



**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.

Coordnatrice 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.....	21
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 humaine	37
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 utilisé	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 utilisé	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.....	226
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 References.....	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 6¹ 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.

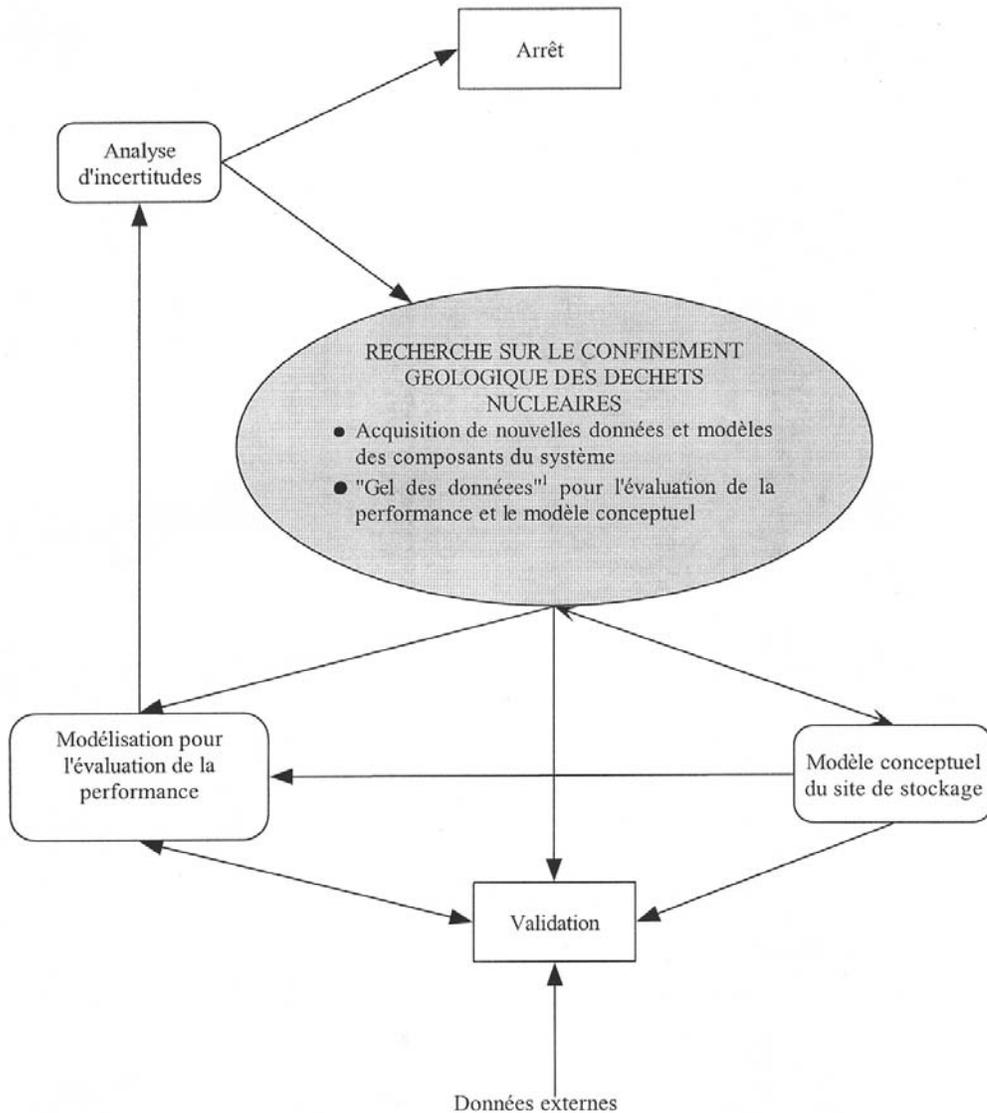


Figure P-1.

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. A 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. <i>"Reference Biospheres" for solid radioactive waste disposal: Report of BIOMASS Theme 1 of the BIOSphere Modelling and ASSEssment (BIOMASS) Programme.</i> 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. <i>One Step at a Time: The Staged Development of Geologic Repositories for High-Level Radioactive Waste.</i> 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.

Chapitre 1 : Implications de la recherche sur les normes de la dose, l'évaluation de la performance des scénarios et les facteurs externes⁹

Arjun Makhijani

Conclusions principales

Le choix par l'ANDRA du groupe critique pour son évaluation de la performance du site qui maintiendrait la dose en dessous de 0,25 mSV/an n'est pas l'option nécessairement la plus conservatrice.

Le choix par l'ANDRA de l'exutoire Marne-Rognon comme point d'évaluation de la performance n'est pas nécessairement conservateur. Le choix d'un puits utilisé par une famille d'agriculteurs en autarcie, situé entre l'emprise du stockage et l'exutoire Marne-Rognon, pourrait s'avérer un choix plus prudent. Malgré l'affirmation par l'ANDRA dans le Dossier 2001 Argile que son évaluation de performance préliminaire s'appuie sur des hypothèses conservatrices, il apparaît des éléments non conservateurs dans l'évaluation de performance préliminaire de l'ANDRA. Par exemple, la production de gaz n'est pas intégrée. En outre, les calculs d'évaluation préliminaires de l'ANDRA effectués à des fins de démonstration de la méthodologie font apparaître l'éventualité d'une dépendance excessive de la performance par rapport à un élément unique, les scellements. S'il s'avère nécessaire d'ajouter des éléments au système de confinement, comme des conteneurs de déchets plus durables, ceci pourrait considérablement alourdir le programme de recherche.

L'ANDRA a réalisé une recherche utile des ressources géothermiques dans la zone du site Meuse/Haute-Marne et l'a ajoutée aux bases de données existantes. L'ANDRA n'a pas encore élaboré de programme de recherche destiné à réduire simultanément le risque d'une intrusion humaine accidentelle et celui de l'intrusion humaine délibérée. Ce problème n'est bien sûr pas propre à l'ANDRA. Il représente un aspect particulièrement difficile du confinement géologique. Il s'agit néanmoins d'une question qui doit être traitée.

L'ANDRA a participé à un programme de recherche, reflétant l'état des connaissances, sur le développement de méthodes d'évaluation de l'impact du changement climatique sur le confinement géologique (BIOCLIM). Malgré l'intégration des dernières connaissances en ce domaine, les travaux sont loin d'être parvenus à un point où des estimations régionales fiables peuvent être faites pour être utilisées pour une évaluation de performance et donc pour les implications des changements climatiques sur le programme de recherche, le modèle conceptuel et l'étude conceptuelle du système de confinement géologique sur le site de Meuse/Haute-Marne. Ce problème n'est bien sûr

⁹ Certaines questions, initialement proposées pour le chapitre 1, notamment les principes globaux d'une recherche sur un site de stockage, sont maintenant traitées dans la préface.

pas propre à l'ANDRA. Toutefois, l'emplacement du site renforce l'importance d'une étude des effets des changements brutaux de la circulation thermohaline sur l'évaluation de la performance, le modèle conceptuel et l'étude conceptuelle. De nombreuses recherches sur le climat seront nécessaires avant qu'une approche fiable puisse être élaborée pour une application réelle à l'évaluation du site.

