HAVL Argile ». En vue de l'évaluation détaillée que le Parlement doit réaliser en 2006, en application de la Loi de 1991, l'Andra a rédigé un rapport d'étape du Projet HAVL Argile en 2001. C'est ce dossier qui fait l'objet de la présente revue.

1.2 Le Dossier 2001 Argile

Le *Dossier 2001 Argile* représente une étape dans le processus d'études et de recherches qui aboutira à la présentation du rapport prévu en 2005 et qui contiendra les conclusions de l'Andra sur la faisabilité d'un stockage de déchets dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien.

En ce sens, il a le statut d'un rapport intermédiaire et d'un test méthodologique :

- il rassemble les connaissances disponibles en 2001, acquises sur le site du laboratoire de Meuse/Haute-Marne et dans le cadre des nombreuses recherches réalisées ;
- il présente un état d'avancement de l'ensemble des programmes de recherche conduits par l'Andra, précisant les acquis en matière de conception dans une logique de réversibilité et d'analyse de sûreté, mais aussi dessinant les perspectives quant aux recherches à venir ;
- il constitue un premier test des méthodes d'analyse en vue de soumettre ces dernières à la critique et de préparer suffisamment en amont le rapport remis en 2005.

Cela signifie donc que le *Dossier 2001 Argile* ne se présente nullement comme un rapport définitif ou comme un document faisant partie d'une demande d'autorisation. Il est important de noter, en particulier, qu'il ne

correspond pas à un examen de conformité par rapport au cadre réglementaire. Néanmoins et selon la procédure, il fait l'objet d'un examen par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et la CNE.

Par principe, les méthodes qui y sont exposées seront évaluées d'un point de vue critique de manière à ce que l'approche puisse être améliorée et rendue aussi approfondie que possible. Il serait prématuré de tirer des conclusions définitives à ce stade, mais il est capital de noter que le *Dossier 2001 Argile* avait pour but de tester la méthodologie exposée.

Le *Dossier 2001 Argile* a eu un triple effet sur les activités à venir :

- il a conduit à une évaluation critique de tous les programmes de recherche, mettant en forme leur développement et évaluant leur pertinence ; en particulier, il a déterminé la nature précise des exigences en matière de connaissances relatives au laboratoire souterrain ;
- il a contribué à identifier les principales questions scientifiques à étudier dans les programmes de recherche, y compris les éléments qui ont un rôle particulièrement sensible dans la robustesse du stockage ;
- il a orienté le choix, en 2002, des concepts de stockage à étudier ; un éventail plutôt vaste de concepts de stockage avait été examiné jusqu'en 2001 sans objectif particulier d'optimisation. En 2002, un certain nombre de concepts a été retenu pour faire l'objet d'études plus approfondies jusqu'en 2005.

Au-delà de l'expérience acquise, il est aussi important de souligner les limites des travaux accomplis dans le cadre du *Dossier 2001 Argile* :

1. Le *Dossier 2001 Argile* ne prétend pas établir la faisabilité du projet, mais montre simplement que, à ce stade préliminaire, aucun facteur rédhibitoire n'a été mis en lumière.
2. L'analyse de sûreté est délibérément limitée dans son étendue :
 - le nombre de scénarios a été volontairement restreint à deux : le scénario d'évolution normale et un scénario altéré (défaillance des scellements), et
 - les calculs de relâchement de radionucléides ont été limités à 15 radionucléides par type de colis de déchets.

Cette situation découle du fait que le principal objectif du *Dossier 2001 Argile* vise à développer et à tester des méthodes. L'analyse de sûreté à réaliser pour respecter l'échéance de 2006 comportera d'autres scénarios, comme la défaillance des colis, le passage d'un forage à travers les galeries de stockage, etc.

3. Les calculs de sûreté et, plus particulièrement, les conséquences radiologiques présentées dans le *Dossier 2001 Argile* ne représentent que des estimations brutes et ne prétendent nullement refléter fidèlement la réalité. Ils sont tous fondés sur des hypothèses qui sont systématiquement prudentes et défavorables. Les valeurs calculées offrent des ordres de grandeur dont le seul mérite est de permettre à l'Andra d'identifier les composants importants et d'orienter l'analyse vers les questions les plus sensibles. Ainsi, par exemple, les valeurs obtenues pour les calculs de doses ne peuvent être comparées de manière pertinente avec les limites réglementaires de référence. L'analyse d'incertitude n'est que préliminaire et a besoin d'être approfondie.
4. Le *Dossier 2001 Argile* se fonde sur les informations préliminaires relatives aux architectures du stockage qui ont été révisées en 2002 à la lumière des résultats du Dossier. Les éléments du *Dossier 2001 Argile* ne peuvent donc pas être considérés comme représentant ou anticipant les solutions techniques qui seront proposées dans le rapport de faisabilité à remettre en 2005.

Le *Dossier 2001 Argile* comprend deux documents de synthèse : un rapport destiné à un vaste public (Rapport de synthèse – Partie A) [1] et un rapport scientifique plus volumineux (Rapport de synthèse – Partie B Compléments scientifiques et techniques) [2] qui développe les informations contenues dans le Rapport A. La Partie B présente les détails techniques dans quatre domaines : l'acquisition des connaissances, l'étude des concepts de stockage, la compréhension et la modélisation du système de stockage, ainsi que l'analyse de la sûreté en phase d'exploitation et à long terme. Outre ces documents de synthèse, le *Dossier 2001 Argile* comprend des documents de référence sur les colis de déchets, les matériaux, la biosphère et la géologie. L'Andra a aussi rédigé plusieurs rapports comme pièces annexes destinées à appuyer le *Dossier 2001 Argile*.

1.3 Mandat

Le gouvernement français souhaite que le document soit lu et débattu par un vaste auditoire dans le but d'améliorer les méthodes et la rigueur de l'approche. Il a donc jugé utile de faire procéder à une revue de ce premier rapport par un groupe indépendant d'experts internationaux. L'expérience fructueuse des revues antérieures de l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN) a incité les autorités françaises à demander à l'AEN d'organiser un GRI afin d'examiner le *Dossier 2001 Argile* de l'Andra. Les membres du GRI ont été choisis en fonction de leur complémentarité selon leurs domaines de compétence respectifs. L'Annexe 1 donne la liste des membres du GRI, ainsi qu'un résumé biographique.

Comme il est indiqué dans le mandat, l'objectif de la revue était de vérifier que le *Dossier 2001 Argile* reposait sur des bases solides et mises en œuvre de façon compétente. Il s'agissait aussi d'évaluer la cohérence de l'approche méthodologique de l'Andra à la lumière des normes et pratiques internationales. Enfin, la revue visait à juger si les travaux futurs et les perspectives prévues par l'Andra étaient cohérents et si les priorités étaient bien définies. Les autorités françaises étaient particulièrement soucieuses d'obtenir des recommandations détaillées sur toute amélioration spécifique à apporter.

La revue internationale devait indiquer aux autorités françaises (Ministère de l'Industrie et ministère de la Recherche) si le programme de R-D, à ce stade intermédiaire, est conforme : (i) aux programmes d'études du stockage des autres pays, spécialement dans les formations argileuses et (ii) aux pratiques internationales.

Dans l'ensemble, la revue internationale devait évaluer :

- la clarté de la documentation, dans sa structure et sa synthèse (Parties A et B) ;
- la cohérence des méthodes appliquées pour évaluer la sûreté et la performance à long terme d'un stockage de déchets potentiel, ainsi que sa conformité avec le principal objectif qui est l'identification des composants dotés d'un rôle important dans la robustesse du stockage ;
- la cohérence interne entre la base de connaissances scientifiques et techniques (connaissances acquises et données bibliographiques), d'une part, et les hypothèses utilisées dans le rapport à différents niveaux, d'autre part : connaissances de base, descriptions phéno-

ménologiques, valeurs retenues des paramètres et modèles conceptuels, et

- la pertinence des conclusions, notamment celles qui sont liées au principal objectif du *Dossier 2001 Argile*.

Le champ de la revue ne devait pas inclure les concepts préliminaires du stockage et de leur incidence sur la sûreté au cours des phases de construction et d'exploitation du stockage, dans la mesure où des architectures différentes ont été retenues en 2002.

Dans le contexte des objectifs généraux mentionnés plus haut, la revue internationale devait se concentrer spécifiquement sur :

- les hypothèses sur la durée de vie des colis de déchets et de leur surconteneur éventuel, notamment pour tous ceux qui sont à l'étude pour les déchets vitrifiés et le combustible usé, en liaison avec le comportement des matériaux métalliques et surtout de leur corrosion ;
- le relâchement de radionucléides imputable à la dégradation soit de la matrice de déchets, soit des déchets eux-mêmes ;
- la méthodologie utilisée pour modéliser la formation du Callovo-Oxfordien sur une base régionale à partir des données du site ;
- la façon dont la réversibilité est définie, puis analysée ;
- l'approche méthodologique, appelée « analyse phénoménologique des situations de stockage » (APSS), dont le but est de dresser un inventaire détaillé et une description dans le temps et dans l'espace de tous les phénomènes susceptibles de se produire dans le stockage ;
- la démarche et la méthodologie mises au point en vue de l'analyse de sûreté : plutôt que de faire appel à une base de données « caractéristiques, événements, processus » (*Features, Events, Processes – FEP*), l'APSS sert de fondement à l'analyse qualitative de sûreté (AQS) ; les deux démarches (FEP et APSS/AQS) ont conduit à la définition du scénario de référence et de scénarios altérés ;
- la gestion des différentes échelles de temps : les analyses de sûreté des stockages géologiques profonds prennent en compte des périodes de millions d'années ; une question importante est d'équilibrer les informations sur les différentes échelles de temps,

conformément aux dispositions de la Règle fondamentale de sûreté RFS III.2.f [18], et

- la gestion des incertitudes : deux types d'incertitudes doivent être prises en compte dans une analyse de sûreté, les incertitudes liées à l'évolution future du stockage et les incertitudes liées au manque de connaissances, aux données insuffisantes et aux hypothèses retenues. La revue internationale devait examiner comment le *Dossier 2001 Argile* abordait ces incertitudes.

Les documents qui ont été examinés par le GRI dans le cadre de la revue sont énumérés à l'Annexe 2. Le GRI note que les travaux techniques traités dans le *Dossier 2001 Argile* ont été achevés en 2001 et que d'autres progrès ont été réalisés depuis. Ces travaux ultérieurs ont parfois été décrits lors des échanges oraux avec l'Andra et le programme scientifique prévu pour 2002-2005 [14] a été examiné, sans que le *Dossier 2001 Argile* ne cesse pour autant d'être au cœur de la revue.

1.4 Conduite de la revue

La première réunion du GRI a eu lieu au siège de l'Andra, à Châtenay-Malabry, les 14 et 15 novembre 2002. Au cours de ces deux journées, le personnel de l'Andra a présenté un aperçu du *Dossier 2001 Argile*. Un représentant des ministères français a aussi exposé le point de vue du gouvernement sur le *Dossier 2001 Argile* et sur le but de la revue par le GRI. Ce dernier a également discuté de la teneur du mandat pour la revue et de la répartition du travail parmi les membres du groupe.

Au cours de la réunion à Châtenay-Malabry, les parties ont convenu que la revue du GRI concentrerait son examen des détails techniques sur le relâchement des radionucléides par les colis de déchets et, à un degré moindre, sur la corrosion des métaux ; le reste du *Dossier 2001 Argile* étant considéré davantage à titre de démonstration de procédures et de méthodes que de produit technique fini susceptible de faire l'objet d'un examen technique détaillé. En plus des domaines-clés décrits dans le mandat, l'Andra a demandé explicitement au GRI de lui fournir son avis sur :

- l'approche préconisée par l'Andra pour construire le modèle conceptuel géologique ;
- la façon de déterminer le niveau d'importance à accorder aux différents facteurs selon les diverses échelles de temps considérées.

L'Andra a aussi demandé au GRI de lui faire part de ses observations sur la présentation générale des informations dans le *Dossier 2001 Argile*.

Au cours des semaines qui ont suivi, les membres du GRI ont examiné les principaux documents et les pièces justificatives énumérés à l'Annexe 2, en se penchant plus précisément sur les sections des rapports qui portaient plus directement sur leur champ de compétence. Pendant cet examen, le GRI a envoyé deux séries de questions à l'Andra pour clarifier certains points. L'Andra a répondu par écrit à toutes ces questions.

Le GRI s'est réuni pour la deuxième fois, lors du séminaire d'une semaine qui s'est tenu du 3 au 7 février 2003. Des scientifiques et ingénieurs de l'Andra ont fait des présentations traitant d'un certain nombre de questions importantes soulevées par le GRI et engendrant des discussions, notamment en ce qui concerne la méthode utilisée dans les analyses de sûreté, l'évolution des architectures de stockage envisagées par l'Andra, le modèle hydrogéologique et la gestion des incertitudes. Les membres du GRI ont aussi posé des questions détaillées aux experts français qui leur ont répondu. Dans un certain nombre de cas, l'Andra a rédigé des notes de synthèse à l'intention du GRI.

À la clôture du séminaire, le 7 février 2003, le président du GRI, Alan Hooper, a présenté oralement la position collective préliminaire du GRI à l'Andra et aux représentants du gouvernement français et des autorités. Chaque membre du GRI a rédigé son propre avis et ses propres observations qui ont ensuite été compilés dans un projet de rapport. Ce dernier a été révisé par les membres du groupe qui en ont discuté à plusieurs reprises avant d'aboutir à la présente version. Dès que le rapport contenant les vues consensuelles du GRI a été prêt, il a été présenté à l'Andra à la seule fin d'en vérifier les données factuelles et non pour formuler ses observations. Toutefois, le GRI assume pleinement la responsabilité de toute erreur dans l'exposé des faits.

1.5 Organisation du rapport

Les éléments du contexte, le *Dossier 2001 Argile*, le mandat et la conduite de la revue sont présentés dans les chapitres précédents de la présente section.

