



**INSTITUTE FOR ENERGY AND
ENVIRONMENTAL RESEARCH**

6935 Laurel Avenue, Suite 201
Takoma Park, MD 20912

Phone: (301) 270-5500
FAX: (301) 270-3029
e-mail: ieer@ieer.org
<http://www.ieer.org>

**Examen critique du programme de recherche de l'ANDRA
pour déterminer l'aptitude du site de Bure au confinement
géologique des déchets à haute activité et à vie longue**

RAPPORT FINAL

préparé par

l'Institut pour la recherche sur l'énergie et l'environnement (IEER)

pour

Le Comité Local d'Information et de Suivi

Directeur du Projet
Arjun Makhijani, Ph.D.

Coordinatrice du projet
Annie Makhijani

27 décembre 2004
avec corrections 11 janvier 2005

Auteurs du rapport (par ordre alphabétique) :

Detlef Appel, Ph.D.
Prof. Jaak Daemen, Ph.D.
Prof. Geoge Danko, Ph.D.
Yuri Dublyansky, Ph.D.
Prof. Rod Ewing, Ph.D.
Prof. Gernard Jentzsch, Ph.D.
Horst Letz, Ph.D.
Arjun Makhijani, Ph.D.

Les différents membres de l'équipe ont eu la responsabilité des disciplines scientifiques suivantes et ont rédigé les chapitres correspondants :

Chapitre 1: Principes de confinement géologique - Arjun Makhijani. Yuri Dublyansky a contribué à la section sur la paléoclimatologie
Chapitre 2: Mécanique des roches - Jaak Daemen
Chapitre 3: Aspects thermiques de la conception et de la construction du site de stockage : George Danko
Chapitre 4: Programme de recherches sur le terme source et le champ proche: Rod Ewing
Chapitre 5: Hydrogéologie - Detlef Appel
Chapitre 6: Aspect minéralogiques et géochimiques dans la formation hôte - Yuri Dublyansky
Chapitre 7: Sismologie et déformation :Gerhard Jentzsch et Horst Letz

Traduction: Annie Makhijani
Relecture de traduction: Annike et Jean-Luc Thierry
Appui scientifique: Annie Makhijani
Documentaliste: Lois Chalmers

Table des matières

Préface.....	9
Conclusions Principales et Recommandations	19
Principales conclusions générales.....	19
Principales recommandations globales.....	22
Chapitre 1 : Implications de la recherche sur les normes de la dose, l'évaluation de la performance des scénarios et les facteurs externes.....	23
1.1 Introduction.....	25
1.2 Aspects relatifs à la sûreté, à la santé et à l'environnement...27	
1.3 Relations entre recherche et respect des limites de dose	28
1.3.1 Recherche sur les scénarios d'exposition et le système de confinement ..29	
1.3.2 Implications pour la recherche des calculs de performance dans le Dossier 2001 Argile	31
1.4 Intrusion humaine	35
1.4.1 Intrusion humaine accidentelle	37
1.4.2 Les ressources géothermiques et l'intrusion humaine37	
1.4.3 Intrusion humaine délibérée.....	40
1.5 Changements climatiques	41
1.5.1 Changements anthropiques dans la circulation thermohaline...44	
1.5.2 Reconstructions paléo-climatiques	49
1.5.3 Programme de l'ANDRA sur les changements climatiques pour le site de Bure	51
1.6. Références.....	53
Chapitre 2. Mécanique des roches	59
2.1 Introduction.....	61
2.2 Exigences réglementaires.....	62
2.3 Les questions techniques.....	66
2.3.1 Réversibilité	67
2.3.2 La stabilité à long terme du creusement	68
2.3.3 Zone perturbée par l'excavation (EDZ)	68
2.3.4 Comportement mécanique de la roche et du massif rocheux...69	
2.3.5 Constructibilité.....	70
2.3.6 Les effets de la construction sur la performance du site de stockage	71
2.3.7 Scellement.....	71
2.3.8 Contrainte.....	72
2.3.9 Modélisation	73
2.3.10 Instabilités structurales majeures résultant des effets du site de stockage	73

2.4. Éléments de la recherche poursuivie par l'ANDRA.....	73
2.4.1 Recherche en cours	74
2.4.2 Travaux envisagés.....	79
2.5. Relation(s) entre les éléments de recherches (2.4) et les questions techniques (2.3)	81
2.6 Évaluation de la recherche : exhaustivité et pertinence	82
2.7 Les insuffisances de la recherche.....	82
2.8 Avancement des travaux et calendrier prévu	85
2.9. Comparaison avec d'autres programmes.....	86
2.10 Conclusions.....	86
2.11 Recommandations.....	87
2.12 References.....	92
Chapitre 3. Aspects thermiques dans la conception et la construction des ouvrages d'enfouissement	101
3.1 Introduction.....	103
3.2 Programme de caractérisation thermique du site et base des données de conception qui en découle	104
3.2.1 L'évaluation de l'interaction H→T	105
3.2.2 L'évaluation des interactions M→T	108
3.2.3 Le programme de mesure in situ sur le site de Bure.....	110
3.2.4 Les mesures des propriétés thermophysiques sur échantillons de laboratoire	113
3.2.5 L'extrapolation des résultats de laboratoire au massif	115
3.2.6 L'applicabilité des résultats obtenus sur d'autres sites....	116
3.3. Modèles de conception/d'analyse thermique pour le site et la barrière ouvragée	116
3.3.1 La question des hypothèses et des erreurs dans la modélisation	117
3.3.2 La question de la compréhension des processus thermiquement induits..	119
3.3.3 La question des priorités	120
3.3.4 Les questions de la charge thermique et du dimensionnement.....	121
3.4 Eléments du système des barrières ouvragées	123
3.5 Caractérisation de la charge thermique.....	124
3.6 Relevé de conclusions.....	125
3.7 Sommaire des recommandations principales.....	127
3.8 References.....	128
Chapitre 4. Terme source et champ proche	131
4.1 Introduction.....	133