Recommandations principales

1. Hypothèse concernant l'emplacement du prélèvement de l'eau L'ANDRA devrait orienter ses recherches de manière à être capable de procéder à une évaluation de performance à partir des eaux souterraines prélevées entre la limite de l'emprise du stockage et l'exutoire Marne-Rognon.

2. Clarification du scénario du fermier vivant en autarcie ANDRA devrait adopter le scénario du fermier vivant en autarcie et clarifier son intention d'utiliser une famille d'agriculteurs vivant en autarcie, y compris femme et enfants, pour ses évaluations de performances relatives à la limite de dose de 0,25 mSv. Si un autre scénario s'avérait plus conservateur du point de vue du respect des critères de dose, il peut être adopté, en prenant toutefois la précaution que des femmes et des enfants figurent dans le groupe critique.

3. Redondance Il existe des éléments non conservateurs dans l'évaluation préliminaire de performance de l'ANDRA. Les doses élevées estimées en cas de défaillance des scellements et de haut gradient hydraulique soulignent la nécessité pour l'ANDRA d'envisager des modèles conceptuels alternatifs et éventuellement d'inclure des conteneurs de déchets qui sont beaucoup plus durables que ceux actuellement prévus. Plus précisément, il serait souhaitable qu'un programme de recherche analyse la façon dont la fiabilité des évaluations de dose serait affectée si les conteneurs choisis étaient comparables à ceux du programme suédois (un million d'années) et le type de programme de recherche sur les colis de déchets qui devrait être mis en œuvre si l'option suédoise apparaissait souhaitable ou nécessaire. La recherche sur la façon dont les colis de déchets pourraient réduire l'impact des incertitudes d'importants changements climatiques sur la performance serait aussi souhaitable.

4. Recherches sur les ressources géothermiques L'ANDRA devrait effectuer des recherches plus intenses pour définir les ressources géothermiques pour pouvoir arriver à des conclusions plus définitives sur le potentiel de son utilisation dans la région et ses implications en termes d'intrusion humaine.

5. Marquages L'ANDRA devrait étudier la question des marquages et le conflit qu'ils pourraient éventuellement susciter entre intrusion humaine accidentelle et intrusion humaine délibérée. Cette étude devrait présenter une étude détaillée des alternatives aux marquages de surface.

6. Taille de l'emprise du stockage L'ANDRA devrait traiter les questions relatives à la taille de l'emprise du stockage. Elle devrait étudier l'adéquation du concept de stockage qu'elle prévoit à la fois dans le contexte du scénario de base et dans un contexte de risque d'intrusion humaine délibérée. Etant donné que l'exploration de surface des minéraux est déjà bien avancée, l'ANDRA devrait procéder à des recherches pour comparer les avantages et les inconvénients respectifs d'une vaste emprise horizontale, qui permettrait d'atteindre des températures plus faibles et d'une emprise plus restreinte qui pourrait réduire le risque d'intrusion humaine (à la fois accidentelle et volontaire, mais pas obligatoirement pour l'intrusion volontaire si l'intensité des anomalies thermiques et géomagnétiques est augmentée).

7. Recherches paléo-climatiques Nous recommandons que l'ANDRA complète sa recherche paléo-climatique au sein de BIOCLIM par un programme de recherche paléo-environnemental (portant sur la paléo-climatologie et la paléo-hydrologie) effectué à partir de spéléothèmes provenant de la région est du Bassin parisien, avec les méthodes les plus récentes.

8. Recherches sur le changement climatique spécifiques au site Dans la publication de la prochaine étape de son programme sur le changement climatique en 2005, l'ANDRA devrait intégrer un plan de recherches détaillé qui préciserait comment le travail effectué au sein de BIOCLIM sera développé pour fournir des estimations de paramètres climatiques spécifiques à la région et qui seront suffisamment fiables pour permettre une évaluation de performance avec des incertitudes évaluées sur une période allant jusqu'à 10 000 ans et avec des paramètres dont le caractère conservateur est démontré pour la période ultérieure. Un besoin de recherche tout particulier est nécessaire pour l'élaboration de l'impact régional des changements de la CTH induits par des phénomènes naturels et anthropiques.

1.1 Introduction

La gestion des déchets radioactifs à haute activité contenant des radionucléides à vie longue (les déchets de classe B et de classe C au sens de la réglementation française et le combustible usé) représente un immense défi à la fois conceptuel, scientifique, technique et social. Pour ce qui est de l'enfouissement en couche géologique profonde (« stockage » ou « stockage définitif »), il s'agit de la méthode de gestion à long terme la plus étudiée dans de nombreux pays. Les recherches lancées répondent à l'Axe 2 de la loi française de 1991 sur les déchets nucléaires.

Le concept de base consiste à mettre les déchets à haute activité et à vie longue et le combustible usé dans des conteneurs entourés par d'autres barrières ouvragées et les stocker en site géologique profond. L'ensemble formé par les colis de déchets, les barrières ouvragées et la roche géologique hôte est généralement qualifié de « système de confinement géologique » pour souligner le fait que les divers éléments du système doivent intervenir ensemble pour assurer l'objectif d'isoler les matériaux radioactifs de la biosphère. Nous avons déjà examiné dans la Préface le rôle de la recherche sur le

confinement géologique (et donc de son évaluation) dans ce dispositif global, de façon à offrir un contexte à la totalité du rapport, notamment pour ce chapitre.

L'objectif scientifique du programme de recherche et d'évaluation de la performance doit être capable d'aboutir à un jugement fiable sur la performance attendue du système. Il est nécessairement lié à des normes et des recommandations en matière de santé et d'environnement. Le principal critère pour l'évaluation du programme de recherche de l'ANDRA porte sur sa capacité à remplir cet objectif. Ainsi que nous l'avons évoqué dans la préface, ceci se fait dans le respect de l'objectif de la Règle III.2.f. L'évaluation technique détaillée des différents aspects du programme de recherche de l'ANDRA sont abordés dans les chapitres qui suivent. Les rapports spécifiques entre ce programme de recherche et les lignes directrices de la Règle III.2.f sont traités dans ces chapitres.