La section 2 traite des aspects fondamentaux de la revue définis selon les termes du mandat.

La section 3 s'adresse aux lecteurs qui s'intéressent davantage aux questions plus techniques et présente des observations détaillées sur des aspects

spécifiques du *Dossier 2001 Argile*. Les différentes disciplines qui sous-tendent le *Dossier 2001 Argile* sont abordées dans des sous-sections particulières, notamment en ce qui concerne la qualité de la base technique et scientifique des travaux entrepris.

La section 4 présente les conclusions générales.

La revue suppose que le lecteur est au moins familier avec les objectifs et le contenu du *Dossier 2001 Argile* en général, mais pas nécessairement avec tous les détails de la documentation.

2. REVUE DES ASPECTS FONDAMENTAUX

Le mandat décrit quatre aspects fondamentaux que la revue internationale devait évaluer sur le *Dossier 2001 Argile* :

- la clarté de la documentation, dans sa structure et sa synthèse (Parties A et B) ;
- la cohérence des méthodes appliquées pour évaluer la sûreté et la performance à long terme d'un éventuel stockage de déchets, ainsi que sa conformité avec le principal objectif qui est l'identification des composants dotés d'un rôle important dans la robustesse du stockage ;
- la cohérence interne entre la base de connaissances scientifiques et techniques (connaissances acquises et données bibliographiques), d'une part, et les hypothèses utilisées dans le rapport à différents niveaux, d'autre part : connaissances de base, descriptions phénoménologiques, valeurs retenues des paramètres et modèles conceptuels ;
- la pertinence des conclusions, notamment celles qui sont liées au principal objectif du *Dossier 2001 Argile*.

L'évaluation du GRI pour chacun de ces aspects est présentée ci-dessous.

2.1 Clarté de la documentation

La clarté de la documentation présentée dans le *Dossier 2001 Argile* est variable. Une part de cette variabilité peut être imputable à la grande ampleur du Dossier, à l'état inégal d'avancement des recherches dans les différents domaines au moment où le Dossier a été rédigé et au fait que l'Andra se trouve forcément en « phase d'apprentissage » pour tout ce qui concerne l'élaboration de ce type de documents. Toutefois, dans certains domaines, comme la modélisation hydrogéologique, le *Dossier 2001 Argile* ne reflète tout simplement pas le travail excellent et approfondi que l'Andra a présenté au cours de ses discussions techniques avec le GRI et ne fournit pas toutes les données de référence qui pourraient intéresser le lecteur technique. Cette

présentation incomplète du travail accompli pourrait susciter des critiques négatives sur le *Dossier 2001 Argile* qui auraient pu être évitées. Dans d'autres domaines, comme la corrosion et la stabilité géologique, les informations et les arguments présentés sont à la fois clairs et complets, et peuvent être retracés jusqu'aux pièces justificatives associées.

Étant donné le caractère préliminaire du *Dossier 2001 Argile*, il était probablement impossible de produire une documentation complète et cohérente. Toutefois, le *Dossier 2001 Argile* aurait pu intégrer certains facteurs et considérations qui en auraient amélioré la lisibilité et qui devraient être gardés à l'esprit lors de l'élaboration du *Dossier 2005*. Ces facteurs comprennent :

- L'identification du public auquel s'adresse chaque élément du *Dossier 2001 Argile* et une adaptation soignée du niveau de détail aux besoins de ce public . Les deux parties (A et B) du Rapport de synthèse [1, 2], avaient pour but de répondre aux besoins des différents publics à des niveaux de détail différents, mais il n'est pas clair à quel point les publics des deux parties étaient bien départagés et, par conséquent, à quel point le *Dossier 2001 Argile* pouvait réussir à satisfaire leurs différents besoins. S'il est prévu de réaliser des documents de synthèse du *Dossier 2005*, il conviendrait de les rédiger en fonction des différentes attentes des décideurs, des évaluateurs de haut niveau technique (voire des régulateurs), et du public intéressé. De même, le volume 5 du *Référentiel géologique du site de Meuse/Haute-Marne* [4] semble s'adresser à un lecteur technique, mais n'offre pas le niveau de détail auquel un tel lecteur pourrait s'attendre ;
- la présentation claire, tôt dans le processus, de l'agencement général des différentes composantes du *Dossier 2001 Argile* . Un organigramme ou une arborescence des documents pourraient être utilisés pour montrer les relations entre les nombreux documents rattachés au *Dossier 2001 Argile* ;
- des documents individuels (comme APSS – Objet et méthodologie [10]) susceptibles d'être appréhendés de manière autonome, bien que cela puisse entraîner la répétition de certaines informations présentées ailleurs. Comme peu de personnes liront l'ensemble des documents, il convient que tous les documents individuels soient les plus complets possible ;
- la présentation d'un aperçu plus détaillé de l'ensemble du *Dossier 2001 Argile* dans le Rapport de synthèse ; par exemple, des éléments du chapitre traitant du contexte dans le document Approche de

sûreté [11] pourraient y être intégrés afin d'assurer une meilleure compréhension des objectifs et méthodes du *Dossier 2001 Argile* ;

- la présentation d'une meilleure justification de la logique de la démarche globale adoptée pour acquérir et modéliser les données. Cela contribuerait à mettre en perspective les informations présentées (objectifs, contraintes, etc.). La méthode retenue par l'Andra pour définir le futur programme scientifique [14] est un bon exemple d'une telle approche ;
- les constats et conclusions devraient mentionner de manière beaucoup plus détaillée les références sur lesquelles ils reposent. Dans de nombreux domaines, le *Dossier 2001 Argile*, y compris ses pièces justificatives, ne contenait que peu de références directes, compliquant ainsi la tâche du lecteur en quête de renseignements complémentaires sur ces points précis, et
- une utilisation plus complète de figures et d'illustrations à l'appui du texte écrit. Des figures comme des organigrammes et des coupes peuvent aider à comprendre des relations complexes et/ou spatiales. Ces figures pourraient, dans certains cas, être des versions simplifiées de celles contenues dans les pièces justificatives et montrant seulement les éléments nécessaires pour étayer le développement. Un grand nombre des figures présentées dans les documents de synthèse ont été empruntées directement de pièces justificatives plus détaillées et comprenaient des informations ou des éléments superflus qui ne pouvaient être compris hors de leur contexte d'origine.

Le *Dossier 2001 Argile* n'a pas été conçu comme une présentation de rapport de sûreté. Néanmoins, l'exposé sur la mise au point d'une base de recherche et d'évaluation en vue du stockage de déchets dans la formation du Callovo-Oxfordien aurait pu bénéficier d'une démarche raisonnée plus stricte, notamment :

- en présentant d'abord un exposé concis du concept de stockage global et des fonctions des différentes barrières, pour pouvoir expliquer ensuite la performance attendue ou voulue de chaque barrière et aborder les éléments de preuve disponibles montrant que la performance souhaitée ou attendue était réaliste,
- en s'attachant soigneusement à présenter un exposé global des phénomènes, tout en évitant d'accorder trop de valeur aux facteurs ou

aux exceptions de moindre importance (e.g., oxydation du combustible usé),

- en exposant les éléments susceptibles de créer la confiance.

Les autres éléments à intégrer comprennent :

- un exposé et une justification des modèles conceptuels, et
- un exposé sur les modèles et codes numériques utilisés pour les calculs, y compris les détails de leur mise en œuvre (discrétisation, conditions aux limites, paramétrage, échelonnage temporel, etc.) et de leur développement, le tout étayé de références.

2.2 Cohérence des méthodologies utilisées pour évaluer la sûreté à long terme et la performance d'un éventuel stockage

Le GRI a été invité à évaluer la cohérence des méthodes appliquées pour analyser la sûreté et la performance à long terme d'un stockage éventuel, ainsi que leur pertinence au regard du principal objectif qui consistait à identifier les éléments ayant un rôle particulièrement sensible dans la robustesse d'un stockage.

Le GRI a constaté que le *Dossier 2001 Argile* contenait tous les éléments méthodologiques importants pour procéder à une analyse de sûreté approfondie. Dans l'ensemble, il a noté que l'application des méthodes était suffisamment cohérente, mais que la cohérence entre les méthodes décrites et leur application n'était pas toujours présentée de manière claire. La procédure utilisée pour choisir des paramètres raisonnablement pénalisants, par exemple, n'était pas facile à retracer dans de nombreux cas. Bien que des questions ultérieures détaillées aient fait ressortir la cohérence, celle-ci n'était pas toujours clairement étayée.

En ce qui concerne l'application des méthodes, le GRI a constaté que la cohérence entre les éléments de l'analyse de sûreté était adéquate dans l'ensemble, mais recommande d'améliorer l'analyse des incertitudes et de leurs répercussions. Cela pourrait être réalisé en partie par une analyse d'un ensemble plus étendu de scénarios, mais il convient aussi de montrer comment les incertitudes sur les données et, plus particulièrement, les incertitudes liées à la détermination des périodes de temps dans l'APSS seront gérées et répercutées sur les autres parties de la méthodologie d'évaluation.

Les méthodes qui ont été élaborées permettent d'identifier à l'heure actuelle les principaux composants sensibles du stockage, mais devront être améliorées en vue des prochaines évaluations. Quelques-unes des méthodes récemment développées (APSS et AQS), par exemple, sont à priori utiles, mais doivent être perfectionnées. C'est le cas de l'application de la méthode de l'APSS qui a besoin d'être parachevée, par exemple en ce qui concerne la documentation et la lisibilité. D'autres améliorations méthodologiques sont aussi nécessaires à propos de la flexibilité dans l'établissement des périodes de temps et du lien avec les autres aspects de l'analyse de sûreté. Dans le cas de la méthodologie de l'AQS, le GRI recommande à l'Andra non seulement d'établir des procédures visant à rendre les éléments subjectifs plus explicites et traçables, mais aussi de prendre en compte l'évolution temporelle du système.

Les méthodes employées pour identifier les principaux éléments sensibles du stockage (e.g., analyses de sensibilité déterministes) conviennent au stade actuel du programme de l'Andra. Les analyses n'étaient intentionnellement pas exhaustives et nécessitent des développements complémentaires en vue des prochaines évaluations. Dans le cas des analyses de sensibilité, une application plus stricte et approfondie d'une méthodologie choisie avec soin s'approcherait de ce que d'autres organisations sont en train de développer ou de mettre en œuvre.

2.3 Cohérence interne entre les connaissances scientifiques et techniques et les hypothèses utilisées dans le rapport

Le GRI a été invité à évaluer la cohérence interne entre les connaissances scientifiques et techniques et les hypothèses utilisées dans le *Dossier 2001 Argile*. Le GRI a constaté qu'une démarche prudente avait été adoptée afin d'assurer que les hypothèses soient étayées par des données. Il existe une somme considérable de données scientifiques de base que l'Andra aurait pu utiliser dans le *Dossier 2001 Argile*, mais auxquelles elle pourra avoir recours dans les prochaines analyses, au besoin. Dans certains domaines, comme la capacité de la formation du Callovo-Oxfordien de retenir les radionucléides, le GRI est d'avis qu'une utilisation plus méthodique des connaissances de base existantes induirait une confiance supérieure à celle exposée par l'Andra.

Les descriptions phénoménologiques peuvent être reliées aisément aux connaissances scientifiques et techniques, mais le GRI a constaté à propos de la méthodologie de l'APSS qu'il conviendrait à l'avenir de montrer que toutes ces connaissances ont bien été prises en compte. Les valeurs utilisées pour les paramètres de l'analyse de sûreté sont conformes aux connaissances scientifiques et techniques, bien qu'il s'agisse souvent du choix justifié d'une

valeur prudente. L'utilisation des connaissances scientifiques et techniques pour mettre au point et coupler les modèles conceptuels est souvent impressionnante, notamment dans le cas des écoulements souterrains et du modèle de transport des radionucléides ou de certains modèles de rejet de radionucléides, bien que ces éléments n'aient pu être pleinement appréciés qu'à la suite des présentations des scientifiques et ingénieurs de l'Andra sur le modèle d'écoulement et de transport.

2.4 Pertinence des conclusions

Le GRI a été invité à évaluer la pertinence des conclusions du *Dossier 2001 Argile*, notamment pour ce qui a trait aux principaux objectifs du Dossier. L'Andra a présenté ses conclusions dans la Section VII de la Partie A du Rapport de synthèse [1] sous les rubriques suivantes :

- un processus d'acquisition de connaissances d'ores et déjà riche en acquis ;
- des solutions de conception concrètes pour les études de faisabilité ;
- la mise à l'épreuve de méthodes d'analyse, d'évaluation et d'interprétation ;
- des enseignements pour les recherches à conduire, et
- une étape importante dans le processus d'évaluation de faisabilité à conduire d'ici 2005.

2.4.1 Un processus d'acquisition de connaissances d'ores et déjà riche en acquis

Le *Dossier 2001 Argile* résume les travaux menés dans de nombreux domaines qui étayaient l'analyse de faisabilité du stockage. L'Andra soutient qu'elle dispose d'une base de R-D solide et de haute qualité dans tous les domaines et que cette base est redevable, en partie, aux contributions de ses nombreux partenaires scientifiques. Le GRI a constaté qu'une telle affirmation était avérée dans de très nombreux domaines, mais que cela n'était pas toujours clair dans la présentation du *Dossier 2001 Argile*. La seule omission importante en matière de R-D que le GRI a notée concerne la question des gaz (voir section 3.4).

2.4.2 Des solutions de conception concrètes pour les études de faisabilité

L'Andra a déclaré qu'elle avait mis au point une démarche globale visant à mettre en évidence les éléments-clés de la conception d'un stockage. Cette démarche montre qu'il est possible de réaliser des architectures réalistes intégrant des processus et des paramètres contrôlables. Les facteurs de conception et les approches de conception préliminaires réalistes ont tous deux été identifiés.