4.2 Matériaux du terme source.....	134
4.2.1 Caractéristiques générales des déchets vitrifiés (déchets C)....	134
4.2.2 Caractéristiques générales du combustible usé....	135
4.2.3 Caractéristiques générales des déchets B.....	135
4.2.4 Commentaires généraux sur les matériaux du terme source....	136
4.3 Environnement du champ proche	137
4.4 Pourquoi l'environnement du champ proche et le terme source sont-ils importants ?	
.....	138
4.5 Évaluation du terme source.....	140
4.5.1 Déchets vitrifiés	140
4.5.2 Évaluation sur le combustible usé.....	143
4.5.3. Déchets B	147
4.6 Évaluation sur les matériaux du champ proche	148
4.6.1 Conteneurs de déchets métalliques	150
4.6.2 ARGILE - Barrière ouvragée.....	153
4.6.3 Matériaux à base de ciment servant de barrière ouvragée	155
4.6.4 ARGILE - La formation Callovo-Oxfordienne... 156	
4.7 Sources d'incertitudes	159
4.8 References.....	163
Chapitre 5 : Hydrogéologie.....	169
5.1 Introduction.....	171
5.2 Exigences hydrogéologiques de la Règle fondamentale III.2.f	173
5.2.1 Le critère hydrogéologique essentiel	174
5.2.2 Critère essentiel de stabilité	175
5.2.3 Recommandations méthodologiques de la Règle III.2.f.... 175	
5.2.4 Critères importants.....	176
5.3 Informations utilisées.....	176
5.3.1 Informations sur la démarche adoptée par l'ANDRA dans ses investigations	
scientifiques	177
5.4 Hydrogéologie du site de Bure	178
5.4.1 Situation géologique et généralités	178
5.4.2 Situation hydrogéologique.....	181
5.5 Le modèle hydrogéologique conceptuel de l'ANDRA	191
5.5.1 Callovo-Oxfordien	191
5.5.2 Les formations sus- et sous-jacentes.....	192
5.6 Évaluation de l'approche de l'ANDRA pour des investigations hydrogéologiques	
.....	192
5.6.1 Contraintes et critères	192
5.6.2 Etat des connaissances et des techniques.....	194

5.6.3 Plausibilité du modèle conceptuel de l'ANDRA.....	195
5.6.4 Connaissances relatives aux propriétés des roches argileuses consolidées	196
5.6.5 Données hydrogéologiques de base et programme de recherche	202
5.7 Recommandations.....	213
5.8 References.....	216
Chapitre 6. Aspects minéralogiques et géochimiques dans la formation hôte	221
6.1 Introduction : Objectifs et moyens de la recherche paléo-hydrogéologique ...	223
6.2 Réglementations relatives aux questions abordées dans ce chapitre	224
6.3 Questions scientifiques abordées dans ce chapitre ..	225
6.4 Minéraux secondaires	226
6.4.1 Calcite de fracture et de remplissage sur le site de Bure : aperçu d'ensemble	22
6.4.2 Hypothèses concernant l'origine des minéraux secondaires et leurs implications paléo-hydrogéologiques.....	228
6.4.3 Statut de la recherche et projets de l'ANDRA pour la recherche sur les minéraux secondaires.....	231
6.4.4 Discussion de certains aspects techniques de la recherche menée par l'ANDRA sur les minéraux secondaires et recommandations sur les améliorations à apporter	233
6.5 <i>Hydrocarbures gazeux des argilites du Callovo-Oxfordien</i>	238
6.5.1 Isotopes et compositions moléculaires des gaz...238	
6.5.2 Signification des données	242
6.5.3 Les projets de recherche de l'ANDRA sur les hydrocarbures gazeux dans la formation du Callovo-Oxfordien	242
6.6 Conclusion concernant la pertinence et l'exhaustivité du programme de l'ANDRA	243
6.7 Recommandations.....	244
6.7.1 Recommandation générale.....	244
6.7.2 Développement d'un modèle conceptuel de la migration des paléo-fluides	244
6.7.3 Recommandations techniques relatives aux études sur les minéraux secondaires et les hydrocarbures gazeux	245
6.7.4 Caractérisation 3-D à grande échelle	247
6.8 References.....	252
Chapitre 7. Sismologie et déformation : considérations concernant la recherche sur le site	259
7.1 <i>Objectifs</i>	260
7.1.1 Généralités	260

7.1.2 Réglementation française sur la sûreté - conditions aux limites pour évaluer le travail de l'ANDRA	261
7.2 Programme de recherche de l'ANDRA.....	264
7.2.1 Vue d'ensemble	264
7.2.2 Activité tectonique	265
7.2.3 Aléa sismique.....	268
7.3 Discussion – évaluation	271
7.3.1 Généralités	271
7.3.2 Caractère pénalisant de l'évaluation de risque de l'ANDRA... 271	
7.3.3 Période de confinement.....	272
7.3.4 Activité tectonique	272
7.3.5 Evaluation de l'aléa sismique	273
7.3.6 Activité tectonique et barrière géologique.....	275
7.4 Recommandations détaillées.....	276
7.4.1 Carte des mouvements verticaux.	276
7.4.2 Évaluation de l'aléa sismique	277
7.4.3 Généralités	278
7.5 Figures.....	279
7.5 Références.....	284
Annexe 1	287

Préface

Le présent rapport a été préparé à l'intention du Comité local d'information et de suivi par l'*Institute for Energy and Environmental Research* (IEER). L'Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA) procède actuellement à des recherches sur le site de Meuse/Haute-Marne, (également appelé site de Bure), pour évaluer son aptitude à assurer le confinement géologique des déchets radioactifs à longue durée de vie et les combustibles usés. Le Comité local d'information et de suivi (CLIS) a choisi l'IEER pour évaluer ce programme de recherche et formuler des recommandations dans les domaines où des améliorations pourraient s'avérer nécessaires. Cette analyse doit être envisagée dans le contexte du programme global de recherche et d'évaluation d'un site pour un confinement géologique. Nous avons donc décidé d'une introduction explicitant ce point de vue pour que les particularités des chapitres du rapport puissent être mieux comprises

Un programme de recherche sur un site d'enfouissement intervient dans le cadre de l'évaluation des performances du système de confinement géologique. Par exemple, le document de l'AIEA BIOMASS 6 ¹ traite des besoins relatifs à la définition du contexte dans lequel intervient une évaluation, et apporte des recommandations sur la manière dont celui-ci peut être précisé.

Il existe une interaction entre la recherche sur la caractérisation d'un site, le modèle conceptuel d'un système de confinement géologique, la conception du site d'enfouissement, l'évaluation des performances et la détermination des besoins de recherches additionnels. Dans le cadre de ce système, ce rapport est centré sur l'aspect « recherche » du problème. Une recherche n'est toutefois pas un exercice purement théorique, avec pour seul objectif de mener une étude géologique. Son but est bien d'évaluer si un site est capable de répondre aux objectifs de sûreté globaux qui ont été définis, et d'établir les données et analyses, notamment la modélisation et la validation qui doivent être effectuées pour procéder à cette évaluation. Elle apporte également des jugements sur la conception et sur la question de savoir si la roche hôte sélectionnée peut accueillir et permettre la construction d'un site de stockage présentant la capacité et les performances voulues.