La première exigence en matière de caractérisation d'un site demande que la recherche soit suffisamment exhaustive pour pouvoir émettre des jugements raisonnablement sûrs sur l'impact du site de stockage sur la santé et l'environnement. La dose maximale pour l'évaluation de la performance est de 0,25 mSv par an pour une exposition prolongée, en préconisant par ailleurs que les doses soient maintenues, autant que raisonnablement possible, à un niveau inférieur à cette limite. Ces limites de doses doivent être obtenues dans l'hypothèse d'une absence de tout contrôle institutionnel. Par conséquent, il est essentiel que la caractérisation du site soit suffisamment rigoureuse pour maintenir les incertitudes à un faible niveau sur de très longues périodes de temps. Pour l'évaluation des incertitudes dans ce chapitre nous utiliserons la sélection de l'évaluation de performance faite par l'ANDRA dans le Dossier 2001 Argile.

La caractérisation du site même ne doit laisser la place qu'à de faibles incertitudes, notamment si certains résultats obtenus de l'évaluation de la performance indiquent que la limite de dose pourrait être dépassée. Ceci signifie, par exemple, que l'historique géologique, sismique et géochimique du site doit pouvoir être déterminée avec un degré de confiance acceptable par rapport aux normes de sûreté.

L'ampleur des incertitudes dans les estimations de doses sur de très longues périodes de temps dépend avant tout des incertitudes liées aux paramètres géologiques, aux aspects se rapportant aux barrières ouvragées, au climat et à une potentielle intrusion humaine. Ces facteurs, abordés dans la préface, sont reliés entre eux. Dans ce chapitre nous traiterons des questions sur:

- Les implications pour la recherche d'incertitudes se rapportant au respect de la norme de 0,25 mSv/an.
- La recherche sur les facteurs externes « déclenchants » pouvant affecter significativement l'évaluation de la performance.

Les facteurs externes « déclenchants » que nous considérons sont l'intrusion humaine et le changement climatique. Ces facteurs pourraient bien être les plus imprévisibles. Il est impératif de bien les comprendre puisqu'ils servent à définir le cadre d'une recherche rigoureuse pour les divers aspects du confinement géologique comme par exemple les

choix des colis de déchets. Par exemple, la limite annuelle de dose pour le public, provenant de toutes les sources radioactives artificielles (autres que les sources médicales) est de 1 mSv. La dose limite pour le site de stockage représente le quart de celle-ci. La caractérisation des paramètres géologiques doit donc être de nature à maintenir les incertitudes largement au-dessous d'un facteur 4. Cette marge est d'autant plus réduite que les incertitudes liées au changement de climat sont grandes. La réduction des incertitudes des effets du changement climatique sur la performance pourrait conduire à des changements dans le modèle conceptuel et par conséquent dans le programme de recherche, par exemple pour ce qui concerne les colis de déchets.

1.2 Aspects relatifs à la sûreté, à la santé et à l'environnement

La réglementation établissant les objectifs à retenir dans les phases de conception et création d'un site d'enfouissement en formation géologique profonde pour les déchets radioactifs à haute activité a été adoptée le 30 juin 1991 (Règle N° III.2.f).¹⁰ Les principales caractéristiques qu'elle prévoit pour un programme de recherche sur le système de confinement et l'évaluation de sa performance sont les suivantes :

- Il est nécessaire de procéder à une évaluation claire et précise de l'évolution dans le temps de la performance des barrières ouvragées, basée sur les modèles hydrogéologiques et le transport des radionucléides dans l'environnement souterrain.
- La caractérisation doit démontrer la stabilité de la barrière géologique (en fonction d'un critère de dose effective individuelle maximale de 0,25 mSv/an¹¹) pendant au moins 10 000 ans "notamment sur la base d'études d'incertitudes *explicites*." (C'est nous qui soulignons)
- Au-delà de 10 000 ans, la limite de dose est maintenue. Par conséquent, le principe selon lequel le pic de dose ne doit pas dépasser la limite de dose (0,25 mSv/an) est implicitement maintenu. L'obligation d'une spécification quantitative des incertitudes est abandonnée pour la période au-delà de 10 000 ans et remplacée par une obligation d'estimation majorante de dose.
- L'occurrence des événements naturels qui pourraient perturber le site d'enfouissement doit être prise en compte sur la base d'une estimation pour une période de 100 000 ans, et au-delà, sur une base aléatoire.
- L'intrusion humaine accidentelle doit être prise en compte et prévenue grâce à la mémoire institutionnelle pendant au moins 500 années. Au-delà, ses conséquences pour différents scénarios, notamment pour les ressources en eau, doivent être étudiées.
- Les mesures de prévention contre l'intrusion humaine pour accéder aux ressources géothermiques ne sont pas prises en considération « parce que les

¹⁰ La Règle ne mentionne pas spécifiquement le combustible utilisé. Dans ce rapport, nous supposons qu'elle peut être interprétée comme couvrant cette situation. L'ANDRA a inclus le combustible utilisé dans son évaluation préliminaire de performance.

¹¹ Bien que la Règle parle d'équivalent de dose, il semble clair à partir du contexte qu'il s'agit de la dose efficace.

sites retenus ne devront pas présenter d'intérêt particulier de ce point de vue. » (Annexe 2, paragraphe 3.1.5 de la Règle III.2.f)

- L'intrusion humaine (malveillante) délibérée n'est pas abordée en détail dans la Règle III.2.f, bien qu'il en soit fait brièvement mention dans le rapport numéro 6 de la Commission nationale d'évaluation (CNE).
- Le changement climatique doit être pris en considération dans les évaluations de la performance.

La Règle III.2.f constitue un guide pour la caractérisation plutôt que pour la procédure d'autorisation, et ne peut donc être directement comparée aux critères de dose réglementaires. Toutefois, la norme de 0,25 mSv par an qui y est spécifiée est plus ou moins comparable aux normes actuelles de radioprotection dans d'autres pays. Par exemple, la norme américaine d'exposition aux rayonnements est plus stricte (0,15 mSv par an) mais la durée est limitée à 10 000 ans. La limite de durée a toutefois été considérée comme nulle par une cour fédérale.¹² Comme nous le notions plus haut, la Règle III.2.f n'indique pas de limite de durée dans sa recommandation de dose et est donc plus stricte de ce point de vue. La norme américaine contient également une disposition exigeant le respect de la réglementation sur l'eau potable (Safe Drinking Water regulations) à l'extérieur de la zone actuellement sous contrôle du gouvernement fédéral. La Règle III.2.f ne comporte pas de règle comparable. En Suisse, la limite de dose est de 0,1 mSv par an. La limite allemande est de 0,3 mSv par an.¹³ Les aspects particuliers des programmes de recherche nécessaires pour déterminer si les normes peuvent être respectées seront, bien sûr, différents pour chaque site, mais les principaux domaines de recherche, notamment ceux qui servent à réduire les incertitudes sur les estimations qui portent de longues périodes de temps, sont généralement les mêmes.