Le GRI considère que les facteurs de conception ont été clairement identifiés et que les solutions d'architecture proposées semblent raisonnables. Toutefois, les incidences potentielles des gaz sur la conception du stockage restent à évaluer. La démarche adoptée par l'Andra est fondée sur la conception modulaire et devrait permettre de disposer d'architectures robustes au regard des incertitudes communément considérées. Cette démarche permet de modéliser le terme-source représenté par chaque module avec l'assurance (i) que les conditions seraient maintenues à l'intérieur de limites pour lesquelles il existe des données fiables (ii) qu'il ne serait pas nécessaire de tenir compte des perturbations thermiques et chimiques, qui varient en fonction du temps, des déchets stockés dans d'autres modules. De toute évidence, cela ne représente pas une optimisation de la conception à ce stade, mais offre une bonne base pour réaliser, au besoin, de futures études d'optimisation.

2.4.3 Examen des méthodes d'analyse, d'évaluation et d'interprétation

L'Andra déclare que l'APSS et l'AQS présentées dans le *Dossier 2001 Argile* fournissent une base méthodologique pour une évaluation plus détaillée de la performance du stockage. Le GRI convient que l'APSS et l'AQS procurent les éléments essentiels d'une base méthodologique, mais note que ces deux outils ont cependant besoin d'être perfectionnés.

L'APSS est présentée comme une méthode innovante pour réduire la complexité du système à un ensemble de variables qu'il est plus facile de traiter de manière flexible et reproductible. Le GRI note que l'APSS constitue une démarche structurée pour aborder l'évolution temporelle du système. La flexibilité de la méthode, toutefois, reste à prouver dans une application comprenant un ensemble plus étendu de scénarios. La reproductibilité apparaît certainement réalisable, mais exige des procédures plus élaborées que dans l'exemple qui en est donné dans le *Dossier 2001 Argile*.

L'APSS est aussi présentée comme un outil utile pour intégrer les connaissances, fournissant ainsi une base pour comprendre l'interaction des

phénomènes qui se produisent dans le stockage. Le GRI note que l'APSS intègre les connaissances scientifiques et leur modélisation aux fins de l'analyse de sûreté, tout en offrant une plate-forme de communication utile avec la communauté scientifique.

L'AQS est présentée comme une méthode visant à déterminer les scénarios qui doivent faire l'objet d'une évaluation quantitative à partir des résultats de l'APSS. Un des avantages mentionnés de l'AQS est qu'elle est exhaustive et traçable. Le GRI reconnaît que cela est possible, mais constate que la méthode gagnerait à être améliorée afin de montrer en détail que tel est bien le cas.

2.4.4 Enseignements pour les recherches à conduire

L'Andra indique que les analyses de sensibilité ont permis de repérer les domaines où des informations plus précises pourraient engendrer des valeurs de paramètres plus réalistes et moins prudents, ce qui améliorerait le modèle de performance du stockage de déchets. L'analyse de sûreté a aussi permis de classer les différents éléments du stockage par ordre d'importance et de préciser les exigences futures en matière de R-D. Le GRI note que le programme scientifique futur reflète bien les leçons du *Dossier 2001 Argile* et des autres informations complémentaires dont disposait l'Andra. Le programme scientifique 2002-2005 [14] se fonde sur une évaluation claire et réaliste de l'état actuel des connaissances et sur des propositions bien justifiées concernant les améliorations requises et la manière de les réaliser.

2.4.5 Une étape importante du processus d'évaluation de faisabilité

L'Andra conclut que « l'évaluation de sûreté à long terme ne met en évidence aucun élément réhibitoire » quant à la faisabilité d'un stockage dans une formation géologique profonde. Le GRI considère que les informations présentées dans le *Dossier 2001 Argile* confirment cette conclusion. Toutefois, comme l'Andra l'a reconnu elle-même, le *Dossier 2001 Argile* ne présente pas une analyse complète à ce stade.

L'Andra indique aussi que le *Dossier 2001 Argile* offre une plate-forme pour choisir les architectures de stockage, identifier les incertitudes à traiter et actualiser les programmes de recherche afin de mieux se concentrer sur les objectifs-clés. Le GRI note que l'état actuel et les questions importantes ont été bien identifiés, bien qu'ils n'aient pas toujours été présentés clairement dans le *Dossier 2001 Argile*. L'ensemble des informations dont dispose actuellement l'Andra offre une plate-forme solide pour le programme à venir.

3. REVUE DES ASPECTS PARTICULIERS

Le mandat de la revue précise les aspects techniques spécifiques du *Dossier 2001 Argile* à examiner. Les aspects qui ont fait l'objet d'une revue technique détaillée ont été identifiés à la suite des discussions qui ont eu lieu avec l'Andra les 14 et 15 novembre 2002. Les conclusions de cette revue sont présentées ci-dessous.

3.1 Corrosion

Les déchets vitrifiés issus du retraitement du combustible sont conditionnés dans un conteneur à paroi mince en acier inoxydable 309S. Les concepts actuels pour les déchets vitrifiés font appel à un surconteneur métallique dont la durée de vie escomptée est d'environ 1 000 ans, en vue de permettre à la température des déchets de diminuer au-dessous de 50°C au moment où les eaux souterraines pourraient entrer en contact avec la matrice de déchets vitrifiés. Dans la modélisation, la résistance à la corrosion du conteneur à paroi mince n'est pas prise en compte.

Les concepts actuels pour le combustible usé comprennent un surconteneur métallique dont la durée de vie escomptée est d'environ 10 000 ans afin de permettre à la température des déchets de diminuer au-dessous de 80°C au moment où les eaux souterraines pourraient entrer en contact avec le combustible. Dans la modélisation, le temps de rupture de la gaine de combustible n'est pas pris en compte.

Tant pour les déchets vitrifiés que pour le combustible usé, la résistance à la corrosion du surconteneur métallique est un point-clé de l'évaluation globale de la performance du système de stockage.

Le document du *Dossier 2001 Argile* intitulé *Référentiel matériaux* – Volume 4 [3] résume l'état des connaissances acquises par l'Andra à propos de la corrosion des matériaux métalliques qui entrent dans le stockage géologique

profond des déchets de haute activité. Trois catégories de matériaux sont considérés :

1. les aciers faiblement ou non alliés ;
2. les aciers à base de nickel-chrome ;
3. le cuivre et le titane.

Un important corpus de connaissances existe sur le comportement des aciers faiblement ou non alliés et des aciers à base de nickel-chrome face à la corrosion, et ce corpus est bien reflété dans le document de l'Andra. En particulier, le chapitre qui traite de la corrosion des aciers faiblement ou non alliés présente un exposé exhaustif des mécanismes de corrosion qui concernent le stockage en formations géologiques. Le document comprend aussi un examen de la durabilité des objets industriels enfouis (canalisations) et des analogues archéologiques qui pourraient être utiles afin de valider les prévisions sur la durabilité des aciers non alliés tout au long de périodes bien plus longues que les périodes types considérées dans les études en laboratoire.

Le chapitre sur les aciers austénitiques est également bien développé, bien que ce ne soit pas avec la même envergure que celui qui traite des aciers faiblement et non alliés. En dernier lieu, un examen plus sommaire de la corrosion du titane et du cuivre est présenté par souci d'exhaustivité, dans la mesure où les programmes des États-Unis et de la Suède y ont respectivement recours.

L'importance accordée aux aciers faiblement ou non alliés reflète bien le choix du programme de l'Andra de se reposer sur ces matériaux dans les applications relatives aux déchets vitrifiés et au combustible usé, comme le confirme les choix de conception faits en 2002. Les aciers faiblement et non alliés sont des matériaux dont on admet la corrosion et qui exigent donc d'importantes quantités de métaux étant donné leur vitesse de corrosion facilement mesurable, surtout dans des conditions oxydantes. La principale motivation de l'Andra à retenir ces matériaux est basée sur leur comportement à long terme qui est, en principe, plus facile à prévoir que celui des alliages au nickel-chrome dont la résistance à la corrosion repose sur la stabilité d'une couche à forte teneur en chrome assurant une protection très élevée. Les autres motivations du choix de l'Andra comprennent la facilité de fabrication (comme le soudage), le coût, etc.

Dans l'analyse de sûreté, la principale source d'incertitude découle des connaissances limitées sur les conditions environnementales, notamment les propriétés chimiques de l'eau, tout au long des phases d'exploitation et de

fermeture. Dans le cas des déchets vitrifiés et du combustible usé, en particulier, la capacité de prévoir la durabilité du surconteneur dépend de la connaissance des conditions environnementales à l'interface entre le surconteneur et le milieu corrosif, compte tenu des contraintes mécaniques qui pourraient exister dans le surconteneur. Vu (i) le choix fait par l'Andra d'aciers faiblement alliés et les caractéristiques de conception qui découlent de l'utilisation de ce type de matériaux (notamment pour l'épaisseur du surconteneur) et (ii) les bases techniques décrites dans le chapitre IV (Corrosion des aciers non ou faiblement alliés), des limites supérieures raisonnables de vitesse de corrosion peuvent être estimées de façon fiable en présence des conditions suivantes :

- des paramètres nominaux pour les eaux interstitielles des argilites de l'Est (selon la documentation figurant au chapitre III) ;
- la capacité d'exclure les incertitudes importantes que pourraient provoquer des phénomènes tels que (i) les transferts de vapeur d'eau à l'interface entre le surconteneur et la solution aqueuse (engendrant des effets de concentration de solutés), (ii) des champs de rayonnement excessifs (entraînant une agressivité accrue de la chimie de l'eau à cause de la formation d'espèces comme le peroxyde d'hydrogène [H₂O₂], et (iii) des contraintes supérieures aux normes d'élasticité (notamment par la déformation du surconteneur due à la pression de gonflement locale).

En général, ces contraintes sont bien expliquées dans le *Dossier 2001 Argile*.

Un problème majeur dans toute évaluation du comportement des aciers faiblement ou non alliés a été signalé dans le *Dossier 2001 Argile* comme étant le risque de fissuration dû à la fragilisation par l'hydrogène. Le piégeage de l'hydrogène libéré par la corrosion à l'interface entre le métal et l'eau pourrait provoquer la défaillance mécanique du surconteneur. *Une analyse plus détaillée de la pression partielle de l'hydrogène prévue dans l'environnement du stockage de déchets par rapport au risque de fragilisation par l'hydrogène devrait être réalisée en ce qui concerne les spécifications proposées pour les matériaux du surconteneur en acier au carbone.*

Les limites potentielles de la compréhension de l'évolution du surconteneur et du système argileux ont aussi été précisées, notamment dans le cas spécifique des interactions entre le fer et l'argile, comme il est indiqué dans le document intitulé « Programme Scientifique, HAVL-Argile, 2002-2005 », [14]. Tel que le précise le document, il est recommandé de poursuivre les

programmes en cours dans le but de « conforter les hypothèses retenues et leurs justifications ».

En résumé, le document du *Dossier 2001 Argile* intitulé *Référentiel matériaux* – Volume 4 [3] présente une base technique solide pour prendre des décisions éclairées en ce qui concerne les architectures retenues pour le Dossier 2005.

3.2 Conception du système de barrières ouvragées

Le *Dossier 2001 Argile* constitue une étape préliminaire du développement des principes de conception du stockage et du système de barrières ouvragées (SBO). Un ensemble de critères précis est présenté dans la partie B du Rapport de synthèse pour évaluer ces principes. Néanmoins, quelques-uns des critères les plus critiques sous-tendant l'évaluation de ces principes n'apparaissent pas clairement dans le rapport. En particulier, l'importance pour les choix effectués des limites fondamentales dans la compréhension des phénomènes n'est abordée que de façon trop succincte. Par exemple, l'option d'utiliser un matériau de remblayage en béton plutôt qu'en bentonite comme SBO autour des conteneurs de combustible usé est traitée, mais des informations limitées sont fournies pour appuyer cette option dans le *Dossier 2001 Argile*. En outre, la répartition des informations disponibles dans la documentation sur la performance du combustible usé (e.g., les études de lixiviation et les données thermodynamiques) induit des doutes considérables sur cette option (par comparaison avec le niveau de détail des informations sur un champ proche contrôlé par de la bentonite). C'est un exemple de domaine où les besoins en recherche fondamentale pour appuyer une décision de conception ne sont pas clairement expliqués dans la documentation. *Il est recommandé d'aborder de façon plus approfondie la sélection des données sous-tendant les options de conception, notamment dans le cas de l'identification des facteurs limitants les plus critiques.*

3.3 Terme-source des colis de déchets

Dans le *Dossier 2001 Argile*, l'Andra a abordé les études de conception et d'évaluation de performances pour une grande variété de types de déchets. Pour chacun d'entre eux, y compris pour les divers groupes de Type B (MA – moyenne activité), les déchets de Type C (vitrifiés) et les divers types de combustible usé, des colis-types de déchets de référence ont clairement été décrits.

La compréhension des données scientifiques relatives aux déchets de type B et les modèles de terme-source associés sont présentés de façon claire et détaillée. Le modèle de dégradation du bitume est plutôt sophistiqué et la présentation illustre une amélioration importante de la compréhension par rapport aux modèles précédents. Il est courant d'utiliser des modèles très prudents considérant un relâchement instantané à partir d'un mélange homogène pour ce type, et d'autres types, de déchets MA, ce qui pourrait donner l'impression que les conditionnements des déchets MA sont tout à fait inefficaces comme barrières. Le perfectionnement de ce modèle est donc fortement encouragé. De même, la compréhension et la mise au point de modèles pour les déchets de coques et embouts sont remarquablement bien décrits. De nouveau, cela représente une amélioration considérable par l'intégration du traitement de ces déchets dans les évaluations de performance et précise la nature des améliorations potentielles à apporter dans les domaines de la compréhension et de la modélisation. Les taux proposés semblent très raisonnables et cohérents avec les connaissances scientifiques qui sont résumées dans les études du CEA et les autres études internationales. L'identification méthodique des incertitudes, la définition claire d'objectifs réalisables pour ces types de déchets et l'adoption d'une démarche visant des modèles plus réalistes sont fortement encouragées.