Le dispositif de recherche s'intègre à un processus itératif, décrit sur la figure P-1. Cette figure fait l'hypothèse qu'une sélection préliminaire a été effectuée pour le site, et que la recherche sur le système de confinement est liée au site, dans la mesure où il s'agit du cadre de référence de la présente étude.²

¹ IAEA-BIOMASS-6 2003

² Nous sommes sensibles au fait que, dans l'idéal, il serait souhaitable d'avoir une caractérisation pour plus d'un site, de façon à pouvoir comparer les atouts et les faiblesses de chacun. La loi française sur les déchets avait envisagé de le faire, mais la recherche étant axée uniquement sur un site, une comparaison satisfaisante pourrait bien s'avérer impossible. Cette question dépasse notre cadre de référence, et nous ne l'avons pas abordée dans ce rapport.

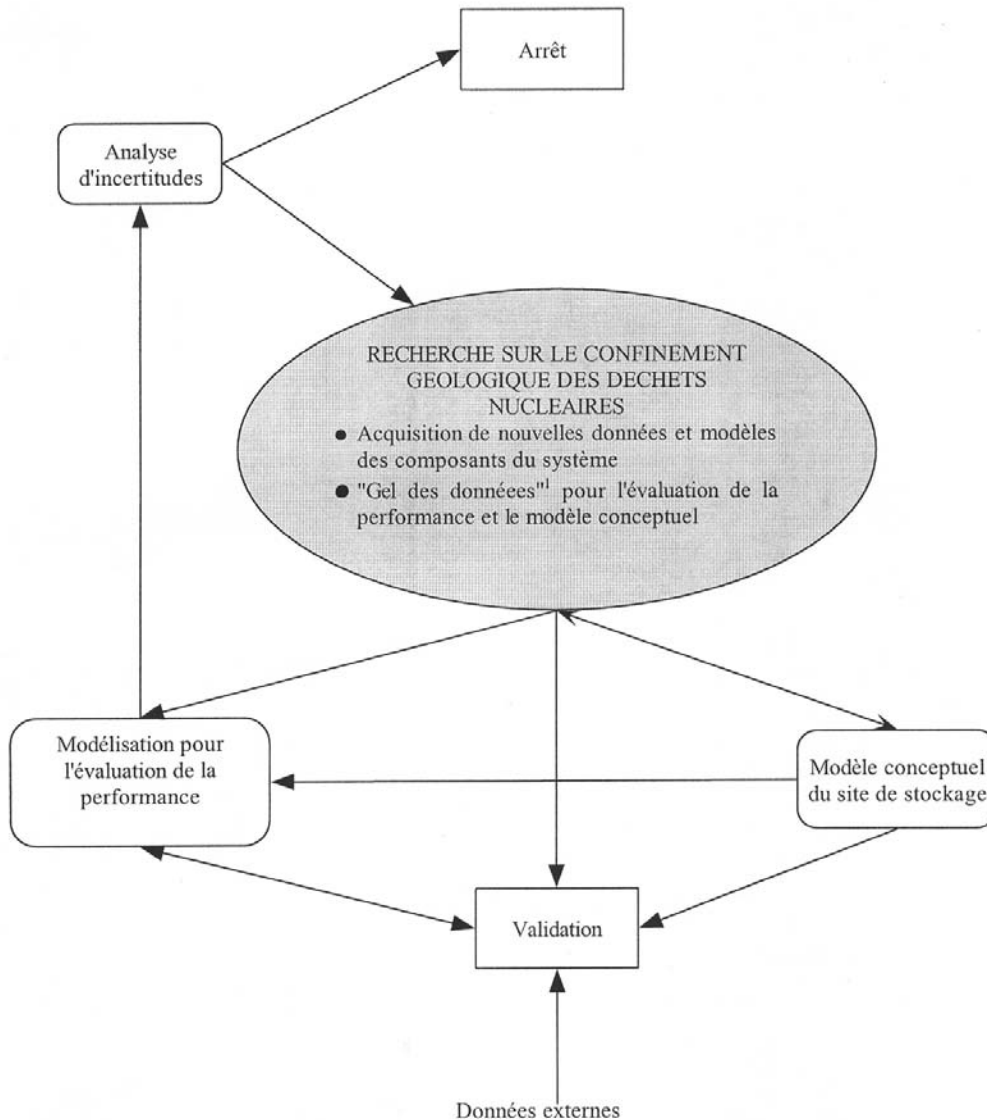


Figure P-1.

Note 1 : Pour la définition de « gel des données » voir le texte de la préface

La collecte des données de caractérisation et de recherche est un processus continu. Ces données doivent toutefois être intégrées à un modèle conceptuel global du site. Cela suppose l'intégration de données sur :

- Les barrières ouvragées et terme source
- La géologie sédimentaire

- L'hydrogéologie
- L'hydrogéochimie (champ proche et lointain)
- La mécanique des roches
- Les caractéristiques thermiques
- La sismicité

Il existe des avantages importants à réaliser des « gels de données »³ périodiques, qui servent à une nouvelle étude conceptuelle et également à la modélisation destinée à l'évaluation des performances.

L'un des avantages d'avoir un modèle conceptuel global entièrement défini à partir d'un gel des données est que cette méthode apporte une référence permettant à tous les membres du projet de mettre en contexte leurs travaux spécialisés. Cet aspect est bien illustré par les descriptions fournies par SKB pour les zones de Forsmark et Simpevarp, basées sur des données gelées de niveau 1.1.⁴ L'hydrogéologue dispose, par exemple, d'un ensemble de données chimiques auxquelles il peut se référer dans son travail. L'expert en mécanique des roches possède le même ensemble de données que l'hydrogéologue en ce qui concerne les fractures et les plans de stratification. Les modèles peuvent ainsi avoir une cohérence interne et leur logique peut être testée.

Plus généralement, cette base de données à cohérence interne fournit un cadre de travail pour l'étude conceptuelle d'une installation et une base pour la modélisation servant à l'évaluation des performances. C'est ce qui est représenté par le troisième ovale de la Figure 1. L'étude conceptuelle est également essentielle à l'évaluation des performances. L'ANDRA a franchi une première étape avec le Dossier 2001 Argile. Dans cet exercice, son modèle conceptuel existant de la roche hôte (sans flux convectifs et une constante de diffusion très faible contribuant au long temps de transport jusqu'à l'exutoire) a été modélisé de façon à pouvoir tester la méthodologie pour l'évaluation des performances.