1.3 Relations entre recherche et respect des limites de dose

Un programme de recherche sur un site de stockage géologique doit être conçu de façon à pouvoir juger, de manière scientifique et crédible, si le système de confinement sera conforme à la limite fondamentale pour la dose¹⁴ de rayonnement. Ces jugements comporteront des conclusions relatives aux incertitudes sur les estimations de dose ou bien apporteront la démonstration que les paramètres choisis sont pessimistes et par conséquent conduisent à des estimations de dose majorantes.

Selon la Règle III.2.f., les estimations de dose pour des périodes inférieures à 10 000 ans doivent comporter une évaluation quantitative des incertitudes. Pour la période au-delà de 10 000 ans, des estimations conservatrices (« estimations quantifiées majorantes »¹⁵)

¹² US Court 2004. L'Académie nationale des sciences américaine recommande que la réglementation soit basée sur le pic de la dose. NAS-NRC 1995

¹³ Il faut noter qu'il s'agit de valeurs limites ou cibles pour une installation distincte. Il est donc préférable dans ce cas de les définir comme des contraintes plutôt que comme des limites.

¹⁴ Ici « dose » signifie « dose efficace annuelle », sauf indication contraire.

¹⁵ Règle N° III.2.f, para 3.2.1

doivent être réalisées pour tenir compte de l'augmentation des incertitudes dans l'évolution des barrières ouvragées et de la géologie. La section 3.1 de la Règle III.2.f indique également que les doses doivent être maintenues à un niveau aussi bas que raisonnablement possible (principe ALARA) à la fois en période d'exploitation et après la fermeture. Le principe ALARA doit être pris en considération dans l'estimation de tous les aspects de la performance du site de stockage.

L'ANDRA utilisera les données recueillies sur le site ainsi que d'autres informations pour alimenter les modèles qui serviront à estimer le terme source et la contamination de la biosphère pouvant résulter de la dégradation estimée des barrières ouvragées et du transport des radionucléides dans l'eau dans la roche hôte et les autres niveaux de la géosphère. Afin de mener à bien cette tâche, il est nécessaire de préciser quelles seront les personnes susceptibles d'être les plus exposées et comment elles pourraient faire usage de l'eau contaminée à la suite de la perte d'étanchéité des colis de déchets radioactifs stockés sur le site. Il est aussi nécessaire de procéder aux recherches pour déterminer les fourchettes des paramètres qui aboutissent à des estimations fiables du terme source dans le temps et du transport des radionucléides jusqu'à l'environnement humain. Nous abordons la question des personnes les plus exposées dans la mesure où elle affecte l'objectif du programme de recherche dans ce chapitre. La pertinence de ce problème dans cette phase de la recherche est évidente et elle a été étudiée à la fois par la CNE et par l'Andra. (Voir plus bas)

1.3.1 Recherche sur les scénarios d'exposition et le système de confinement

La précision avec laquelle des paramètres doivent être déterminés et délimités dépend pour une large part du choix des scénarios relatifs aux populations à protéger à l'avenir (souvent appelées « groupe critique »). Si le groupe critique est choisi à partir d'une population, pour laquelle on envisage une utilisation limitée de l'eau, notamment des eaux souterraines, des environs du site de stockage pour l'irrigation et la boisson, c'est à dire, si le groupe critique choisi n'est pas le plus exposé, alors de grandes incertitudes dans des paramètres du système de confinement tels que la performance des barrières ouvragées ou les coefficients de diffusion, peuvent paraître acceptables. Ceci provient du fait que même un terme source important qui entraîne une contamination locale des eaux ne débouche pas obligatoirement sur des doses élevées pour le groupe critique choisi, même avec des choix conservateurs pour les paramètres du système de confinement géologique. La démonstration du respect des normes peut alors être effectuée avec beaucoup moins d'efforts et de rigueur.

Une recherche bien plus importante est généralement nécessaire si le groupe critique est une famille de cultivateurs qui se servira des ressources en eaux souterraines disponibles localement pour la boisson et l'irrigation, particulièrement dans le cas du site de Meuse/Haute-Marne où les calculs d'évaluation préliminaire n'indiquent pas systématiquement des doses très inférieures à la limite. Ce problème devient encore plus complexe si le changement climatique est pris en compte, étant donné en particulier que les incertitudes relatives aux effets des facteurs anthropiques du changement climatique

se superposent aux facteurs naturels. Il est donc essentiel d'avoir une claire spécification des scénarios d'exposition, non seulement pour démontrer le respect de la réglementation mais aussi pour le programme de recherche qui sous-tend la totalité de la procédure d'estimation à partir duquel se fait l'évaluation de la performance. Par exemple, en se concentrant sur le scénario du fermier vivant en autarcie, on insistera sur le niveau du transfert des radionucléides depuis les eaux souterraines vers les sols, les plantes et les animaux, dans un contexte agricole mixte faisant intervenir des pratiques de grandes cultures et d'élevage. Inversement, en privilégiant des populations industrielles on attachera probablement plus d'importance aux études sur la façon dont le régime d'écoulement des eaux souterraines et les voies de transfert des radionucléides pourraient être modifiées par un pompage depuis les aquifères à un rythme soutenable.

Un scénario de « fermier vivant en autarcie » a généralement été considéré comme une base raisonnable pour un programme de recherche dans la mesure où les hypothèses sur la structure sociale future ou le mode de vie peuvent être largement éliminées.¹⁶ La CNE, par exemple, a également approuvé l'approche du fermier vivant en autarcie dans son rapport n° 3. Un choix de groupe critique fait partie de la RFS III.2.f

« La biosphère est éminemment variable et incertaine dans le temps et l'espace et n'est pas globalement contrôlable, c'est pourquoi on est conduit à une biosphère type selon les climats. Dans cette biosphère, il faut ensuite choisir la taille du groupe hypothétique le plus exposé, liée à la disponibilité en eau et son autarcie vis-à-vis de l'alimentation. »¹⁷

La section I.4.4.1 du Dossier 2001 Argile indique que l'ANDRA aurait recours au scénario du fermier vivant en autarcie :

« Un modèle représentatif de la biosphère actuelle de la région du site Meuse/Haute-Marne a été développé. Ce modèle considère l'usage de l'eau d'un puits pour l'irrigation de cultures (céréales) et d'un jardin potager (légumes racines, légumes feuilles), l'abreuvement des animaux et la boisson...L'alimentation des animaux et l'abreuvement sont les sources de contamination des animaux. Les modes d'exposition de l'homme sont liés à l'ingestion d'eau et d'aliments contaminés, à l'inhalation de poussières remises en suspension lors des travaux agricoles et à l'exposition externe à la radioactivité présente dans les sols. Les principaux processus qui pilotent les transferts dans cette biosphère « agricole » du site Meuse/Haute-Marne ont été identifiés et certaines voies de transfert, jugées moins importantes, ont été simplifiées.»¹⁸

Cette spécification est celle d'un scénario de fermier vivant en autarcie. Toutefois, il semble que l'ANDRA laisse ouverte la possibilité d'utiliser d'autres scénarios, dans la

¹⁶ Gopal and Makhijani 2001, Pigford 1997, Pigford 1995.