Le résumé des questions scientifiques concernant la performance des déchets vitrifiés est bien équilibré, quoique plutôt court par rapport à l'exposé très complet des matériaux entrant dans la composition des conteneurs, par exemple, étant donné l'importance de la durabilité des déchets. Une présentation plus détaillée sur le fondement des modèles alternatifs est recommandée pour étayer les futurs calculs d'analyses de sûreté. Des conclusions raisonnables semblent avoir été atteintes au sujet des taux de dissolution possibles et sur l'éventualité d'une meilleure compréhension d'ici 2005.

La section traitant des termes sources du combustible utilisé ne reflète pas de manière adéquate le niveau de connaissances atteint dans les études du CEA et la documentation internationale (Poinssot *et al.*, 2001, Shoesmith, 2000). Certaines affirmations ne sont pas suffisamment étayées et laissent une impression défavorable à propos du niveau de connaissances, notamment en ce qui concerne les points suivants :

1. L'exposé sur la gaine en zircaloy donnerait certainement une impression très médiocre du zircaloy à des non-spécialistes («hydrurées et fragilisées. Elles présentent des fissures...»). En dépit de l'hydruration et de la fragilisation, moins d'une barre sur 1 000 présente des défauts à la sortie du réacteur et les études de

l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) confirment la très grande durabilité des gaines de combustible en zircaloy dans des conditions d'entreposage sous eau ou à sec, c'est-à-dire l'absence de développement ultérieur de défauts. Bien que la fiabilité de la gaine comme barrière pour empêcher le combustible usé de libérer des radionucléides ne soit pas nécessairement un objectif réaliste, les preuves scientifiques et la compréhension de sa durabilité tout au long des périodes d'entreposage temporaire sont considérables et méritent d'être signalées.

2. Le manque de précision concernant les aspects du terme-source du combustible usé qui sont raisonnablement bien étudiés et compris par rapport à ceux dont la compréhension est beaucoup plus limitée laisse malheureusement entendre que toutes les bases scientifiques pour la mise au point des modèles de terme-source sont plutôt médiocres. Par exemple, l'idée que l'ensemble ou une partie du combustible pourrait s'oxyder avant l'arrivée d'eau (parce qu'il existe des traces d' U_4O_9 dans le combustible à haut taux de combustion, bien que cette observation ne soit pas importante dans le cas de la dissolution) est soulignée dans l'exposé scientifique au même niveau d'incertitude que la radiolyse ou la ségrégation des produits de fission, deux phénomènes qui ont été étudiés avec beaucoup d'attention depuis bientôt vingt ans et pour lesquels des douzaines de références existent.

Il est recommandé que ces questions de présentation soient résolues en veillant non seulement à ce que la compréhension scientifique de la dissolution du combustible usé soit traitée de façon plus équilibrée et plus détaillée, mais aussi qu'elle fasse l'objet d'une présentation claire de l'importance relative des incertitudes spécifiques, y compris le recours autant que possible aux données contenues dans les études internationales, notamment dans les cas où les données françaises sont limitées.

En dépit des difficultés mentionnées plus haut, les taux de terme-source proposés semblent justifiés à ce stade, bien qu'il eût été utile de proposer un taux alternatif, très différent de la valeur de 10^{-4} par année pour examiner l'effet des différents taux de dissolution de la matrice, étant donné que certaines études proposent des taux très inférieurs. La contribution de 20 % des produits de fission labiles, qui représente l'apport le plus important à la dose, apparaît comme un choix convenable et prudent à ce stade des études. Il serait possible de réduire cette valeur prudente, dans la mesure où elle se fonde sur les effets de bord à des hauts taux de combustion, phénomène peu important au-dessous de

45-50 GWj/t. Par conséquent, des indications sur la distribution des taux de combustion des combustibles usés pourraient engendrer un modèle plus réaliste.

3.4 Absence de traitement des gaz dans l'analyse de sûreté

Le GRI note que les informations étaient insuffisantes au moment d'achever le *Dossier 2001 Argile* pour intégrer les questions relatives aux gaz dans l'analyse sur la sûreté du stockage de déchets. Néanmoins, une importante conclusion du *Dossier 2001 Argile* relative à la faisabilité du stockage géologique ne précise pas moins que « à ce stade aucun élément rédhitoire n'a été mis en lumière ». Comme il est implicite qu'il n'existe aucune raison de croire que l'intégration complète des questions liées aux gaz modifierait cette position, il conviendrait d'examiner la liste des arguments qualitatifs qui appuient cette thèse. Il est fait état d'éléments, telle que par exemple, l'observation tirée des études de GAMBIT (Swift *et al.*, 2001) qui indique que la fuite de gaz ne compromet pas la fonction de la barrière en bentonite. De tels arguments, même non quantifiés, viendraient étayer l'importante affirmation qui a été faite. Une telle approche est cohérente avec l'idée que toute étude de sûreté devrait comprendre une gamme d'arguments quantitatifs et qualitatifs.

*Afin de bien fonder les architectures retenues et les besoins futurs en matière de caractérisation des déchets, d'une part, et compte tenu de la capacité très limitée du gaz à se disperser hors des formations peu perméables analogues examinées à l'étranger, d'autre part, il est recommandé d'évaluer le plus rapidement possible les conditions aux limites du transport des gaz dans le champ lointain. Pour les études de conception et en tant que données d'entrée préliminaires en vue d'identifier les scénarios pertinents, des calculs d'ordre de grandeur (production et accumulation de gaz par rapport à la capacité de diffusion dans la formation hôte) et une plus ample considération de l'expérience disponible à l'échelle internationale (NEA, 2001 ; Rodwell *et al.*, 1999) semblent nécessaires.*

3.5 Caractérisation et modélisation du Callovo-Oxfordien et de ses environs

3.5.1 Caractérisation géologique générale

La documentation présentée dans les tomes I à IV du Référentiel géologique est, du point de vue des sciences géologiques, étendue et imposante. La qualité des fondements scientifiques du programme français concernant la

caractérisation de la formation hôte et de ses encaissants est considérée comme élevée.

À titre d'exercice préparatoire à toute analyse de sûreté future, il aurait été intéressant de regrouper en un seul endroit tous les arguments-clés qui appuient la performance actuelle et à long terme de la formation hôte. Ces arguments restent dispersés à travers les rapports et sont donc rarement mis en évidence à ce titre.

La RFS III.2.f [18] prévoit les critères de base à respecter dans le cas de tout site potentiel de stockage de déchets. L'objectif du *Dossier 2001 Argile* n'était pas d'établir la conformité du site de Bure avec ces critères de sélection de site, dans la mesure où le sujet avait déjà été traité dans la demande d'autorisation du laboratoire de recherche souterrain de Bure. Tout au long de l'instruction de la demande, il a été vérifié de façon méthodique que le site de Bure ne comportait aucune caractéristique rédhibitoire au regard de la RFS.

Le rôle de confinement qu'attribue la démarche de sûreté globale du *Dossier 2001 Argile* à la formation hôte sous-entend la présence des caractéristiques générales suivantes (Approche de sûreté [11]) :

- une faible perméabilité ;
- une profondeur minimale afin de limiter les risques d'intrusion, et
- un emplacement éloigné des aquifères.

Ces caractéristiques semblent satisfaites par les argilites du Callovo-Oxfordien.

Dans l'ensemble, l'exposé du Référentiel géologique confirme les caractéristiques générales favorables des argilites du Callovo-Oxfordien comme une formation hôte potentielle adéquate pour le stockage.

Les orientations initiales et générales du programme d'acquisition de connaissances géologiques, indiquées dans le Référentiel géologique, auraient dû être expliquées plus en détail dans les documents de synthèse du *Dossier 2001 Argile*. En particulier, une meilleure justification du programme de R-D actuel non seulement à partir des incertitudes découlant des analyses de sûreté préliminaires conduites dans le cadre de la demande d'autorisation réglementaire du laboratoire de recherche souterrain, mais aussi des fonctions et des rôles de sûreté de la formation hôte dans la démarche de sûreté globale, aurait été souhaitable pour mieux comprendre le thème principal et les objectifs du

travail documenté. Cela aurait évité l'impression que le Référentiel géologique est parfois dissocié du *Dossier 2001 Argile*.

Il convient de noter que les présentations faites au cours de la semaine de revue ont permis au GRI de se faire une idée satisfaisante des questions en suspens à la fin de la procédure d'autorisation réglementaire du laboratoire de recherche souterrain de Bure et, par conséquent, des orientations générales mentionnées ci-dessus.

Les présentations ont aussi été l'occasion de préciser la démarche progressive qui a été retenue pour la caractérisation et la quantification des paramètres de migration de la formation hôte, la priorité étant donnée à une analyse minéralogique détaillée et à la description de propriétés chimiques de référence des eaux interstitielles afin d'étayer les futurs exercices de modélisation.

Le GRI constate que les priorités et les objectifs futurs ont été justifiés méthodiquement dans l'élaboration du programme scientifique de 2002-2005 [14]. Cette démarche tient aussi compte du délai limité qui reste avant la présentation du Dossier 2005, et la manière dont elle est exposée mérite d'être signalée. C'est le cas, notamment, des travaux à réaliser pour caractériser l'aquifère de l'Oxfordien autour du site de Bure. Bien que la rétention (e.g., sorption) de radionucléides dans la formation puisse constituer une barrière appropriée afin d'éviter leur relâchement (voir section 3.5.5), une meilleure caractérisation de la zone à faible perméabilité dans l'Oxfordien, qui réduit les transferts hydrauliques vers les aquifères sus-jacents, est considérée comme une priorité du Dossier 2005, parce qu'elle peut être réalisée dans le temps imparti mieux que le développement d'une analyse quantitative complète de la rétention.

La caractérisation géologique globale de la formation hôte, qui se fonde à la fois sur une description détaillée de la situation actuelle et sur une compréhension approfondie de son évolution diagénétique et de celle de ses encaissants, est très détaillée et à l'avant-garde de ce type d'études. elle permet en particulier d'inférer la continuité latérale des paramètres favorables, ainsi que la stabilité globale et la capacité de rétention de la formation hôte et de ses encaissants. Dans ce domaine, le programme scientifique de l'Andra est certainement plus avancé que beaucoup d'autres programmes nationaux.

La démarche adoptée pour identifier une « zone équivalente de transposition » (chapitre IV du Volume 5 du *Référentiel géologique* [4]), où les résultats à acquérir au niveau du laboratoire de recherche souterrain de Bure pourraient être transposés, mérite d'être signalée dans la mesure où elle permet

d'évaluer la représentativité de cette zone et, par conséquent, de passer de l'échelle du laboratoire de recherche souterrain à celle d'un éventuel stockage.

Le GRI recommande que l'étendue de la « zone équivalente de transposition » soit réévaluée fréquemment au regard des nouvelles connaissances acquises dans le but de maintenir sa représentativité. L'Andra pourrait examiner, en particulier, si certains critères liés à la zone locale de faible perméabilité pourraient être intégrés dans la définition de cette zone.

3.5.2 Transferts dans les argilites du Callovo-Oxfordien

Le modèle conceptuel pour les transferts de solutés dans les argilites du Callovo-Oxfordien se fonde sur la prééminence de la diffusion sur de longues périodes de temps. Le *Dossier 2001 Argile* énonce de multiples arguments en faveur de cette hypothèse (e.g., faibles perméabilités, surpression, profil de traceur naturel, absence de rôle hydraulique des failles). Ces arguments couvrent diverses échelles temporelles et spatiales.

Le GRI est d'avis que les travaux devraient être poursuivis afin d'améliorer la confiance dans ces arguments-clés pour confirmer la performance de la formation hôte. En particulier, des précisions sont requises concernant :

- l'interprétation du profil des chlorures naturels (et éventuellement du profil d'autres traceurs naturels) ;
- le rôle hydraulique potentiel des failles traversant la formation hôte (à l'échelle régionale) afin d'étayer l'application à plus grande échelle des faibles valeurs de perméabilité mesurées à partir d'échantillons ou dans des forages (il convient de noter que l'étalonnage actuel du modèle hydrogéologique n'impose aucun rôle hydraulique aux failles) ;
- l'origine de la surpression et son maintien tout au long des temps géologiques (compréhension des phénomènes principaux). Dans ce cadre, il est important de : (i) comparer (et, au besoin, d'expliquer les différences) avec les démarches adoptées dans d'autres pays, et de (ii) veiller à la cohérence des arguments concernant les rôles des processus de type Onsagérien dans les transferts de solutés.

La précipitation dans les argilites du Callovo-Oxfordien et la sorption sur ces mêmes argilites ont été prises en compte dans les calculs de l'analyse de

sûreté comme des phénomènes qui pourraient retarder les transferts de radionucléides à l'intérieur de la formation hôte. Le *Dossier 2001 Argile*, en général, et le Référentiel géologique en particulier, auraient pu mieux tirer profit de la confiance générale qui est accordée à l'échelle internationale à l'efficacité de ces phénomènes dans les argiles, d'autant plus que, au cours des discussions tenues avec les experts de l'Andra, il est clairement apparu qu'ils partageaient cette confiance au sujet des argilites du Callovo-Oxfordien.