L'étude conceptuelle détermine, avec les propriétés du site, l'évaluation des caractéristiques probables de la zone perturbée par l'excavation (EDZ). Ces caractéristiques peuvent, à leur tour, être fondamentales pour les résultats de l'évaluation des performances. Les scénarios altérés de l'ANDRA dans le Dossier 2001 Argile, par exemple, font apparaître que, pour son étude conceptuelle, les performances des scellements sont essentielles pour savoir si les critères de dose du site seront respectés.

Au début de la caractérisation du site, l'évaluation des performances ne vise pas d'abord à la démonstration de l'aptitude du site. Cela vient ultérieurement, dans le processus

³. Il est à noter qu'un « gel de données » n'est pas un arrêt de la collecte des données. Le gel de données concerne seulement les données qui sont utilisées pour une évaluation de performance et du modèle conceptuel et de la conception du modèle pour chaque étape du processus itératif. Cette démarche a l'avantage de permettre une vue d'ensemble du programme de confinement géologique d'émerger périodiquement.

⁴ SKB 2004a et SKB 2004b. Le Conseil national de la recherche (National Research Council) de l'Académie des sciences des Etats-Unis (National Academy of Science) a également étudié et recommandé une approche par palier pour la recherche sur le confinement géologique et le développement d'un site d'enfouissement particulier. NAS-NRC 2003

d'évaluation et d'autorisation. Cette évaluation vise plutôt à fournir les informations pour une analyse des incertitudes, en identifiant ce qui n'est pas connu mais doit l'être pour pouvoir évaluer complètement l'aptitude du site par rapport à un cadre d'évaluation donné. Ainsi, la caractérisation de l'EDZ, les essais de scellement en laboratoire et in situ ou le développement de fractures induites dans le cadre de l'EDZ, apparaissent tous comme des questions essentielles pour la prochaine phase de recherche.

Des analyses d'incertitude et de sensibilité devraient être interprétées dans les termes les plus généraux. Il est important d'identifier conceptuellement, à partir des connaissances disponibles, différents modes de comportement du système, et d'envisager les implications de ces différents modèles conceptuels pour la recherche et la conception, notamment la dépendance relative vis-à-vis des composantes naturelles ou ouvragées du système.

Par exemple, dans le cas actuel, pour ses calculs l'ANDRA a fait l'hypothèse d'un rejet relativement important dans le champ proche du confinement ouvragé (les colis de déchets). Cela permet de réaliser un essai exigeant de la robustesse des rôles des scellements et du système géologique naturel dans le champ lointain en satisfaisant aux normes de sûreté requises. Dans ce cas, le résultat indique clairement qu'il est nécessaire d'élargir l'étude conceptuelle pour inclure des caractéristiques qui réduiraient les relâchements de radionucléides à partir du système de barrières ouvragées (Chapitre 4), en diminuant la dépendance par rapport aux scellements et en permettant de s'assurer du respect des normes de radioprotection avant la phase d'autorisation.

Le modèle conceptuel adopté par l'ANDRA dans le Dossier 2001 Argile fait apparaître un problème potentiel dans la mesure où le modèle adopté pourrait bien empêcher la prise en compte d'autres alternatives. Par exemple, l'hypothèse d'un régime dominé par la diffusion pourrait empêcher toute analyse de l'importance éventuelle d'un flux convectif dans une représentation d'un réseau de fracture de la roche hôte.

Il est peu probable que des données valables soient disponibles, dans les premières étapes du programme de caractérisation d'un site, pour déterminer lequel des différents modèles conceptuels du site est le plus approprié (par exemple, le flux dans la formation hôte est-il dominé par la convection ou la diffusion ?). Dans le cas où des modèles alternatifs ne pourraient être exclus, et où ces alternatives auraient des implications très différentes sur les performances, il est important de leur appliquer le processus itératif décrit dans la figure, et en particulier que des priorités soient établies pour les activités de caractérisation du site, pour déterminer laquelle des alternatives est applicable.⁵

De nombreux aspects essentiels de la caractérisation du site, qu'il s'agisse des essais avec éléments chauffants ou de la caractérisation de l'EDZ dans la roche hôte, n'ont pas encore été abordés. De ce fait, nous considérons que le programme de l'ANDRA, pour la recherche spécifique au site, est actuellement dans une phase préliminaire qui nécessitera un travail itératif considérable avant de pouvoir déterminer, sur des bases scientifiques solides, le caractère approprié du site, voire même sa faisabilité. Notre travail dans ce

⁵ Voir, par exemple, l'analyse de Andersson et al. 2004.

rapport vise à spécifier les types de recherches qui doivent être effectués dans le cadre de ce processus itératif. Nous ne pouvons pas, bien sûr, prévoir les divers imprévus qui peuvent survenir au cours du processus de caractérisation de l'horizon du site de stockage. Nous avons toutefois identifié de nombreux domaines importants qui n'ont pas été abordés jusqu'ici ou n'ont été traités que partiellement, à moins que des travaux soient en cours à l'ANDRA et qui n'auraient pas encore été communiqués au public, ou dont nous n'aurions pas été informés dans le cadre de cette étude.

Nous voudrions en fait insister sur le fait que ce processus interactif de caractérisation et d'évaluation se poursuive jusqu'à l'étape de la demande d'autorisation pour la mise en place des déchets dans l'installation construite. La raison en est que le processus de construction lui-même peut révéler des propriétés de la roche hôte ou de l'EDZ qui n'étaient pas apparues jusque-là, à moins bien sûr, qu'une caractéristique du site interdisant tous les modèles conceptuels raisonnables ait été identifiée à une étape antérieure.