¹⁷ CNE 1997, p. 90.

¹⁸ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.B, p. 104

mesure où elle fait référence à « une évolution possible du système actuel vers des systèmes plus industrialisés. »

«Il conviendra tout d'abord de vérifier que toutes les pratiques locales ont été bien prises en compte dans le modèle. Le développement de la biosphère a été effectué pour prendre en compte des activités agricoles qui mettent en jeu de nombreuses voies de transfert et qui sont donc supposées conduire à l'impact le plus élevé. Cependant, il conviendra de tenir compte dans l'évaluation de l'impact d'une évolution possible du système actuel vers des systèmes plus industrialisés. Par ailleurs, le développement à long terme de voies de transfert plus spécifiques d'un environnement plus urbanisé devra être étudié. De même, la contamination qui résulterait de l'usage de sources ou de cours d'eau plutôt que d'un puits sera examinée.»¹⁹

Cette analyse ne précise pas que le scénario le plus conservateur sera utilisé. Des scénarios n'utilisant pas l'eau de puits retirée du point aval le plus proche du site de stockage dans le sens de l'écoulement, risquent de ne pas être conservateurs. Il est nécessaire d'être très circonspect en regard des scénarios basés sur des populations urbaines ou une agriculture ou une économie plus industrialisée.

Il est à noter que la Règle Fondamentale de Sécurité exige un choix conservateur du groupe critique :

« Par ailleurs, pour la modélisation de la biosphère, on retiendra des groupes critiques hypothétiques, représentatifs des individus susceptible de recevoir des doses les plus élevées parmi lesquels les individus vivent au moins partiellement en autarcie. »²⁰

Il est généralement admis que le scénario d'un fermier vivant en autarcie répond à cette exigence de groupe critique. Dans le cadre de ce scénario, les enfants ont souvent des facteurs de conversion plus élevés entre l'incorporation et la dose, que ce soit par rapport à des organes spécifiques ou au corps entier. Par conséquent, il est nécessaire d'inclure les enfants dans le groupe critique.

1.3.2 Implications pour la recherche des calculs de performance dans le Dossier 2001 Argile

Le Dossier 2001 Argile présente un certain nombre d'exemples différents pour lesquels ont été effectués des calculs sur la base du fermier vivant en autarcie. Outre une démonstration méthodologique, l'ANDRA a indiqué deux des objectifs de ces calculs de la façon suivante :

¹⁹ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.B, p.105

²⁰ Règle N° III.2.f, Section 5.4.

« Le premier objectif du traitement du scénario d'évolution normale est d'évaluer les capacités de confinement du milieu géologique, en particulier de la formation du Callovo-Oxfordien. »²¹

« Un second objectif du traitement du scénario d'évolution normale est d'évaluer l'influence de la prise en compte des formations encaissantes (Oxfordien calcaire, Dogger, Kimméridgien et calcaires du Barrois) vis-à-vis du calcul de l'impact radiologique à long terme aux exutoires. »²²

L'ANDRA voit ainsi dans ces calculs une analyse d'évaluation préliminaire pour tester son modèle conceptuel de confinement géologique sur le site. En outre, le Dossier 2001 Argile soutient que les paramètres adoptés pour les calculs sont « conservateurs » ce qui suppose une connaissance beaucoup plus approfondie des paramètres du site que dans le cas d'une simple démonstration méthodologique.

« Pour les deux scénarios, les valeurs retenues pour les paramètres correspondent soit aux valeurs phénoménologiques observées, soit, quand les incertitudes sont grandes, à des valeurs dites raisonnablement pénalisantes qui résultent d'une approche conservatrice. Compte tenu des incertitudes qui subsistent aujourd'hui, il est important de noter que le jeu d'hypothèses retenues apparaît très pessimiste sur l'ensemble des paramètres et comportements mis en jeu. Les évaluations conduites ne pourront donc prétendre être une prédiction réaliste. Elles seront par définition très pessimistes par rapport à l'évolution réelle. »²³

Il apparaît clairement dans la citation ci-dessus que l'ANDRA met en avant que ses valeurs de paramètres dans un scénario « d'évolution normale » sont « raisonnablement pénalisantes » et que les résultats de l'évaluation de la performance sont donc « très pessimistes ». Les objectifs des calculs et les conclusions qu'en déduit l'ANDRA représentent un test d'évaluation préliminaire de son modèle conceptuel pour le site, qui était adapté à la phase à laquelle ce document a été écrit.

L'ANDRA a testé le modèle en trois points de prélèvement d'eau. Pour deux d'entre eux, la Meuse et le Tithonien, les estimations de dose effective sont très inférieures à la recommandation de 0,25 mSv. La dose la plus importante, qui s'avérerait légèrement supérieure à la limite de 0,25 mSv dans le scénario de base, était pour l'exutoire Marne-Rognon et concernait le stockage de combustible usé à l'oxyde d'uranium, avec un franchissement de la limite de dose au bout d'environ 700 000 ans après le temps

²¹ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A, p. 129.

²² ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A, p. 130.

²³ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A, p. 121.

présent.²⁴ Aucun calcul portant sur l'utilisation des eaux souterraines entre le site de Meuse/Haute-Marne et l'exutoire Marne-Rognon ne figure dans le Dossier 2001 Argile. L'ANDRA a aussi fait des études de sensibilité, en utilisant un coefficient de diffusion plus petit. Dans ces conditions, l'ANDRA estime à 0,018 mSv par an la dose maximale. Mais les paramètres n'ont été modifiés que dans un seul sens, probablement parce que l'ANDRA estime que les paramètres choisis pour le scénario de base sont « raisonnablement pénalisants ».