L'efficacité de ces phénomènes et leur évaluation quantitative aux fins de l'analyse de sûreté devraient être étayées davantage, notamment par :

- *la définition de propriétés chimiques de référence des eaux interstitielles du Callovo-Oxfordien ;*
- *l'évaluation de la représentativité des analogies utilisées pour déterminer les valeurs de K_d pour les argiles du Callovo-Oxfordien ;*
- *l'évaluation de la représentativité des expériences de sorption sur échantillon par rapport aux conditions de stockage ;*
- *l'évaluation des conséquences d'une compétition en matière de sorption entre les radionucléides et les autres solutés qui se déplacent dans la géosphère (grâce à des calculs d'ordre de grandeur) ; et*
- *une meilleure compréhension des phénomènes de sorption.*

Il convient de signaler que l'Andra a clairement reconnu (dans le *Dossier 2001 Argile* ou pendant ses discussions avec le GRI) le besoin d'accroître ses travaux sur les propriétés chimiques des eaux interstitielles et les questions de rétention. Conformément à sa démarche progressive en vue de la caractérisation des propriétés de rétention, l'Andra a déjà établi un vaste programme de R-D pour explorer davantage cette question.

Le GRI encourage de tels travaux. En outre, vu le temps nécessaire pour caractériser expérimentalement ces propriétés de rétention, il est recommandé de se pencher davantage sur les possibilités de transposer les données acquises dans d'autres pays au cas spécifique des argilites du Callovo-Oxfordien.

Étant donné l'importance de la barrière géologique, les arguments qui sous-tendent la caractérisation et la compréhension des propriétés et des phénomènes de rétention de radionucléides dans le *Dossier 2001 Argile* sont présentés de façon trop sommaire par rapport à d'autres questions liées aux sciences de la terre.

3.5.3 *Perturbations induites*

Les discussions concernant les différentes zones affectées par l'excavation des installations souterraines et les propriétés des argilites dans différentes conditions de saturation sont plus avancées que dans nombre d'autres programmes. Toutefois, la documentation donne l'impression que les dommages et les perturbations imputables aux travaux souterrains auront des conséquences négatives à long terme sur le transport de l'eau et des solutés. Une telle estimation est peut-être trop prudente. L'analyse des capacités et des conditions d'auto-cicatrisation des argilites devrait être poussée plus avant.

Vu l'emploi potentiel du béton dans la conception (e.g., surconteneur des déchets de type B, revêtement, l'incidence du front alcalin sur les propriétés géochimiques et de rétention des argilites du Callovo-Oxfordien est considérée comme une question importante dans le *Dossier 2001 Argile*. Les informations présentées au cours des échanges avec l'Andra laissent entendre que le béton ne crée qu'une perturbation limitée. Dans ce domaine, tout travail ultérieur devrait être guidé par une évaluation globale de l'étendue de cette perturbation par rapport aux autres perturbations causées par le stockage de déchets.

En général, un mécanisme de retour d'expérience plus formel devrait être instauré entre la caractérisation de la formation hôte et la conception des architectures. À ce jour, le retour d'expérience semble avoir porté en majeure partie sur les aspects mécaniques (extension de la zone perturbée par les travaux d'excavation).

3.5.4 *Contexte hydrogéologique*

En général, le contexte hydrogéologique est plutôt favorable, notamment du fait du caractère peu exploitable des aquifères environnants à cause de leur faible perméabilité, de la présence d'autres ressources en eau, de la forte concentration de chlorure dans le Dogger, etc. Toutefois, le GRI considère que l'exposé présenté dans les documents de synthèse du *Dossier 2001 Argile* [1 et 2] et dans le Volume 5 du Référentiel géologique [4] concernant le cadre et la modélisation hydrogéologiques est insuffisant et incomplet. Des discussions avec l'Andra ont permis d'établir qu'un nombre beaucoup plus important de travaux (de haute qualité) avait été réalisé que ne le présente ou l'utilise le *Dossier 2001 Argile*.

Le GRI aurait aussi souhaité que les simplifications utilisées pour « passer » d'un modèle hydrogéologique phénoménologique à un « modèle de sûreté » soient mieux étayées. Le « modèle de sûreté » n'est pas présenté

explicitement dans le *Dossier 2001 Argile*. En particulier, les hypothèses prudentes qui ont été avancées devraient être clairement exposées, par exemple :

- les puits de pompage simulés utilisés pour estimer les doses des futures populations sont situés en amont des exutoires naturels modélisés et au centre du panache de radionucléides estimé, et
- la zone peu perméable de l'aquifère de l'Oxfordien a l'extension minimale requise pour caler le modèle hydrogéologique par rapport aux données de pression hydraulique ; son étendue réelle pourrait être beaucoup plus vaste.

Le programme scientifique pour 2002-2005 concernant la caractérisation et la modélisation hydrogéologiques est bien expliqué dans le *Dossier 2001 Argile* (incertitudes à traiter, emplacement des nouveaux forages, choix des traceurs naturels à utiliser, etc.) et devrait aider à tester les résultats actuels du modèle. Dans ce cadre, la transition vers un modèle hydrogéologique unifié et cohérent est considérée comme un pas en avant nécessaire (utilisation d'un modèle à l'échelle régionale comprenant des maillages successifs de plus en plus fins à l'échelle locale et à l'échelle du site).

3.5.5 Marges de sûreté

Plusieurs phénomènes potentiellement capables d'améliorer les performances de la formation hôte et ses encaissants comme barrières n'ont pas été pris en compte dans les calculs d'analyse de sûreté qui demeurent prudents. Ces phénomènes comprennent notamment :

- la rétention des radionucléides dans les formations qui entourent les argilites du Callovo-Oxfordien (surtout dans les marnes sus-jacentes), et
- l'auto-cicatrisation de la zone perturbée, y compris le rétablissement partiel des propriétés de barrière des argilites.

Ces phénomènes et leurs effets sur la migration des radionucléides pourraient être considérés comme une sorte de « marge de sûreté ».

La quantification de ces phénomènes n'est pas considérée comme une priorité pour le Dossier 2005. Toutefois, il est recommandé d'évaluer davantage leur rôle potentiel dans la réalisation des fonctions attribuées à la géosphère, notamment par des arguments qualitatifs ou des calculs d'ordre de grandeur.

Ces marges de sûreté pourraient servir à renforcer la confiance dans les performances à long terme du stockage.

3.6 Réversibilité

Pour pouvoir alimenter convenablement le débat national qui aura lieu en France, en 2006, à propos des options de référence qui seront retenues pour la gestion à long terme des déchets radioactifs, l'Andra doit réaliser des études sur les options possibles de stockage géologique « réversible » et « irréversible ». Dans une déclaration de décembre 1998, le gouvernement français (Premier ministre, 1998) a souligné l'importance qu'il fallait accorder à une « logique de réversibilité ». Cette déclaration s'est appuyée sur un rapport présenté par la CNE, en juin 1998.

Ni la Loi de 1991, ni le *Dossier 2001 Argile* ne précise en quoi consiste un stockage « irréversible ». Une telle précision serait utile pour mieux distinguer ce qui constitue un stockage « réversible ». La CNE, pour sa part, appelle « irréversible » tout stockage d'où il est possible de reprendre les déchets seulement par des techniques minières, ce qui signifie que le stockage est fermé et scellé (CNE, 1998). La CNE associe donc la réversibilité à un stockage ouvert ou partiellement ouvert. Dans cette ligne de pensée, la CNE décrit donc un stockage réversible comme étant « l'entreposage géologique convertible en stockage géologique dit réversible ».

Le concept de « stockage réversible » présenté par l'Andra semble conforme à celui de la CNE dans la mesure où :

« Un stockage réversible est un stockage qui donne, par sa conception et la qualité de la compréhension que l'on en a, des possibilités de choix à tout moment, aussi bien qu'un entreposage, en matière de gestion des déchets. » [9]

L'Andra précise en outre que :

« Un stockage réversible doit être robuste dans la durée, vis-à-vis des objectifs fondamentaux de protection des personnes et de l'environnement (il doit pouvoir être fermé lorsque le choix en sera fait). » [9]

Des niveaux de réversibilité peuvent donc être associés aux différents niveaux de fermeture du stockage de déchets.

En dernière analyse, le *Dossier 2001 Argile* traite de la « récupérabilité » des colis de déchets dans un stockage qui est progressivement fermé et scellé. Les solutions possibles à envisager à chaque stade de la fermeture graduelle sont de maintenir la configuration courante, de revenir à un stade antérieur ou de passer au suivant. Plus on se rapproche de la fermeture définitive, plus les opérations de reprise deviennent complexes et moins le niveau de réversibilité et de reprise est élevé. Une fois que le stockage est fermé, la « réversibilité » (ou plutôt la « récupérabilité des colis ») « ne se pose plus en termes d'étapes à franchir dans l'exploitation du stockage ». Bien que la distinction soit bien établie entre « récupérabilité » et « réversibilité » dans le *Dossier 2001 Argile*, les deux termes ne sont pas toujours utilisés de façon cohérente, peut-être à cause d'une erreur de traduction dans la version anglaise. Nous recommandons que l'Andra soit plus stricte dorénavant dans l'utilisation de ces termes. Dans le contexte du *Dossier 2001 Argile*, la réversibilité a pour but d'assurer que les conditions requises pour reprendre les déchets existent tout au long de la phase d'exploitation.

Pour chaque stade de fermeture, le *Dossier 2001 Argile* présente les phénomènes physiques qui doivent être pris en compte afin que la reprise soit réalisable tout en préservant la robustesse du système du point de vue de sa performance à long terme. Le lien entre chacun des différents stades de fermeture et la possibilité de revenir en arrière jusqu'à la reprise du colis de déchets est examiné de façon méthodique. La démarche est convaincante et efficace dans la mesure où elle présente un cadre cohérent et systématique qui n'exige pas de délais de fermeture pré-établis pour examiner les questions techniques liées à la reprise et pour définir les solutions de gestion. L'analyse bénéficie de la description des phénomènes figurant dans l'APSS. En effet, l'analyse s'avère un très bon exemple d'application de l'APSS et témoigne, dans de nombreux cas, de l'utilité de cette dernière.

Le *Dossier 2001 Argile* explique bien comment il serait possible de gérer la fermeture progressive d'un stockage tout en garantissant la flexibilité. Il présente également une solide base méthodologique à la position, souvent exprimée dans les programmes internationaux, que la reprise des colis peut être assurée pendant la phase de pré-fermeture du stockage. Le *Dossier 2001 Argile*, toutefois, ne brosse pas un tableau complet de la manière d'assurer la reprise des colis avec une analyse fondée sur des considérations économiques, éthiques et de sûreté. En particulier, la sûreté du stockage « réversible » n'a pas été étudiée, pas plus que les considérations sociales et économiques, comme la perte du savoir-faire ou la disponibilité des fonds, n'ont été intégrées dans l'analyse comme des contraintes dans la gestion d'un stockage de déchets et de ses incidences sur la sûreté.

Les estimations concernant la durée possible de chaque stade particulier du stockage sont des ordres de grandeur et sont issues soit des connaissances actuelles sur la cinétique des principaux processus, soit des pratiques industrielles, notamment en ce qui concerne la durée de vie escomptée des structures en béton. Le document mentionne seulement d'un point de vue qualitatif les processus spécifiques qui ont des effets sur l'évolution et la performance du stockage à long terme, tels que la désaturation provoquée par l'aération et l'oxydation de l'argilite dans le champ proche. L'Andra compte apporter certaines améliorations dans certains de ces domaines, notamment en développant une proposition de programme de surveillance. Ces nouvelles analyses et considérations sont, bien entendu, importantes pour assurer l'acceptabilité du concept et doivent donc être poursuivies.

L'Andra a choisi de ne pas fixer d'avance une durée pour les différents stades spécifiques d'exploitation du stockage ou pour toute la période de réversibilité et de récupérabilité des colis. Toute période de temps retenue ne peut être que le résultat de négociations sociétales fondées sur un climat de confiance à instaurer et sur la compatibilité avec une exploitation et une maintenance permanentes du stockage dans des conditions de sûreté, tout en poursuivant l'objectif à long terme de protéger les êtres humains et l'environnement. C'est là le sens de la déclaration de l'Andra, selon laquelle « la décision de passer à une phase de moindre réversibilité doit être prise sur la base d'une conviction suffisante » [2, p. 175], comme le GRI l'a noté au cours des discussions avec l'Andra. Au début, le GRI trouvait que la déclaration était ambiguë, dans la mesure où l'on pouvait comprendre que les déchets pouvaient être déposés sous terre avant même que l'on soit fermement convaincu de la sûreté de l'installation et, par conséquent, que la possibilité de reprise pourrait être considérée comme une mesure importante pour la sûreté, ce qui, bien entendu, irait à l'encontre des principes du stockage géologique. Afin d'éviter ce malentendu, il est recommandé à l'Andra d'indiquer clairement que la récupérabilité des colis n'est pas une caractéristique requise pour des motifs de sûreté et que la réversibilité est un outil ou un concept de gestion visant à assurer un certain niveau de flexibilité tout au long de la phase d'exploitation du stockage. À cet aspect est liée l'importante question des provisions financières pour des coûts destinés à faire face aux problèmes autres que la sûreté du stockage, tel que par exemple ceux rencontrés pour mettre en œuvre certains procédés alternatifs de gestion des déchets repris.

De manière plus générale, il conviendrait que l'Andra fasse figurer dans les prochaines mises à jour du *Dossier 2001 Argile* non seulement les principes sous-jacents à respecter dans le domaine de la réversibilité et de la récupérabilité, mais aussi un plus grand éventail de concepts réversibles et

irréversibles possibles. D'autres concepts ou démarches fondés sur la réversibilité sont possibles :

- En Suède, une phase de démonstration faisant appel à environ 5 à 10 % des déchets doit avoir lieu. Une fois que la phase sera évaluée, soit les déchets (combustible nucléaire) seront enlevés, soit un stockage complet sera réalisé, puis fermé. Dans le dernier cas, la possibilité de reprise à long terme est favorisée par la conception robuste des conteneurs de combustible usé et par le suivi des données correspondantes (Olsson, 2001). D'autres concepts de stockage moins réversibles sont aussi à l'étude en Suède (SKB, 2001).
- En Suisse, on envisage de combiner une installation d'essai et une installation définitive, comme en Suède. En outre, une petite installation pilote pourrait être utilisée dans le cadre d'un système de surveillance pour vérifier la performance du stockage souterrain aussi longtemps qu'il le faut (Nagra, 2002 ; Wildi, 2000).