Pour tout programme d'investigation sur un site, des décisions sont prises, par phases successives, soit pour continuer sur le site avec le concept d'origine ou un concept modifié, soit pour abandonner le site et repartir à zéro. À mesure que le pétitionnaire poursuit son travail de recherche sur le site, les investissements liés au site augmentent significativement. L'importance des investissements tend à devenir un facteur dans les décisions de continuer à investir, dans la mesure où le désir de conserver un site augmente par rapport aux moyens matériels et aux avis d'experts qui ont été mobilisés pour la recherche sur l'aptitude du site à recevoir les déchets. Cette tendance risque d'être encore plus marquée si aucune caractérisation n'est effectuée sur un autre site à titre de comparaison.⁶ Une propension à « geler » une étude ou un modèle conceptuel lors de l'apparition de problèmes dans l'évaluation des performances pourrait avoir un effet négatif important dans la définition des phases ultérieures de la caractérisation d'un site dans un quelconque programme de site d'enfouissement. Une évaluation scientifique périodique, dont le mandat prévoirait la possibilité d'émettre un jugement scientifique sur les avantages techniques de la poursuite des recherches sur un site, pourrait réduire les risques d'échecs et, à l'inverse, le risque qu'un site inadapté soit choisi pour l'enfouissement du fait des moyens qui y ont été investis. Cette évaluation ne dispose pas d'un tel mandat. Ce dernier est beaucoup plus limité et se borne à l'évaluation du programme de recherche de l'ANDRA et à la recommandation des façons de le rendre plus complet et plus pertinent.

Des analyses d'incertitude et de sensibilité permettent d'identifier les données complémentaires requises dont le détail n'a pu être donné avant la phase de caractérisation du site en cours. Aussi, bien qu'un programme de caractérisation de site

⁶ Le retard présumé peut s'avérer un facteur aussi important ou plus important que le facteur des ressources dans la mesure où en l'absence d'une filière d'évacuation des déchets acceptée, des installations d'entreposage supplémentaires devraient peut-être être construites, avec les implications correspondantes au niveau du coût, de l'impact radiologique et de la sûreté radiologique. Néanmoins, reprendre depuis le départ n'est pas obligatoirement la voie qui entraîne les retards les plus importants si le site présente clairement des problèmes de sûreté. De ce fait, une méthode clairement établie visant à recommencer la procédure depuis le départ serait en réalité un atout pour le programme.

puisse être défini dans ses grandes lignes pour plusieurs années à l'avance, les détails de ce programme seront précisés après chaque itération de « gel de données » et chaque série d'analyses lui faisant suite. La durée de chaque itération dépendra, bien sûr, des résultats de l'évaluation des performances et l'analyse d'incertitude. Si, par exemple, une caractéristique nouvelle importante est ajoutée ou modifiée dans l'étude conceptuelle, un nouveau programme de recherche devra alors être défini pour cette caractéristique. Le couplage de cette caractéristique avec les autres éléments du système de confinement géologique doit également être traité. Pour poursuivre avec l'exemple actuel, l'introduction de barrières ouvragées plus robustes peut obliger à une réévaluation de l'ampleur et des caractéristiques de l'EDZ, de la recherche en champ proche, ainsi que d'autres éléments du système, comme les types de scellements et leur compatibilité avec les nouvelles barrières ouvragées (Chapitres 1, 2, 3, 4).

La présente analyse est principalement une évaluation de la procédure itérative décrite plus haut, à un moment particulier dans le temps. Notre point de référence temporel est le Dossier 2001 Argile et le Référentiel géologique. Nous avons toutefois noté l'existence d'informations plus récentes, aisément identifiables et disponibles, à un degré de précision suffisant pour nous permettre d'affiner notre analyse. Nous avons adopté cette approche dans la mesure où notre mandat ne fait pas partie du processus illustré à la Figure P-1 et décrit jusqu'ici, mais se situe dans l'esprit d'un audit scientifique du programme de recherche de l'ANDRA. Nous nous sommes efforcés de garder à l'esprit que certains des volets de recherche que nous recommandons à la suite d'une analyse du Dossier 2001 Argile et la documentation correspondante sont peut-être déjà en cours d'élaboration dans le cadre d'un second cycle d'itération de l'ANDRA.

Comme nous le remarquons plus haut, notre mandat porte avant tout sur la référence faite au programme de recherche de l'ANDRA dans l'ovale, dans lequel la recherche sur la caractérisation du site est définie et entreprise. Toutefois, les relations étroites qui existent entre les diverses activités décrites impliquent que certains commentaires soient apportés sur des questions relatives à la modélisation et à l'étude conceptuelle visant à l'évaluation des performances. De plus, la modélisation n'est pas seulement une activité d'évaluation des performances. Les modèles réalisés au niveau du processus sont au contraire utilisés directement pour interpréter des données de caractérisation du site, par exemple dans l'évaluation des propriétés hydrauliques résultant d'essais hydrauliques en fond de puits. En fait, la caractérisation du site et l'évaluation des performances nécessitent d'appliquer toutes sortes de modèles variables par la complexité de la représentation des processus, l'aspect dimensionnel et la résolution spatiale et temporelle. Lorsqu'on examine les besoins en données, il est important de prendre en compte les exigences de ces différents types de modèles, et la façon dont les résultats d'un niveau de modélisation peuvent servir de données d'entrée pour un autre niveau. Ainsi, par exemple, des analyses thermiques peuvent être effectuées en deux ou trois dimensions au niveau d'un emplacement (de colis) unique, d'un puits ou de l'ensemble de l'installation, et peuvent se rapporter à des essais de chauffage à court terme sur une période de quelques années, ou à l'évolution de la phase thermique sur l'installation de stockage dans son ensemble, à une échelle de temps de plusieurs millénaires.

La Figure P-1 est également une conceptualisation de la façon dont les différentes disciplines sont liées les unes avec les autres. Il est important de développer un modèle conceptuel multidisciplinaire du site parce que les différentes disciplines peuvent permettre de traiter différentes questions de sûreté générales de manières complémentaires. Par exemple, le régime hydrologique dans le Callovo-Oxfordien peut être évalué par référence à la géologie sédimentaire (c'est-à-dire à la présence ou l'absence de fractures), à l'hydrologie (c'est-à-dire la distribution verticale de la pression hydraulique, et à l'hydrochimie des eaux situées dans la formation. De la même manière que des barrières multiples sont importantes pour une analyse de sûreté cohérente, des approches multiples sont importantes pour concrétiser l'efficacité de chacune de ces barrières.

La durée importante de la période pendant laquelle la performance du système de confinement géologique doit être évaluée a généralement été considérée comme la difficulté majeure à surmonter. Elle doit être surmontée dans la caractérisation d'un site, et dans le couplage du programme de recherche aux autres éléments du processus visant à déterminer l'aptitude d'un site à accueillir des déchets radioactifs à longue durée de vie (notamment des combustibles usés). Ceci amène la caractérisation du site à comporter des volets importants sur la paléo-caractérisation (chapitres 1, 5 et 6). Ainsi, toute une palette de paléo-indicateurs, comme le pollen des carottes sédimentaires, des analyses isotopiques des spéléothèmes, et des phénomènes de sols gelés (par exemple des fentes de glace) peuvent être utilisés pour reconstituer l'historique du climat sur une longue période⁷.