Selon le calcul de l'ANDRA, la fraction de l'iode-129 retenue dans le Callovo-Oxfordien est de 48 pour cent; la fraction retenue avant l'exutoire Marne-Rognon est de 92 pour cent.²⁵ Ce résultat provient de l'hypothèse de l'ANDRA selon laquelle la circulation de l'eau est prédominamment diffusive. Par conséquent la dose de rayonnement estimée peut être plus élevée si on utilise les eaux souterraines entre le site de stockage et l'exutoire Marne-Rognon. Des puits situés entre l'exutoire Marne-Rognon et l'emprise du stockage peuvent fournir une méthode plus conservatrice et plus adaptée pour une évaluation préliminaire de la performance, spécialement compte tenu de l'affirmation de l'ANDRA selon laquelle l'approche globale est « très pessimiste ». En outre, les autres hypothèses retenues dans le scénario d'évolution normale ne sont pas toutes conservatrices. Par exemple, le scénario « d'évolution normale » ne prend pas en compte les effets de la génération et du transport des gaz,²⁶ ce qui n'est pas une hypothèse conservatrice. En particulier, il est nécessaire de prendre en compte l'éventualité d'un rejet de carbone 14 sous forme gazeuse à partir du site d'enfouissement, et son transport vers la surface à travers des fractures naturelles ou induites, ou à travers des tunnels, des galeries et l'EDZ. L'aptitude de la roche hôte à supporter un flux de diffusion pourrait être affectée par la génération des gaz. Cet aspect est considéré comme un important domaine de recherche (voir au chapitre 4).

L'impact du choix du scénario sur le programme de recherche sur le site apparaît plus clairement dans le « scénario d'évolution altérée » de l'ANDRA qui fait l'hypothèse d'une défaillance des scellements. Dans ce scénario, les calculs de l'ANDRA indiquent que la recommandation de limite de dose effective de 0,25 mSv par an serait largement dépassée dans au moins certains cas (chlore 36 pour les déchets de type B, à 3 mSv par an, et l'iode 129 pour les déchets avec oxyde d'uranium à 15 mSv par an). Nous pouvons déduire de la Figure VI.4-13 que les doses relativement élevées dues à l'iode 129 pourraient intervenir au cours d'une période située approximativement entre 20 000 et 100 000 ans ou plus après la fermeture du site de stockage.²⁷ Les calculs de sensibilité de l'ANDRA indiquent que si des zones présentant un gradient hydraulique inférieur de deux ordres de grandeur à celui qui est supposé dans les calculs initiaux peuvent être trouvées, l'impact de la défaillance des scellements est considérablement atténué et des doses « comparables » à 0,25 mSv par an sont obtenues (bien que l'ANDRA ne fournisse pas le détail de ces calculs dans le Dossier 2001 Argile) :

²⁴ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A, pp. 133-134.

²⁵ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A, p. 134.

²⁶ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A, p. 120.

²⁷ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A, p. 139. La courbe est relativement plate à cet intervalle de temps. Le pic réel indiqué se situe légèrement après 100 000 ans.

“Les calculs ont mis en évidence le rôle essentiel du scellement des puits et le rôle de la zone endommagée autour des ouvrages avec les hypothèses retenues (perméabilité de la zone endommagée augmentée de deux ordres de grandeur, forts gradients ascendants). Cette dépendance constitue une fragilité du stockage. Dans le même temps, les résultats montrent aussi les performances à garantir ainsi que les voies de progrès possibles tant en termes de positionnement du stockage dans les zones de faible gradient que de meilleure caractérisation de la zone perturbée. Les impacts radiologiques, estimés sur la base des hypothèses très pessimistes, se situent pourtant encore dans la gamme du millisievert. De plus, ils semblent pouvoir être réduits significativement par un ensemble de dispositions de conception à affiner. Au total, il ressort donc de l’analyse de sûreté que les impacts dus au scénario altéré (a priori pessimiste et moins probable) peuvent, sous réserve d’inventaire, être ramenés à des valeurs acceptables car comparables aux valeurs réglementaires. »²⁸

Les chercheurs de l’ANDRA ont plus récemment réaffirmé l’importance centrale de l’intégrité des scellements dans la performance du site de Bure ainsi que la nécessité d’aborder cette question dans le cadre de la recherche sur l’EDZ.²⁹

Bien que la défaillance des scellements soit traitée comme un scénario « altéré », cela ne veut pas nécessairement dire que la probabilité de défaillance des scellements soit faible. Ceci montre au contraire que les conséquences radiologiques d’une défaillance des scellements sont importantes et, donc, que des recherches approfondies doivent être mises en place soit pour démontrer la fiabilité des scellements sur de très grandes échelles de temps, soit pour montrer que les impacts radiologiques d’une défaillance des scellements ont été considérablement surestimés.

De plus, il reste un travail considérable à réaliser pour valider l’hypothèse d’un maintien de conditions de rétention importante des radionucléides à vie longue comme le neptunium 237. C’est particulièrement important pour des radionucléides comme le neptunium 237, le technétium 99 et le sélénium 79 qui peuvent exister sous différentes formes chimiques dans les eaux souterraines ou de surface, selon le pH, le Eh et des aspects plus détaillés de l’hydrochimie (voir Chapitre 4).

Le rôle relatif et absolu de la recherche sur les scellements et les zones dans lesquelles les gradients hydrauliques pourraient être suffisamment faibles dépend en partie du choix du scénario et de la validité des autres hypothèses concernant les radionucléides à vie longue. Il est possible, voire probable, que même si des zones avec un gradient hydraulique de 0,01 mètre par mètre étaient découvertes, le maintien de l’intégrité des scellements soit un facteur plus crucial dans la recherche si l’on prend comme scénario de référence un prélèvement des eaux souterraines en amont de l’exutoire Marne-Rognon.

²⁸ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A, p. 137.

²⁹ Bauer, Pépin, et Lebon 2003.

Ceci fait apparaître qu'il est essentiel d'envisager les liens entre les différents aspects de la recherche sur le confinement géologique et d'autres aspects de la création d'un système de confinement géologique, notamment l'évaluation de la performance à chaque phase, y compris au niveau de l'évaluation préliminaire. Nous avons analysé cette question dans la préface, dont l'objectif est de réunir les différents éléments de cette revue du programme de recherche de l'ANDRA. Il est important de rappeler ici que le concept multibarrières est crucial pour renforcer la confiance dans l'évaluation de la performance et pour réduire les incertitudes pour le respect des normes de la dose. Selon ANDRA 2000 :

« Rappelons que pour une défense en profondeur pleinement **multi-barrières**, il est souhaitable que la barrière géologique (y compris les scellements de puits) soit redondante des barrières artificielles, en ce sens que l'ensemble des barrières artificielles limite l'impact radiologique à 0,25 mSv/an dans le cas d'une situation de court-circuit partiel de la barrière géologique (inventaire radiologique correspondant au maximum à un module de stockage), tandis que l'effet de la barrière géologique doit permettre de limiter l'impact à 0,25 mSv/an pour l'ensemble de l'inventaire stocké pour les autres situations. »³⁰

Etant donné que la défaillance des scellements pourrait s'avérer un facteur déterminant dans l'évaluation de la performance, il est surprenant que le programme de recherche de l'ANDRA soit relativement faible dans le domaine spécifique de l'EDZ, d'une façon suffisamment réaliste pour évaluer la performance de l'installation de stockage après sa fermeture.