Par rapport aux autres démarches retenues à travers le monde, y compris aux États-Unis, la déclaration de 1998 du gouvernement français (Premier ministre, 1998) semble mettre le principe de contrôle et de liberté des générations futures sur un pied d'égalité avec la sûreté, tandis qu'il figure au second rang dans les programmes des autres pays (e.g., Wildi, 2000). Le *Dossier 2001 Argile* ne classe pas les principes selon un ordre hiérarchique clair. Bien que les échanges avec la direction de l'Andra a montré que l'objectif de réversibilité était conforme aux normes d'exploitation et de sûreté à long terme, il semble important que les aspects mentionnés ci-dessus soient précisés à l'avenir.

La démarche de réversibilité présentée dans le *Dossier 2001 Argile* est valable dans la mesure où elle offre une base utile pour garantir la flexibilité technique tout au long de la phase d'exploitation du stockage. Cette flexibilité technique pourrait être facilement adaptée à un processus de décision pas à pas qui n'a pas encore été élaboré. Jusqu'à maintenant, la démarche semble avoir été mise au point avec des interventions relativement faibles des autorités françaises. En fait, il s'agit d'une première étape qui devrait procurer une base aux parties prenantes, y compris les autorités françaises, pour mettre au point des lignes directrices ou provoquer des débats sur la question. *Toutefois, étant donné le rôle primordial que l'Andra devrait jouer dans le débat national en France, il semblerait adéquat que l'Andra entreprenne des travaux pour préciser les principes de base et la hiérarchie des valeurs liées à la réversibilité*

et à la récupérabilité des colis, par exemple, à partir des questions posées plus haut dans la présente section. Cette clarification pourrait aussi conduire à identifier un ensemble de choix possible. Dès qu'un document spécifique sera produit, il serait utile d'organiser un débat en vue d'affiner les options de concept. Grâce à un débat en amont avec les principales parties prenantes sur la signification de la réversibilité et de la récupérabilité il serait possible de mieux organiser ensuite le débat sur les options qui est prévu en France, en 2006.

3.7 Approche et méthodologie mises au point pour l'évaluation de sûreté

3.7.1 Généralités

La méthodologie appliquée au *Dossier 2001 Argile* contient les composants essentiels auxquels on peut s'attendre, sous une forme ou une autre, dans une analyse de sûreté à long terme. Elle comprend :

1. une description détaillée du système à analyser ;
2. une analyse de l'évolution temporelle du système, décomposée selon ses composants spatiaux pertinents ;
3. une analyse des fonctions de sûreté du système ;
4. une évaluation de la manière dont les fonctions de sûreté pourraient être compromises ;
5. une analyse structurée des résultats des scénarios pour la quantification des conséquences radiologiques, fondée sur la compréhension des fonctions de sûreté et l'évolution temporelle du système ;
6. la définition des résultats de modèles pour les calculs d'impact ;
7. des exemples de calculs de conséquences pour deux scénarios importants, et
8. des analyses de sensibilité déterministes.

Les éléments mentionnés ci-dessus s'appuient sur les résultats des recherches en cours et sur les travaux de développement. Des efforts considérables ont été consacrés autant à la mise au point qu'à l'application des méthodes utilisées dans les diverses parties de l'analyse du *Dossier 2001 Argile*.

3.7.2 Analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS)

Dans le *Dossier 2001 Argile*, l'Andra a présenté la méthode dite de l'« analyse phénoménologique des situations de stockage » (APSS) pour aborder l'évolution temporelle du système à l'étude.

Selon la méthode de l'APSS, le système est décomposé dans l'espace en un certain nombre de composants déterminés par la structure du stockage et la formation hôte. L'évolution temporelle de chaque composant est divisée en un certain nombre de « situations » ou plutôt de périodes au cours desquelles un ensemble déterminé de phénomènes (processus) régit l'évolution du système. Dans le cas des déchets de haute activité, il y a, par exemple, une phase thermique au cours de laquelle la puissance calorifique des déchets et des phénomènes connexes ont une grande influence sur l'évolution de la situation. Une synthèse des données, sous forme de « fiche de situation », est créée pour chaque situation, décrivant la durée de la situation, les composants concernés du stockage, ainsi que les postulats généraux. Vient ensuite une description des phénomènes thermiques, hydrauliques, mécaniques, chimiques et radiologiques (THMCR) de la situation, à la fois de manière littéraire et sous la forme d'un certain nombre de « modèles conceptuels » illustrant visuellement les principales caractéristiques de l'évolution tout au long d'une « situation ». En dernier lieu, des recommandations sont présentées portant sur la modélisation plus poussée des phénomènes pertinents.

L'APSS commence avec l'état avant la construction du stockage. La période de construction, la phase d'exploitation et la phase postérieure à la fermeture sont ensuite intégrées dans les analyses, chaque phase représentant un certain nombre de « situations » différentes.

Toute méthode utilisée pour évaluer la sûreté à long terme d'un stockage de déchets radioactifs en profondeur doit pouvoir permettre de traiter l'évolution temporelle du système à l'étude. La méthode de l'APSS est conforme, à plusieurs égards, aux méthodes déjà utilisées ou en cours d'élaboration par d'autres organisations.

La méthodologie de l'APSS représente un bon outil pour caractériser les « situations » dans l'espace et dans le temps. Les « situations » sont fondées sur les caractéristiques et les processus qui doivent être pris en compte, tandis que la segmentation temporelle du « tableau général des situations de stockage de l'APSS » dépend de l'occurrence présumée des événements. Ainsi, la méthodologie de l'APSS nécessite une procédure qui a de nombreux points en commun avec l'analyse des caractéristiques, des événements et des processus (*Features, Events, and Processes – FEP*). En outre, chaque tentative pour

couvrir toutes les situations à prendre en compte profitera de la comparaison avec les analyses et les bases de données FEP qui auront été réalisées ailleurs. Par conséquent, l'APSS n'est pas une alternative aux méthodes basées sur les FEP, mais plutôt un instrument utile pour appliquer efficacement une telle méthode et en déduire une structure fondée sur un découpage espace/temps.

La méthode semble bien fonctionner pour étayer la description du scénario d'évolution normale. Toutefois, son utilité reste à prouver lorsqu'elle s'applique à des évolutions altérées reposant sur l'hypothèse d'événements incertains, mais particulièrement perturbateurs, et des séquences de tels événements. Comme l'APSS n'offre pas de flexibilité dans le temps et que le traitement de l'arborescence de défaillances subséquent ne tient pas compte du moment où de tels événements se produiraient, il convient de tester la méthode par rapport aux besoins en matière de développement (plus que de description) de scénarios altérés.

L'identification des processus pour une situation donnée doit être mieux argumentée et présentée. Une contribution utile dans ce sens serait de la confronter avec les bases de données FEP internationales, comme l'Andra se propose de faire. De même, les travaux de modélisation appuyant la description de situations doivent être mieux présentés. Il conviendrait aussi d'améliorer la clarté et l'approche systématique du traitement et de la répercussion des incertitudes non seulement au sein de l'APSS, mais aussi entre l'APSS et les autres aspects de l'analyse de sûreté.

L'APSS semble également appropriée en ce qui concerne la traçabilité des décisions, des choix, des hypothèses et des avancées de la recherche. Toutefois, les fiches utilisées pour décrire les situations devraient être améliorées en ce sens, en reflétant notamment les décisions, les références, le nom des experts concernés, etc. Une telle recommandation s'applique aussi aux descriptions formalisées des scénarios.

L'intégration des phases de construction, d'exploitation et de surveillance après fermeture dans la méthodologie favorise la cohérence dans l'analyse des différentes phases et représente donc un point fort de la méthodologie. Dans ce cas, la méthodologie de l'APSS semble être plus systématique que la plupart des autres méthodes comparables.

L'application de la méthode APSS a besoin d'être perfectionnée, notamment en ce qui concerne la présentation et la lisibilité. Des améliorations méthodologiques sont aussi nécessaires au sujet de l'analyse des répercussions des incertitudes, la flexibilité dans l'établissement des échelles de temps et le lien avec les autres aspects de l'analyse de sûreté. En résumé, le GRI considère

que la méthodologie de l'APSS pourrait devenir un outil utile en vue de remplir les buts visés, une fois que ces améliorations seraient apportées. Cela exigera des ressources, mais pourrait offrir non seulement une plate-forme valable pour intégrer les travaux scientifiques et les efforts en matière d'analyse de sûreté, mais aussi une plate-forme utile pour communiquer avec la communauté scientifique qui ne traite pas directement du stockage des déchets.

3.7.3 Analyse qualitative de sûreté (AQS)

De pair avec l'APSS, l'analyse qualitative de sûreté (AQS) forme la base de la méthodologie d'analyse de sûreté du *Dossier 2001 Argile*. Une contribution importante de l'AQS est la description des fonctions de sûreté des composants du stockage de déchets et de la roche hôte (analyse fonctionnelle interne – AFI). Cette description se présente sous la forme d'une arborescence de fonctions, la fonction ultime étant de protéger les êtres humains et l'environnement, et qui s'appuie sur la description de la conception du stockage et sur l'analyse des exigences qu'impose l'environnement externe sur le stockage.

Les résultats de l'APSS servent à juger si les fonctions souhaitées du système, selon la description de l'arbre de fonctions, pourraient être compromises dans une analyse de modes de défaillance et de leurs effets (AMDE). Les conclusions de cette analyse sont des défaillances élémentaires (i.e., causes possibles de la défaillance d'une fonction) associées à leur probabilité relative.

Pour le traitement plus poussé des modes de défaillance, l'arbre de fonctions est directement « inversé » en un arbre de défaillances. Les causes de défaillances élémentaires (et leur probabilité) sont ensuite rattachées aux fonctions correspondantes. Un traitement semi-automatique de l'arbre fournit les modes de défaillances critiques (y compris les combinaisons de défaillances) et leur classement relatif (dérivé de leur probabilité). Le classement des modes de défaillance sert ensuite de base pour la sélection d'un certain nombre de scénarios à traiter plus avant dans l'analyse de sûreté.

L'AQS offre un moyen méthodique de décrire les fonctions de sûreté du système et de mettre au point des scénarios pour les calculs de conséquences. Toutefois, la description de la méthodologie de l'AQS dans le *Dossier 2001 Argile* demeure insuffisante. Elle apparaît à un échelon trop bas dans la hiérarchie des rapports et manque à la fois de clarté et d'exhaustivité.

Le moment où se produit une défaillance n'entre pas en ligne de compte dans le traitement de l'arbre de défaillances. Par conséquent, une défaillance ayant lieu vers le début n'est pas traitée comme étant plus grave qu'une défaillance plus tardive dans le **classement** des modes de défaillances sur lequel repose le choix des scénarios. Une autre faiblesse similaire du traitement de l'arbre de défaillances concerne la difficulté d'aborder la détérioration graduelle des composants du stockage qui entraîne la perte progressive de la fonction.

En outre, la méthode est sensible aux probabilités relatives très incertaines et en partie subjectives attribuées aux différentes défaillances et qui ont aussi une influence sur les modes de défaillances et, par conséquent, sur la sélection ultérieure des scénarios.

Dans toutes les analyses de sûreté, la construction des scénarios et la sélection de ceux dont le traitement sera approfondi, notamment par des calculs numériques des conséquences, dépend en grande partie de décisions et de choix subjectifs. Ceux-ci doivent être identifiés de manière à pouvoir être tracés dans une démarche d'assurance de la qualité. Cela permet de les réexaminer à des stades ultérieurs de la mise au point de l'étude de sûreté et de les exposer de manière claire aux divers auditoires. Dans l'AQS, un tel facteur subjectif inévitable est introduit par les décisions qui sont prises au cours de la construction de l'arbre de fonctions et de la dérivation des probabilités de défaillances en utilisant l'APSS. Le traitement automatique ultérieur de l'arbre de défaillances grâce auquel les scénarios sont dérivés et classifiés pour considération future comporte le danger d'occulter le caractère subjectif des décisions sous-jacentes. *Ainsi, il conviendrait de définir un mécanisme pour identifier les principaux facteurs qui contribuent à la construction et au choix des scénarios afin de pouvoir les retracer jusqu'à leur origine.* La suggestion qui a été formulée plus tôt au sujet de l'enregistrement des processus de décision sur les fiches de situation d'APSS appuierait un tel développement. Les tableaux AMDE offriraient dans ce cas un bon point de départ.

En conclusion, le GRI note que l'AQS est une méthode systématique et plutôt complexe pour définir des scénarios dans une analyse de sûreté. Comme d'autres méthodes internationales disponibles, elle dépend nécessairement de jugements subjectifs. *Si elle doit être appliquée dans des analyses futures, il est recommandé que l'Andra mette au point des procédures non seulement pour rendre les éléments subjectifs plus identifiables et plus traçables, mais aussi pour tenir compte de l'évolution temporelle du système.*

3.7.4 Gestion des différentes échelles de temps

Le GRI a pris note que la méthodologie présentée par l'Andra dans le *Dossier 2001 Argile* permet de gérer les différentes échelles de temps pertinentes du stockage dans des formations géologiques profondes conformément à la Règle fondamentale de sûreté RFS III.2.f [18].

3.7.5 Gestion des incertitudes

Le *Dossier 2001 Argile* présente les différentes catégories d'incertitudes qui doivent être prises en compte en développant l'analyse de sûreté d'un stockage en formation géologique profonde. Étant donné le stade où se situe actuellement le programme, l'Andra n'a pas jugé bon d'explorer chaque catégorie d'incertitude en détail, mais cette approche est clairement expliquée et le GRI estime que les motivations invoquées sont justifiées. En particulier, l'« évolution normale » de la géosphère à long terme présentée dans l'analyse phénoménologique n'a pas été utilisée dans l'analyse de sûreté, et un seul « scénario d'évolution altérée » a été évalué. Néanmoins, le GRI pense qu'une solide méthodologie est en place pour aborder les incertitudes concernant l'évolution future du système du stockage. Afin de pouvoir étudier la faisabilité d'un stockage en formations argileuses profondes, cette méthodologie doit être appliquée globalement à toute analyse de sûreté future.