Les données historiques et paléo données sont également utiles aux analyses de sismicité. Les enregistrements effectués par des instruments qui s'étendent sur une période de quelques décennies font généralement apparaître une sismicité assez faible, mais les données historiques permettent d'élargir le spectre des événements à des phénomènes plus importants et moins fréquents. De plus, des paléo-données peuvent être utilisées pour élargir encore la période couverte par ces données, un peu à la manière d'une reconstitution paléo-climatique. Toutefois, l'extension à des échelles de temps très importantes exige de vérifier si le régime de contraintes actuel est approprié. En particulier, sur des échelles de temps de 100 000 ans et plus, l'apparition puis le retrait des glaciers avec les réponses isostatiques correspondantes peuvent jouer un rôle dans la réactivation de failles ou la suppression du mouvement des failles pendant suffisamment longtemps pour que la relaxation finale des contraintes débouche sur des événements de plus grande ampleur. (Voir Chapitre 7.)

La projection des données historiques et paléologiques n'est malheureusement pas une simple question d'extrapolation, même en dehors des incertitudes sur les reconstitutions historiques et paléologiques. Le passé ne constitue pas un modèle suffisant pour l'avenir (même si sa reconstitution est nécessaire) du fait de deux facteurs essentiels particulièrement importants pour les sites d'enfouissement : l'intrusion humaine et les

⁷ L'utilisation de tels paléo-indicateurs fait l'objet d'une intéressante analyse figurant dans les résultats attendus de BIOCLIM, dont une grande partie des recherches a été réalisée par l'ANDRA (voir plus loin pour une analyse détaillée).

changements anthropiques modifiant l'environnement. Le changement climatique constitue un aspect important (mais pas le seul) des changements anthropiques qui doivent être pris en compte (Chapitre 1).

Ces considérations techniques doivent être intégrées en respectant certaines normes de sûreté et de radioprotection qui servent de critères globaux à la recherche. En France, les critères fondamentaux pour les recherches sur l'adéquation et la sûreté à long terme d'un site sont exposés dans la Règle III.2.f, faisant suite à la loi française de 1991 sur les déchets nucléaires. L'objectif de cette règle est le suivant :

Objet : Définition des objectifs à retenir dans les phases d'études et de travaux pour le stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde afin d'assurer la sûreté après la période d'exploitation du stockage.⁸

Il est clair que cette règle vise spécifiquement les études effectuées pendant la phase de recherche et le travail réalisé pendant la construction, de façon à garantir que ces aspects sont traités de façon à assurer la sûreté du stockage de longue durée. Il existe par exemple une recommandation de radioprotection de 0,25 mSv par an, qui sert de référence pour l'évaluation des performances. Le principal critère que nous avons retenu dans l'évaluation du programme de recherches de l'ANDRA consistait à déterminer si, une fois la recherche achevée, le programme global comme ses divers éléments permettra d'émettre des jugements scientifiques étayés sur le caractère approprié du site, en utilisant les critères mentionnés dans la Règle III.2.f comme référence principale. Le mandat de l'IEER n'est pas limité aux recherches que l'ANDRA pourrait achever d'ici 2005. En d'autres termes, le principe directeur de notre travail d'évaluation du programme de recherche de l'ANDRA consiste à savoir s'il répond au principal objectif de la Règle III.2.f. C'est pourquoi la Règle III.2.f joue un rôle crucial dans la manière dont une bonne partie de l'évaluation de l'IEER est structurée. Parallèlement, nous sommes pleinement conscients du fait que notre mandat pour cette étude ne prévoit *pas* de jugement sur l'adéquation du site d'une manière ou d'une autre.

Dans le cadre de la préparation de ce rapport, tous les membres de l'équipe de l'IEER ont visité le site de Bure, où ils ont participé à des discussions préliminaires avec des responsables de l'ANDRA. Nous avons étudié la littérature scientifique officielle dans la mesure de ce qui était possible dans le calendrier prévu. Nous avons également posé des questions à l'ANDRA (à travers le CLIS) sur des thèmes spécifiques, mais nous n'avons malheureusement pas reçu de réponses approfondies à ces questions. Nous n'avons pas pu non plus avoir de discussions avec des chercheurs de l'ANDRA sur des questions particulières en dehors des visites du site, malgré l'engagement de désigner des correspondants scientifiques pour de tels échanges, pris par l'ANDRA lorsque l'équipe a visité le site en juillet 2003. Sur certains points, nos conclusions ne sont pas aussi définitives qu'elles auraient pu l'être, ainsi que cela apparaîtra dans le détail de ce rapport. Nous croyons comprendre que l'ANDRA n'y était pas tenu dans le contrat établi

⁸ Règle No. III.2.f, 1991

entre l'IEER et le CLIS. Nous pensons cependant que l'ANDRA aurait pu donner suite à l'engagement pris à cet égard avec l'IEER en juillet 2003 .

Le rapport préliminaire a été envoyé pour relecture en octobre 2004. Il a été examiné par le Dr Mike Thorne, John Hudson, David Hodgkinson, André Berger et Monique Sené, à qui l'IEER a demandé à tous d'intervenir en tant que relecteurs indépendants. Les différents relecteurs ont été choisis en tant qu'experts également compétents sur un ou plusieurs aspects du programme de recherche de l'ANDRA. Le Dr Thorne a été invité à participer à la réunion de l'équipe de l'IEER à Takoma Park (Maryland) les 29 et 30 novembre derniers, lors de laquelle tous les commentaires ont été étudiés et une décision a été prise pour y répondre. Son rôle visait à renforcer l'objectivité du processus, de façon à ce qu'un expert ne faisant pas partie des auteurs puisse porter un jugement indépendant sur le fait que les différents commentaires ont bien été pris en compte et qu'une réponse appropriée leur est apportée. Nous avons également reçu des commentaires du CLIS, de l'ANDRA, de l'IRSN, de Jean Franville et d'Antoine Godinot. Certains de ces commentaires exprimaient un désaccord, d'autres un accord. Certains étaient globalement critiques, d'autres, notamment ceux de l'IRSN, étaient dans l'ensemble élogieux. Nous voulons remercier ici tous les relecteurs du temps et des efforts qu'ils ont consacrés à cette tâche. Les commentaires et suggestions nous ont aidé à améliorer le rapport. Naturellement, le contenu et toutes les conclusions et recommandations de ce rapport n'engagent que les auteurs.