1.4 Intrusion humaine

La question de l'intrusion humaine comporte deux aspects: l'intrusion humaine accidentelle et l'intrusion humaine volontaire. Le débat sur l'intrusion délibérée et sa prévention est peut-être le plus difficile et le plus sujet à des spéculations. L'intrusion humaine accidentelle est en principe moins difficile à traiter parce qu'elle fait entrer en ligne de compte des questions comme, par exemple, la présence de ressources naturelles sur le site. Dans cette section nous analyserons brièvement des implications de la question de l'intrusion humaine sur le programme de recherche de l'ANDRA. Dans cette analyse nous traiterons tout particulièrement de la question des ressources géothermiques.

La question de l'intrusion humaine n'est pas toujours considérée comme un facteur essentiel dans la définition d'un programme de recherche sur le confinement géologique dans lequel l'accent est souvent mis sur la caractérisation du système du point de vue du transport des radionucléides dans les eaux souterraines, avec en plus une certaine prise en compte de la production des gaz et du transport en phase gazeuse. Néanmoins, elle a une incidence sur les conditions postulées pour la démonstration de la conformité

³⁰ ANDRA Scellement 2001, c'est l'ANDRA qui souligne

réglementaire et donc sur l'estimation de la performance. L'évaluation de la performance, à son tour, influence la sélection des types de conteneurs et des barrières ouvragées et le caractère majorant des facteurs de sûreté intégrés dans les estimations de dose.

Dans l'éventualité d'une intrusion humaine, la Règle III.2.f ne précise pas explicitement une limite de dose différente de celle du scénario de référence pour le transport des radionucléides du site de stockage à la biosphère. L'absence d'une limite de dose explicitement différente indique que la même limite de dose annuelle de 0,25 mSv devrait s'appliquer dans l'éventualité d'une intrusion humaine. La réglementation des Etats-Unis pour Yucca Mountain est explicite à cet égard. Elle indique que le même degré de protection devrait s'appliquer aussi bien dans le cas des scénarios d'intrusion humaine que dans celui où le site de stockage n'est pas perturbé.³¹ Il faut toutefois noter que les cas d'intrusion à prendre en compte dans le contexte de Yucca Mountain portent sur des perturbations du cheminement normal des eaux souterraines. Ils ne comprennent pas l'exposition des intrus aux déchets ou aux roches contaminées extraites au cours du forage de puits, qui est le mode d'intrusion pré-spécifié.

Il sera très difficile d'obtenir une estimation fiable sur le fait que les doses seront limitées à 0,25 mSv par an dans des situations d'intrusion humaine accidentelle dans l'horizon du site, particulièrement en cas de perforation d'un colis de déchets. Ce sera encore plus vrai après la re-saturation du site de stockage. Dans sa Publication 81, la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) indique que les impacts radiologiques de l'intrusion humaine ne devraient pas être comparés à des contraintes de dose ou de risque dans la mesure où il n'existe aucun fondement scientifique pour prédire la nature ou la probabilité des actions humaines dans le futur. La Commission affirme que la démonstration de la protection vis-à-vis d'une intrusion humaine accidentelle est meilleure en prouvant que des mesures qualitatives adaptées ont été adoptées pour réduire la probabilité de tels événements. Néanmoins, une fois la démonstration faite que de telles mesures ont été prises, il convient d'évaluer les conséquences radiologiques d'un ou plusieurs scénarios d'intrusion humaine simplifiés, s'ils venaient à intervenir. Toutefois, comme ces évaluations dépendent de la survenue effective de cette intrusion, les conséquences radiologiques ne devraient pas être comparées avec les contraintes de doses ou de risques concernant des expositions qui interviendront à coup sûr. Il est suggéré d'effectuer les comparaisons avec des critères de dose adaptés à l'intervention. La signification de cette recommandation est interprétée de la façon suivante : si les scénarios aboutissent à des doses annuelles inférieures à 10 mSv, il n'est pas très utile de s'intéresser plus avant à réduire la probabilité d'occurrence des conséquences radiologiques. A l'inverse, au-dessus d'une dose annuelle de 100 mSv, des efforts considérables devraient être déployés pour réduire cette probabilité d'occurrence. A des doses annuelles situées entre 10 et 100 mSv, les moyens à mettre en œuvre dépendront de l'évaluation de la dose.³² Dans son rapport n° 6, la CNE évoque cette analyse de la CIPR sans apporter de commentaires à son application en France (pages 130-131).³³

³¹ 40 CFR 197, p. 74.

³² ICRP 81.

³³ CNE 2000, pages 130-131

Cette notion d'assouplissement des normes en cas d'intrusion humaine n'est pas unanimement acceptée. Par exemple, l'Académie nationale des sciences américaines (NAS) a recommandé à l'Agence de protection de l'environnement (EPA) d' « exiger que le risque conditionnel résultant du scénario envisagé pour l'intrusion [humaine accidentelle] n'excède pas les limites de risque adoptés dans le cas d'un site de stockage intact. »³⁴ Comme nous l'avons indiqué plus haut, l'adoption d'une limite identique pour l'intrusion humaine, correctement appliquée, pourrait contribuer à une amélioration globale de la conception et de la performance du confinement géologique en renforçant la robustesse des barrières ouvragées. C'est une des raisons de sa prise en compte dans un programme de recherche sur un site de stockage.

1.4.1 Intrusion humaine accidentelle

Il est particulièrement important d'étudier l'intrusion humaine accidentelle de façon approfondie pour le site de Meuse/Haute-Marne, dans la mesure où il n'existe aucun obstacle naturel interdisant un habitat humain directement sur l'emprise du stockage après la perte du contrôle institutionnel. On peut d'ailleurs s'attendre, à long terme, à l'installation d'habitants dans au moins une partie de cette zone.

Un site argileux du type de celui qui est utilisé en Meuse/Haute-Marne ne dispose que d'un nombre limité de ressources utilisables qui pourraient aboutir à une exposition des êtres humains. Nous avons déjà traité de la nécessité d'évaluer les doses issues des eaux souterraines au point le plus proche entre l'emprise du stockage et l'exutoire Marne-Rognon où l'on peut envisager de retirer de l'eau potable. Des variantes de ce scénario devraient intégrer les paramètres de changement climatique d'un programme d'évaluation régionale approfondi (voir plus loin). On considère que l'autre élément essentiel à prendre en considération dans le cadre de l'intrusion humaine involontaire est la prospection ou l'exploitation de ressources géothermiques.