Les incertitudes liées au manque de connaissances et/ou de données, ou encore à la représentation du système, sont précisées dans les documents pertinents traitant de ces sujets, mais plus systématiquement dans certains cas que dans d'autres. Les documents de référence contiennent ces informations, mais celles-ci ne sont pas identifiées dans une partie spécifique et facilement repérable du document en question, tandis qu'une approche très systématique a été adoptée dans le cas de l'analyse phénoménologique. Dans ce dernier cas, les incertitudes liées à chaque phénomène sont énumérées dans une section dédiée du rapport et les moyens de traiter les incertitudes sont clairement détaillés (e.g., mesures de conception, recherches ciblées, etc.).

Le GRI a été impressionné par le souci de cohérence dans la gestion des incertitudes. La démarche a été conçue pour que toute acquisition de nouvelles connaissances étaye à l'avenir la sélection des différents modèles et valeurs de paramètres de manière à ce que l'évaluation de la performance du système soit améliorée en conséquence. Par exemple, un modèle pessimiste de lixiviation de déchets vitrifiés est utilisé pour le moment parce que les autres modèles alternatifs et moins pessimistes de ce processus ne sont pas assez fiables.

Au cours de la revue, la méthode proposée pour la sélection de paramètres raisonnablement pénalisants a été examinée en détail. Dès qu'il y avait suffisamment de données, la méthode était appliquée comme prévu, mais pour plusieurs cas de paramètres importants, il a été décidé que les incertitudes existantes justifiaient une valeur prudente. Une telle décision ne s'oppose pas à la procédure retenue pour choisir des paramètres raisonnablement pénalisants, mais a conduit le GRI à conclure que le processus a des limites d'utilisation dans l'analyse de sûreté. Toutefois, l'existence d'un tel processus pourrait s'avérer avantageux en imposant une discipline sur l'intégration de données scientifiques dans l'analyse. *Au cours de la revue, il était clair que l'Andra reconnaissait les limites de sa démarche pour choisir ses paramètres et disposait d'une bonne évaluation des méthodes qui pourraient améliorer la situation à l'avenir. Cette évaluation devrait s'avérer intéressante en elle-même et être idéalement présentée pour discussion aux homologues internationaux de l'Andra.*

Le GRI a été particulièrement impressionné par la gestion des incertitudes dans le processus de conception. Au stade actuel du programme, les choix d'architecture sont faits en fonction de leur robustesse en regard des incertitudes qui subsistent. Par exemple, les divers principes de conception de modules de stockage pour les déchets exothermiques sont conçus de manière à ce que la température des divers composants du système ne dépasse pas certains seuils. Ces derniers sont fixés comme limites supérieures de température au-dessous desquelles le comportement du composant demeure fiable dans des conditions appropriées. Une telle démarche devrait permettre d'aboutir à des architectures robustes pour l'évaluation prévue en 2005. L'Andra a confirmé l'opinion du GRI selon laquelle cette approche ne correspond pas à une optimisation de la conception. On s'attend donc à ce que l'optimisation soit réalisée à un stade ultérieur du programme de développement continu.

3.7.6 Analyses de sensibilité

Au stade précis où en est actuellement le programme français, l'analyse de sûreté doit naturellement traiter des diverses variantes et incertitudes. Entre autres choses, ces variantes relèvent des décisions soit des producteurs de déchets soit de l'Andra, tels les scénarios de combustible nucléaire à considérer, les colis de déchets à retenir pour les différents types de déchets, ainsi que les options de conception du stockage pour chaque type de colis. De plus, le *Dossier 2001 Argile* devait traiter des incertitudes dans les calculs d'évaluation liés aux scénarios, aux modèles et aux paramètres. Plusieurs de ces variantes et incertitudes, notamment celles qui touchent les colis de déchets, les options de conception et les choix de paramètres, ont été abordées par des calculs de

sensibilité. D'autres, comme la question des scénarios du cycle du combustible, ont fait l'objet d'hypothèses prudentes.

Les analyses de sensibilité déterministes étaient délibérément incomplètes, mais suffisantes, étant donné l'état actuel des connaissances ; elles étaient aussi pertinentes dans la mesure où elles orientaient l'Andra pour les futurs projets de recherche et développement à réaliser en identifiant les principales sources d'incertitude. En particulier, elles ont souligné de nombreux facteurs sur lesquels il faudrait se pencher au cours de la mise au point des concepts de stockage, notamment en ce qui concerne le rôle potentiel de la zone perturbée par l'excavation et le besoin correspondant de contrôle, ou la performance requise des scellements.

L'approche souligne également le rôle des différents colis de déchets à la lumière des conséquences possibles à long terme.

Toutefois, l'utilisation de modèles simplifiés et surtout de paramètres prudents ne permet pas à l'Andra de disposer d'informations valables concernant le choix des options d'architecture grâce à cette méthode particulière (bien que d'autres méthodes aient été utilisées efficacement pour renseigner les études d'architecture, comme il est mentionné à la section 3.2). Les modèles sont plutôt insensibles aux altérations des architectures.

Il est difficile d'appréhender l'ensemble des calculs de sensibilité dans le Dossier 2001 Argile. Ils auraient pu être présentés de manière plus méthodique et plus compréhensible.

4. CONCLUSIONS

Le GRI a été en mesure de présenter ses conclusions en réponse à chacun des points mentionnés dans son mandat.

4.1 Présentation de la documentation

Le GRI a beaucoup d'observations à formuler sur la présentation du *Dossier 2001 Argile* et a des recommandations à formuler sur la manière dont un tel document pourrait être amélioré à l'avenir. Une présentation claire est nécessaire pour bien comprendre comment les diverses composantes s'articulent. Toute l'information pertinente n'est pas clairement présentée ou facile à trouver. Dans le *Dossier 2001 Argile*, l'information présentée varie beaucoup en qualité et en exhaustivité, mais cela est compréhensible vu le stade actuel du programme dans son ensemble. La documentation ne reflète pas toujours l'excellent travail approfondi qui a été réalisé et que le GRI a pu constater, notamment dans le domaine de la modélisation hydrogéologique. Le GRI a noté que ces lacunes pouvaient entraîner certaines critiques injustifiées sur le contenu du *Dossier 2001 Argile*, au regard de la qualité générale des travaux techniques réalisés. Les Parties A et B du Rapport de synthèse du Dossier destinées à informer respectivement un public général assez vaste et un auditoire technique n'ont pas rempli leur rôle. La Partie A demeure trop technique et ne fait pas ressortir les acquis les plus importants. La Partie B ne satisfait pas l'expert technique qui souhaiterait disposer d'une vue globale du contenu scientifique et analytique du *Dossier 2001 Argile*, et devrait être appuyée par des renvois plus détaillés à des documents de référence pour pouvoir retracer les arguments. *Il conviendrait de présenter un plus grand nombre d'illustrations pour appuyer et préciser l'exposé des Parties A et B, et de veiller à ce qu'elles soient bien adaptées à l'auditoire visé, en traitant plutôt des aspects généraux que des détails techniques, tout particulièrement dans la Partie A. Comme amélioration dans ce domaine, il est recommandé à l'Andra d'avoir recours aux techniques modernes de présentation visuelle de l'information.*

Il est recommandé aussi que les documents servant de pièces justificatives au Rapport de synthèse soient plus complets en eux-mêmes et ne renvoient pas à des informations ou des contextes présentés ailleurs ; également, il faudrait que des références plus précises étayent l'information sous-jacente. Le GRI recommande que les documents du Dossier 2005 soient rédigés de manière à respecter une structure hiérarchique pré-établie.

4.2 Cohérence et pertinence des méthodes utilisées

Le GRI conclut sans réserve que le *Dossier 2001 Argile* contient tous les éléments méthodologiques requis pour une analyse de sûreté. Quelques méthodes récentes, comme l'APSS et l'AQS, sont prometteuses, mais doivent être perfectionnées. L'application de la méthode APSS doit être améliorée, notamment en ce qui concerne la présentation et la clarté. Il est aussi nécessaire d'améliorer la méthodologie pour assurer plus de flexibilité dans la détermination des échelles de temps et dans le lien avec les autres aspects de l'analyse de sûreté. Concernant la méthodologie AQS, il est recommandé à l'Andra de mettre au point des procédures pour rendre les éléments subjectifs plus clairs et traçables, et pour tenir compte de l'évolution temporelle du système. La cohérence entre les descriptions des méthodes et leurs applications n'est pas toujours manifeste. Par exemple, la procédure de sélection de paramètres raisonnablement pénalisants n'a pas été facile à retracer dans de nombreux cas. Des questions détaillées ont permis de confirmer qu'une telle cohérence existait, mais qu'elle n'était pas clairement présentée.

À propos de l'application des méthodes, le GRI a constaté que la cohérence générale entre les éléments de l'analyse de sûreté était convenable, mais recommande que l'analyse de la répercussion des incertitudes soit améliorée. Une telle amélioration pourrait être réalisée en partie par l'analyse d'une série de scénarios plus complète, mais il convient aussi de démontrer comment les incertitudes relatives aux données et, plus particulièrement, les incertitudes liées à l'établissement des échelles de temps dans l'APSS seront gérées et analysées en terme de conséquence pour les autres parties de la méthodologie d'évaluation. Les méthodes mises au point permettent d'identifier les principaux éléments sensibles du stockage au stade actuel, mais elles devront être améliorées dans les analyses futures. *Une mise en œuvre plus stricte et plus vaste d'une méthodologie soigneusement choisie pour les analyses de sensibilité serait conforme avec ce que les autres organisations sont en train de développer ou de mettre en œuvre au plan international.*

4.3 Cohérence interne entre la base de connaissances et les hypothèses

Le GRI considère qu'il est très important de signaler que l'Andra a adopté une démarche prudente. Une quantité considérable d'informations scientifiques de base qui étaient disponibles n'a pas trouvé place dans le *Dossier 2001 Argile*, mais pourrait être utilisée dans toute analyse future, au besoin. Les descriptions phénoménologiques étaient clairement traçables jusqu'aux données scientifiques et techniques, mais une des constatations à propos de la méthodologie APSS est qu'il est nécessaire à l'avenir de démontrer que l'ensemble de ces connaissances a bien été pris en compte. De l'avis du GRI, les valeurs retenues pour les paramètres utilisées pour évaluer la sûreté semblent coïncider avec les connaissances scientifiques et techniques, bien que souvent cette constatation aille dans le sens d'un choix bien étayé d'une valeur prudente. L'utilisation des connaissances scientifiques et techniques dans l'élaboration des modèles conceptuels est souvent impressionnante, par exemple dans le cas du modèle d'écoulement d'eaux souterraines ou de transport de radionucléides, ou encore dans certains modèles de relâchement de radionucléides, bien que la situation n'ait pu être pleinement appréciée qu'à la suite de présentations de la part des scientifiques de l'Andra sur le modèle d'écoulement et de transport.

Conformément à son mandat, le GRI a examiné certains thèmes précis de plus près dans le *Dossier 2001 Argile*, notamment la durée de vie des matériaux métalliques, les termes sources des colis de déchets, la description de la formation du Callovo-Oxfordien et de ses encaissants. La base scientifique générale, les capacités de modélisation et l'approche de sûreté lui ont semblé conformes aux meilleures pratiques internationales et aux travaux comparables réalisés par les programmes nationaux étrangers. Dans certains domaines, le *Dossier 2001 Argile* s'est révélé à la pointe du progrès à l'échelle internationale, notamment ce qui concerne :

- la prise en compte systématique de tous les types de déchets comme termes sources (e.g., les déchets bitumineux de type B ou les coques et embouts) ;
- la démarche faisant appel à la conception de barrières multiples pour les déchets de type B ;
- l'utilisation d'analogues archéologiques et industriels pour appuyer les choix de matériaux, et
- l'évaluation de la stabilité géologique.

Dans certains domaines, les approches de l'Andra sont novatrices, en particulier en ce qui a trait à la description des phénomènes et à la méthodologie

APSS connexe, la prise en compte de la phase d'exploitation (par rapport à la réversibilité), ainsi que la modularité de la conception du stockage de déchets.

Le GRI a accordé une attention toute spéciale à la base scientifique du *Dossier 2001 Argile*. Il a constaté que les liens de l'Andra avec les établissements publics de recherche étaient très manifestes. Il se réjouit de la politique mise en place pour encourager la recherche universitaire et post-doctorale et apprécie la qualité des relations contractuelles à long terme de l'Andra avec plus de 100 laboratoires grâce à des accords de partenariat et la promotion de groupes de recherche ou de réseaux de laboratoires.

Le GRI a été particulièrement impressionné par les informations présentées dans le document intitulé « Programme Scientifique HAVL-Argile, 2002-2005 » et reconnaît la pertinence des priorités visant à disposer d'une vision plus précise des principaux aspects du stockage des déchets dans une formation argileuse en 2005. La seule omission majeure concerne les incidences de l'évolution des gaz émanant des déchets. Des recommandations spécifiques sont donc faites pour y remédier le plus tôt possible. *Le GRI considère que le projet a déjà établi une solide capacité de modélisation numérique en vue de répondre à ses besoins et recommande fortement que l'on veille tout particulièrement à équilibrer tout développement ultérieur par rapport à la disponibilité des connaissances et des données requises.*

4.4 Pertinence des conclusions

Le GRI, s'est servi des principales conclusions de la Partie A du rapport de synthèse, énumérées ci-dessous comme cadre pour commenter la pertinence des conclusions du *Dossier 2001 Argile* :

1. Il existe une base de recherche et de développement solide et de haute qualité dans tous les domaines.

Cela est bien le cas pour un grand nombre d'aspects, bien que cela ne ressorte pas toujours dans la documentation disponible. La seule omission importante en matière de recherche et de développement concerne la question des gaz.