Plusieurs relecteurs ont demandé un résumé et un chapitre de recommandations. L'IRSN nous a demandé d'établir une hiérarchie des recommandations. Le CLIS a suggéré que nous suivions la présentation des rapports de la CNE en présentant un résumé au début de chaque chapitre. Nous avons repris à notre compte ces suggestions. Il y a maintenant un chapitre de conclusions et de recommandations principales qui synthétise brièvement les conclusions et recommandations, des chapitres spécialisés. De plus, nous avons mis à la tête de chaque chapitre les conclusions et recommandations principales. Certains chapitres présentent aussi des conclusions et recommandations plus détaillées dans le texte.

Nous nous sommes attachés à examiner le fond de chaque relecture et nous avons discuté de la façon de répondre aux commentaires. Des modifications considérables ont par exemple été apportées au Chapitre 1 pour établir un lien plus clair avec le programme de recherche et clarifier l'utilisation que nous faisons de la Règle III.2.f. De la même manière, nous avons tenu compte d'informations récentes concernant des forages complémentaires, notamment des forages déviés, même si nous n'avons malheureusement pu disposer d'aucune des données pour l'évaluation.

L'équipe de l'IEER est sensible à la confiance que lui ont témoignée le CLIS et les populations de la région Meuse/Haute-Marne. Nous tenons à remercier le personnel du CLIS pour sa coopération, notamment Jérôme Sterpenich et Benoît Jacquet, et pour l'hospitalité et l'échange scientifique qui nous ont été réservés au bureau du CLIS de Bure. Leur assistance pour l'obtention de la documentation de l'ANDRA ainsi que des documents du CLIS nous a été d'une grande aide. Nous tenons également à remercier

l'ANDRA de son hospitalité lors des deux visites du site et des échanges que nous avons eus à cette occasion, ainsi que pour les documents qu'elle nous a procurés. Nous tenons également à remercier André Mourot pour les deux visites guidées de la région. Le Bureau du CLIS a veillé à faciliter le processus, et l'équipe de l'IEER tient à exprimer ses remerciements sincères pour le délai supplémentaire de trois mois qui lui a été accordé pour achever ce projet. Nous remercions aussi l'ANDRA et le CLIS de l'hospitalité qui nous a été offerte lors de nos visites à Bar-le-Duc et sur le site, notamment les spécialités culinaires présentées dans la meilleure tradition française. Nous avons été très intéressés par les discussions auxquelles nous avons pu participer au CLIS en juillet 2003 et avec le personnel de l'ANDRA lors de notre visite sur le site. Enfin, nous remercions l'ANDRA de nous avoir fourni un grand nombre des documents dont nous avons besoin pour cette évaluation.

Detlef Appel, Ph.D.
 Jaak Daeman, Ph.D.
 George Danko, Ph.D.
 Yuri Dublyanski, Ph.D.
 Rod Ewing, Ph.D.
 Gerhard Jentzsch, Ph.D.
 Horst Letz, Ph.D.
 Arjun Makhijani, Ph.D., Directeur du projet
 24 décembre 2004

Preface References

- Andersson 2004 Andersson, J, Munier, R, Strom, A, Soderback, B, Almen, K-E and Olsson, L, 2004, When is there sufficient information from the Site Investigations?, SKB R-04-23, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- IAEA
 BIOMASS 6
 2003 IAEA. *"Reference Biospheres" for solid radioactive waste disposal: Report of BIOMASS Theme 1 of the BIOSphere Modelling and ASSEssment (BIOMASS) Programme*. Part of the IAEA Co-ordinated Research Project on Biosphere Modelling and Assessment (BIOMASS). IAEA-BIOMASS-6. International Atomic Energy Agency, July 2003.
- NAS-NRC 2003 National Research Council. Committee on Principles and Operational Strategies for Staged Repository Systems. *One Step at a Time: The Staged Development of Geologic Repositories for High-Level Radioactive Waste*. Committee on Principles and Operational Strategies for Staged Repository Systems, Board on Radioactive Waste Management, Division on Earth and Life Studies, National Research Council. Washington, DC: National Academy Press, 2003.
- SKB 2004a SKB, 2004, Preliminary Site Description Forsmark Area - Version 1.1, SKB R-04-15, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB 2004b SKB 2004, Preliminary Site Description Simpevarp Area - Version 1.1, SKB R-04-25, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

Conclusions Principales et Recommandations

En France, 80 pour cent de l'électricité est d'origine nucléaire. Elle est produite dans un parc de 58 réacteurs. Le combustible utilisé sorti de ces réacteurs, est retraité pour partie à l'usine de COGEMA-La Hague. Ce retraitement partiel conduit à des déchets de haute activité, conditionnés dans une matrice de verre et à des déchets de moyenne activité, contenant en quantité significative des émetteurs à vie longue dit déchets B. La partie non retraitée comprend le reste des combustibles UOX et tous les combustibles MOX.

L'évacuation du combustible usé et des déchets hautement radioactifs dans un centre de stockage géologique profond est généralement considérée comme un aspect central de la gestion à long terme de ces matières. Cet aspect de la gestion à long terme est pris en compte dans l'Axe 2 de la loi française sur les déchets nucléaires. En application de cette loi, l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), l'organisme responsable de la recherche d'un site pour le confinement géologique, a procédé à des investigations sur un site d'argilite dans la région de Meuse/Haute-Marne.

Le principal critère que nous avons retenu dans l'évaluation du programme de recherches de l'ANDRA a consisté à déterminer si le programme global, comme ses divers éléments, permettra d'émettre des jugements scientifiques valides sur l'aptitude du site au confinement géologique de déchets radioactifs à longue durée de vie et de combustibles usés. La présente étude s'est servie des données détaillées précisées dans la Règle III.2.f comme principaux critères pour l'évaluation de la recherche, parce que ceux-ci définissent les objectifs de recherche qui doivent être obtenus pour la sûreté du stockage de longue durée, notamment les critères de radioprotection recommandant de limiter les doses à moins de 0,25 mSv par an.

Nous avons formulé de nombreuses recommandations, qui font l'hypothèse que la recherche se poursuivra sur de nombreuses années. Ceci ne doit pas être interprété comme une approbation de la poursuite des travaux dans le cadre du bilan qui doit être entrepris en France en 2006. Notre mandat porte sur ce qui devrait se passer si la décision de continuer les travaux est prise. En réalité, l'une de nos principales conclusions est que la poursuite de la recherche ne doit *pas* préjuger de la faisabilité de la construction d'un centre de stockage géologique à Bure, parce qu'un tel jugement est très prématuré.

Principales conclusions générales

Le programme de l'ANDRA utilise des techniques de pointe dans quelques domaines, il est satisfaisant dans d'autres. Et même, dans quelques cas, il est insuffisant voire absent. Certaines conclusions globales se sont dégagées de notre évaluation détaillée. Ici, nous présentons ces conclusions et certaines des recommandations qui en découlent.

1. Dans plusieurs domaines précis, comme la caractérisation du terme source, la mécanique des roches ou la recherche générale sur le changement climatique (le

programme BIOCLIM), le programme de recherche de l'ANDRA, tel qu'il est effectué ou envisagé, fait appel à des techniques de pointe.

2. Il existe des structures institutionnelles qui assurent la supervision scientifique du travail de l'ANDRA. C'est une garantie importante. Le fait que le CLIS, organe constitué dans le cadre de la loi française sur les déchets nucléaires, dispose de la possibilité de commander un rapport d'évaluation indépendant, assure un niveau de surveillance complémentaire. De fait, comme cette évaluation a été mise en œuvre en dehors du cadre d'un organisme constitué par l'ANDRA ou le gouvernement français, elle peut être considérée comme présentant un niveau de surveillance indépendante inhabituel dans le cas des programmes de sites d'enfouissement.

3. Le programme de recherche de l'ANDRA n'est pas suffisamment transparent pour permettre d'émettre des avis indépendants sur de nombreux aspects de ce programme dans les délais impartis.

4. Bien que les évaluations préliminaires de l'ANDRA figurant dans le Dossier 2001 Argile faites avec un faible coefficient de diffusion fassent apparaître un respect de la recommandation de limite de dose, ce n'est pas le cas pour le scénario « altéré ». Plus précisément, le scénario faisant intervenir une défaillance des scellements indique une dépendance excessive par rapport à un seul élément du système de confinement. Ceci montre que l'ANDRA doit accorder plus d'attention à l'aspect terme source de son programme en tant qu'élément de son modèle conceptuel. Dans l'ensemble, l'évaluation de la performance, dès les premières étapes de l'estimation méthodologique, doit être suffisamment solide parce qu'elle dépend, certes de multiples barrières mais aussi de multiples raisonnements.

5. L'ANDRA doit encore effectuer une quantité considérable de travaux de recherche essentiels sur la roche hôte du site dans un certain nombre de secteurs. Dans certains secteurs, l'ANDRA n'a pas même formulé de programme détaillé, par exemple en ce qui concerne certains aspects de la recherche in situ dans le laboratoire souterrain.

6. Une évaluation de performance scientifiquement valide visant à déterminer la faisabilité de la construction d'un site de stockage avec confinement géologique sur le site de Bure n'est pas possible en l'état actuel des recherches. De nombreux éléments déterminants du programme de recherche sont incomplets sur des aspects essentiels, ou n'ont pas même été entrepris. Par exemple, avant qu'un tel avis puisse être considéré comme scientifiquement valide, l'ANDRA aura à traiter des aspects comme :

- Recherche sur les scellements à l'intérieur de la roche hôte après une caractérisation in situ de cette roche ;
- Caractérisation des petits réseaux fracturés et des plans de stratification qui pourraient être importants pour la création d'une évaluation réaliste de l'EDZ ;
- Production de gaz en relation avec les fractures.

Par ailleurs, de nombreuses composantes de la recherche sur la mécanique des roches et la charge thermique sont insuffisantes ou absentes (voir conclusions et recommandations pour les chapitres 2 et 3). Il s'agit là d'un problème crucial du programme de recherche de l'ANDRA, étant donné le rôle central que l'EDZ ou la réparation de l'EDZ doit jouer dans l'évaluation de la performance. Pour réduire les incertitudes sur la performance, il faudrait beaucoup plus de recherches dans ces domaines et, à certains égards, les aspects détaillés de cette recherche devraient prendre des formes différentes de celles qui sont actuellement prévues par l'ANDRA (par exemple dans le domaine des scellements). Beaucoup de travail reste à faire sur le couplage de divers éléments détaillés, par exemple dans le couplage des fractures induites par l'EDZ avec les fractures naturelles, et dans celui du terme source avec la géochimie en champ proche.

Principales recommandations globales

1. La supervision scientifique indépendante du programme de l'ANDRA doit être poursuivie dans le cas où le Parlement français déciderait de poursuivre les recherches au-delà de 2006.
2. L'ANDRA doit mettre sur son site Internet tous les documents relatifs au programme de recherche en cours (évaluation des performances, données brutes sur la carothèque, données sismiques utilisées pour caractériser le site, données de forage), aussitôt que ces données sont validées pour une utilisation en interne. Les modèles doivent être accessibles au public, accompagnés de l'ensemble des hypothèses sur les paramètres et les incertitudes, de façon à pouvoir effectuer plus facilement et plus efficacement un travail d'évaluation indépendante. Les résultats détaillés et actualisés sur les projets, le calendrier, la recherche, la modélisation et l'évaluation des performances doivent également être facilement accessibles au public.
3. Étant donné les incertitudes relatives à l'évolution de l'EDZ et à ses performances, un modèle conceptuel qui suppose une réduction du terme source, par exemple, en reprenant la conception des emballages de déchets (et/ou par d'autres moyens) doit être élaboré, et un programme de recherche doit être créé sur cette base. Un programme de reprise de la conception des emballages pourrait comporter des investigations sur des emballages plus durables, des caractéristiques thermiques différentes pour le centre de stockage et une géochimie en champ proche différente. L'ANDRA ne dispose pas d'un tel programme pour le moment.
4. L'ANDRA doit mettre en œuvre un programme détaillé de recherche souterraine dans le laboratoire souterrain prévu au niveau de la roche hôte. Elle doit élaborer et présenter en détail un programme de recherche dans les domaines où aucun n'existe actuellement. Plusieurs aspects d'un tel programme de recherche souterrain, par exemple pour la poursuite d'essais avec des éléments chauffants et les tests in situ sur les interactions entre emballages de déchets et roche hôte prendront un temps considérable.

5. L'ANDRA devrait élaborer une stratégie pour traiter des incertitudes dans chaque domaine spécifique et dans l'ensemble de son programme de recherche et de son évaluation de la performance.