2. Les facteurs de conception et des démarches réalistes pour la conception préliminaire ont tous deux été établis.

Les facteurs de conception importants pour la sûreté sont clairement identifiés et les options de conception proposées semblent raison-

nables. La démarche de conception modulaire est prometteuse et doit permettre de disposer d'architectures robustes au regard des incertitudes communément considérées.

3. Le Dossier 2001 Argile a permis de tester la méthodologie de l'analyse de sûreté.

L'APSS offre une méthode innovante pour réaliser un formalisme systématique souhaitable comme fondement de l'analyse de sûreté. Non seulement elle intègre bien la science et l'analyse de sûreté, mais elle assure une plate-forme utile pour communiquer avec la communauté scientifique. Elle garantit, en principe, une analyse approfondie et traçable, mais certaines procédures ont encore besoin d'être développées pour y parvenir.

4. L'analyse de sûreté n'a fait ressortir aucun facteur rédhibitoire au regard de la faisabilité du stockage.

Les informations présentées dans le Dossier 2001 Argile sont cohérentes avec une telle affirmation, mais ne représente pas, comme le reconnaît l'Andra, une analyse détaillée à l'heure actuelle. Le Dossier 2001 Argile offre une base méthodologique valable pour une évaluation plus détaillée en 2005.

5. Les besoins futurs en matière de recherche et de développement ont été précisés.

Le programme scientifique 2002-2005 tire bien le profit du Dossier 2001 Argile. Toutes les principales exigences de recherche signalées dans le Dossier 2001 Argile sont abordées par les programmes de travail proposés qui sont susceptibles de fournir les informations requises en 2005.

6. Le rapport offre une plate-forme pour l'avenir.

L'état actuel du projet et les questions importantes à étudier sont notés, mais ils auraient pu être présentés plus efficacement dans le Dossier 2001 Argile. L'ensemble des informations et les méthodologies mises au point offrent à l'Andra une plate-forme solide pour étayer son programme futur et, en particulier, pour parvenir à une analyse plus approfondie et plus exhaustive en 2005.

5. RÉFÉRENCES

AEN (Agence pour l'énergie nucléaire). 2001. *Gas generation and migration in radioactive waste disposal*. Workshop Proceedings 26-28 June 2000, Reims, France. OCDE/AEN. Paris, France.

Commission nationale d'évaluation (CNE). 1998. *Réflexions sur la réversibilité des stockages*. (Il existe un résumé en anglais intitulé *Thoughts on retrievability*).

France. Premier ministre. 1998. Comité interministériel sur les questions nucléaires du 9 décembre 1998, Relevé de conclusions. (<http://www.premier-ministre.gouv.fr/fr/p.cfm?ref=23013&txt=1>)

Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra). 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.

Olsson, O., C. Svemar, T. Papp, and T. Hedman. 2001. "The potential for retrievability and application of monitoring within the KBS-3 concept for final disposal of spent nuclear fuel", in *Proceedings of WM'01 Conference*, February 25-March 1, 2001, Tucson, AZ.

Poinssot, C. (ed.), P. Toulhoat, J.-P. Grouiller, J. Pavageau, J.-P. Piron, M. Pelletier, P. Dehaut, C. Cappelaere, R. Limon, L. Desgranges, C. Jegou, C. Corbel, S. Maillard, M.-H. Faure, J.-C. Cicariello, and M. Masson. 2001. *Synthèse sur l'évolution à long terme des colis de combustibles irradiés (Synthesis on the long-term behavior of the spent nuclear fuel)*. Rapport CEA CEA-R-5958(E). CEA. Saclay, Gif-sur-Yvette, France.

Rodwell, W.R., A.W. Harris, S.T. Horseman, P. Lalieux, W. Miller, L. Ortiz Amaya, and K. Preuss. 1999. *Gas migration and two-phase flow through engineered and geological barriers for a deep repository for radioactive waste*. European Commission Report EUR 19122 EN.

Shoesmith, D.W. 2000. "Fuel corrosion processes under waste disposal conditions", *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 282, 1-31.

SKB (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company). 2001. *RD&D-Programme 2001. Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste*. Technical Report TR-01-30. SKB. Stockholm, Sweden.

Swift, B.T., A.R. Hoch, and W.R. Rodwell. 2001. *Modelling gas migration in compacted bentonite: GAMBIT Club Phase 2 final report*. Posiva Report 2001-02. Posiva. Helsinki, Finland.

Wildi, W., D. Appel, M. Buser, F. Dermange, A. Eckhardt, P. Hufschmied, H.-R. Keusen, and M. Aebersold. 2000. *Modèles de gestion des déchets radioactifs (Disposal Concepts for Radioactive Waste), rapport final*, Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication.. Berne, Suisse.

Annexe I

COMPOSITION DU GROUPE DE REVUE INTERNATIONALE

Alan Hooper

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 attiré 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).

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).

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.

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.

Philippe Lalieux

Géologue et géophysicien, Philippe Lalieux 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 géo-scientifique 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 et la conception des expériences pour le stockage des déchets radioactifs (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 et défendre le second rapport SAFIR qui a été présenté aux autorités, en 2001. Il est actuellement chargé de la coordination du programme belge de stockage des déchets de haute et moyenne activité dans des formations argileuses profondes peu indurées.

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*.

Albert Machiels

Albert Machiels est directeur technique principal de l'Institut de recherches sur l'énergie électrique (EPRI) des États-Unis, où il est en charge 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.

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, œuvrant 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.

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 combustible 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, ainsi que le rapport SAFIR 2 élaboré par l'Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles (ONDRAF/NIRAS) de Belgique.

Annexe 2

LISTE DES DOCUMENTS EXAMINÉS

Le GRI a examiné les principaux documents suivants dans la version anglaise, l'intitulé français figurant entre parenthèses :

1. Dossier 2001 Argile, Synthesis Report, Part A (Dossier 2001 Argile, Rapport de synthèse, Partie A).
2. Dossier 2001 Argile, Synthesis Report, Part B, Supporting Scientific and Technical Data (Dossier 2001 Argile, Rapport de synthèse partie B, Compléments scientifiques et techniques).
3. Materials Baseline, Vol. 4, Corrosion of Metallic Materials (Référentiel matériaux, Tome 4, La corrosion des matériaux métalliques) (C.RP.AMAT. 01.060, 219 p.).
4. Geological Reference Document of the Meuse/Haute-Marne Site, Vol. 5, State of Progress in Modelling (Référentiel géologique du site de Meuse/Haute-Marne, Tome 5, État d'avancement de la modélisation) (A RP ADS 99-005, 67 p.).
5. High-level, Long-lived Waste Repository Project, Normal evolution scenario in post-closure phase, Definition (Projet HAVL, Scénario d'évolution normale en phase de post-fermeture, Définition) (SUR NT ADSU 00-041, 70 p. plus appendices).
6. High-level, Long-lived Waste Repository Project, Normal evolution scenario in post-closure phase, Justification and traceability of hypotheses considered (Projet HAVL, Scénario d'évolution normale en phase de post-fermeture, Justification et traçabilité des hypothèses réalisées) (SUR NT ADSU 01-014, 43 p.).
7. High-level, Long-lived Waste Repository Project, Scenario for seal failure and/or transfer through the damaged zone around seals and engineered barrier plugs, Definition (Projet HAVL, Scénario de défaut de scellement et/ou de transfert par la zone endommagée autour des

scellements et des bouchons de BO, Définition) (SUR NT ADSU 00-038/B, 67 p.).

8. High-level, Long-lived Waste Disposal in Clay Project, Qualitative Safety Analysis Methodologies for Repository Operating and Post-Closure Phases (1st safety verification) (Projet HAVL Argile, Méthodologies d'analyse qualitative de sûreté pour les phases d'exploitation et de post-fermeture du stockage) (1^{ère} vérification de sûreté) (C NT ADSU 01-106, 31 p.).
9. High-level, Long-life Waste Repository Project – Clay, Analysing Levels of Reversibility in Preliminary Concepts (Projet HAVL Argile, Analyse des niveaux de réversibilité des concepts préliminaires) (C RP A HVL 01-078, 84 p.).
10. Phenomenological Analysis of Repository Situations (APSS), Objective and methodology (Analyse Phénoménologique des Situations de Stockage (APSS), Objet et méthodologie) (C DO AHVL 00-138, 17 p.).
11. Safety Approach devised for the feasibility study of the high-level long-lived waste repository project (Approche de sûreté dans le cadre du projet d'étude de faisabilité du stockage des déchets à haute activité et vie longue) (SUR NT ADSU 99-052/B, 35 p.).
12. 2001 Safety Calculations, Waste Packages Source Term Proposals (Status as of 31/12/2000) (Calcul de sûreté de 2001, Propositions de termes sources des colis de déchets) (état au 31/12/2000) (C.NT.AMAT.99.069, 78 p.).

Le GRI a examiné les documents suivants dans leur version anglaise à titre de pièces justificatives.

13. HAVL Project, Preliminary concepts, Comparison of RFS.III.2.f and the Andra approach, Packages, engineered barriers and seals (Projet HAVL, Concepts préliminaires, Comparaison de la RFS III.2.f et de l'approche de l'Andra, Colis, barrières ouvragées et scellements) (SUR.NT.ADG. 01.190, 15 p.).
14. Scientific Programme, HLLW Clay Repository Project, 2002-2005 (Programme Scientifique HAVL Argile, 2002-2005) (C PE ADS 02-039, 131 p.).
15. Procedure: Choice of Cautious but Reasonable Data for Processing Safety Scenarios (Mode opératoire, Choix de données raisonnablement pénalisantes pour le traitement de scénarios de sûreté) (QUA MO ADSU 01-4223, 7 p.).

16. Analysis and management of uncertainties within the context of research into repositories in deep geological formations. (Analyse et gestion des incertitudes dans le cadre des recherches sur le stockage en formation géologique profonde).
17. Research in Radioactive Waste Management, Loi du 30 décembre 1991 (Reproduction par l'Andra de la loi française n° 91-1381 du 30 décembre 1991 – (Loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs).
18. Ministère de l'Industrie et du Commerce extérieur. Règle fondamentale de sûreté n° III.2.f, Disposal of Radioactive Waste in Deep Geological Formations (Ministère de l'Industrie et du Commerce extérieur. Règle fondamentale de sûreté n° III.2.f, Stockage définitif de déchets radioactifs en formation géologique profonde).
19. Ministry of Research, Technology Division. Research Strategy and Programmes on the Management of Long-lived High-level Radioactive Waste, 2002-2006, Status Report & Executive Summary, 2002 Edition – (Ministère de la Recherche, Direction de la Technologie, Stratégie et Programmes des Recherches sur la gestion des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue, Document de conjoncture et Résumé opérationnel, Édition 2002).

Le GRI a examiné les documents suivants dans leur version française à titre de pièces justificatives :

20. Référentiel géologique du site de Meuse/Haute-Marne, Tome 4, Le Callovo-Oxfordien (A RP ADS 99-005, 154 p.).
21. Analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS), Arborecence matérielle (C SH AHVL 99-106, 7 p.).
22. Analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS), Processus de stockage : hypothèse de travail (C NT ASTE 00-0805).
23. Analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS), Définition des situations (C NT AHVL 99-038).
24. Analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS), Chronogramme « Période d'exploitation d'un stockage » (C PN AHVL 00-0139).
25. Analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS), Fiches de situation (C DO AHVL 01-001).

26. Analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS), Fiche de situation 14, État naturel du Callovo-Oxfordien dans contexte géodynamique initial (0-100 000 ans) (C NT AHVL 00-070).
27. Analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS), Fiche de situation 68, Module et alvéoles de stockage de combustibles usés UOX pendant la phase thermique (100-5000 ans) (C NT AHVL 00-114).
28. Analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS), Fiche de situation 77, Module et alvéoles de stockage de combustibles usés UOX pendant la phase de resaturation des modules (5 000-10 000 ans) (C NT AHVL 00-115).
29. Analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS), Fiche de situation 81, Évolution après 100 000 ans des formations géologiques (C NT AHVL 00-135).

L'Andra a aussi présenté d'autres pièces justificatives en français à la demande du GRI. La revue s'est aussi inspiré des informations fournies dans les réponses aux questions soulevées par le GRI et des nombreux échanges avec les scientifiques et ingénieurs de l'Andra (voir Section 1.4).

Annexe 3

LISTE DES ACRONYMES

Abréviation française	Français	Anglais	Abréviation anglaise
AEN	Agence pour l'énergie nucléaire	Nuclear Energy Agency	NEA
AFI	Analyse fonctionnelle interne	Internal Functional Analysis	IFA
AMDE	Analyse de défaillance et de leurs effets	Failure Mode and Effects Analysis	FMEA
Andra	Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs	National Agency for Radioactive Waste Management	
APSS	Analyse phénoménologique des situations de stockage	Phenomenological Analysis of Repository Situations	PARS
AQS	Analyse qualitative de sûreté	Qualitative Safety Assessment	
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	

GPD	Groupe permanent déchets auprès de l'autorité de sûreté nucléaire		
HAVL	[Déchets à] haute activité et à vie longue	High-level long-lived [wastes]	LL-HLW (or HLLLW, as in some translations)
RFS III.2.f	Règle fondamentale de sûreté iii.2.f	Basic Safety Rule III.2.f	
THMCR	[Phénomènes] thermiques, hydrauliques, mécaniques, chimiques et radiologiques	Thermal, Hydraulic, Mechanical, Chemical, and Radiological [phenomena]	THMCR
		Features, Events, and Processes	FEPs
		International Review Team	IRT
		Research and Development	R&D
		Terms of Reference	ToR
		Underground Research Laboratory	URL

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