1.4.2 Les ressources géothermiques et l'intrusion humaine³⁵

Les ressources géothermiques sont susceptibles d'augmenter le risque potentiel d'intrusion humaine si elles sont présentes en qualité et quantité suffisantes. Il existe deux types de ressources géothermiques : des eaux à températures élevées et des roches à températures élevées qui se trouvent dans des couches où l'eau est absente.

Le Dossier 2001 Argile mentionne que les ressources géothermiques pourraient être l'un des facteurs susceptibles d'affecter la sûreté du site de stockage.³⁶ Un forage profond est identifié comme l'événement externe « le plus pénalisant » pouvant perturber le site de

³⁴ NAS-NRC 1995, p. 121. Les doses au public résultant des déblais de forage et les doses pour les foreurs ont été exclues de la recommandation.

³⁵ Arjun Makhijani et Yuri Dublyansky ont conjointement rédigé cette section

³⁶ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A, p. 115.

stockage et une défaillance de scellement comme l'événement interne le « plus pénalisant ». Nous avons déjà discuté ce dernier aspect. Le Dossier 2001 Argile n'analyse pas le premier parce qu'il avait déjà été traité :

« Le scénario d'intrusion par un forage n'a pas été pris en compte dans la présente étude, car il avait déjà été traité lors d'une phase antérieure des recherches et le reprendre avec les éléments actuellement disponibles n'aurait pas apporté de plus-value réelle. Sa pertinence et son mode de traitement devront être revus pour la seconde vérification de sûreté de 2004. »³⁷

Nous savons également que « le CLIS a souhaité faire procéder à une évaluation des moyens à mettre en œuvre pour déterminer et caractériser le potentiel géothermique de la région de Bure, et en particulier à l'intérieur de la zone de transposition d'un éventuel stockage de déchets radioactifs définie par l'ANDRA. »³⁸ L'ANDRA a aussi publié un rapport sur la question en 2004.³⁹ Nous examinerons ici la question en termes d'implications pour le programme de recherche au vu de la présence physique de la ressource et de la pertinence de la faisabilité et l'opportunité d'exploiter les ressources du point de vue économique tel qu'on peut l'envisager aujourd'hui.

A une échelle régionale, les eaux souterraines de la partie orientale du Bassin parisien ont un certain potentiel géothermique. La ressource potentielle est située dans l'aquifère du Trias inférieur. Selon un rapport de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN):

« La carte des températures des « Grés inférieurs de Lorraine »,⁴⁰ indique des températures de 70 °C dans le secteur de Bar-le-Duc et de 80 °C dans le secteur de St. Dizier. Les caractéristiques hydrodynamiques et la température moyenne de l'eau (50 °C) seraient probablement suffisantes pour la géothermie jusqu'à la Meuse à l'ouest, mais l'eau devient rapidement très salée à partir de cette limite. La profondeur de la formation (≥ 1500 m) la faible transmissivité et surtout la salinité très élevée (200 g/l au droit de Bar-le-Duc ; ≥ 300 g/l au droit de St. Dizier), rendent l'aquifère gréseux inexploitable pour la géothermie. »⁴¹

Un inventaire exhaustif des ressources géothermiques de la région Champagne-Ardenne a été mentionné par le BRGM.⁴² On peut trouver une compilation de données récentes à ce propos dans Gros (2003). En janvier 2004, l'ANDRA a publié de nouvelles données sur son propre travail de prospection des ressources en liaison avec les données précédemment publiées dans les sources citées.⁴³

³⁷ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A, p. 118.

³⁸ CLIS : <http://www.clis-bure-com>

³⁹ ANDRA Géothermie 2004

⁴⁰ Housse et Maget 1976. Cite dans Gros 2003.

⁴¹ Gros 2003, p. 8.

⁴² Maget et Rambaud 1980. Cite dans Gros 2003.

⁴³ ANDRA Géothermie 2004

Les données de Maget et Rambaud comme celles de Gros⁴⁴ indiquent que deux aquifères qui doivent retenir l'attention sont situés sous la région où se trouve le site de Bure. Le premier est l'aquifère des carbonates du Dogger (température de l'eau entre 30 et 40 °C, salinité 20-30 g/l). Il est considéré que cet aquifère ne présente aucun intérêt géothermique dans la pratique. Le second aquifère est représenté par le « grès du Trias inférieur de Lorraine ». Les températures sont généralement de l'ordre de 55-60 °C. Toutefois, sur la carte présentée à la Fig. 4 de Gros (2003), le site de Bure est situé entre les isothermes 60 et 70 °C. En revanche, une partie des nouvelles données publiées par l'ANDRA, avec des puits à l'intérieur du secteur comprenant le site de Bure indiquent que les gradients thermiques sont moins élevés et que le potentiel géothermique dans cette zone particulière pourrait être inférieur à ce que suggère le contexte régional. Cependant les calculs de l'ANDRA sont basés sur l'extrapolation des mesures de la température pour la raison qu'aucun forage n'atteint le Trias inférieur. Quoiqu'il en soit, les températures sont néanmoins assez élevées pour présenter un intérêt pour l'exploitation des ressources géothermiques .

« La formation du Trias inférieur des « Grès de Lorraine » est donc le seul aquifère susceptible de présenter un potentiel géothermique intéressant au voisinage du secteur étudié par l'Andra. Si les températures estimées sont relativement élevées, la faible capacité à produire de l'eau mise en évidence et les fortes salinités sont des inconvénients majeurs à l'exploitation de cette ressource. L'IRSN préconise dans sa conclusion l'analyse économique et technique de cette ressource, fortement tributaire des facteurs évoqués précédemment. »⁴⁵

Le commentaire de l'ANDRA au sujet de la "forte salinité" de l'eau dans la région du site de Bure laquelle se situe entre 10 à 100g/L devrait être considéré dans le contexte. Elle est considérablement inférieure aux 200 à 300 mg/L des régions de Bar-le Duc et St. Dizier. De plus, les calculs de transmissivité de l'ANDRA dans les forages Montplonne 1 et Montplonne 2, situés à la limite de la région démarquant le site de Bure, d'au moins $2,24 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec}$ et $1,2 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec}$ respectivement sont d'un ordre de grandeur supérieur à la valeur la plus haute $\sim 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ rapportée par l'IRSN pour le Trias inférieur. Par conséquent la conclusion de l'ANDRA que ces facteurs « sont des inconvénients majeurs à l'exploitation de cette ressource » est, au mieux prématurée et, au pire, ne semble pas être justifiée pour l'instant.

On considère généralement que la faisabilité économique de l'exploitation de ressources thermiques du type de celles de Meuse/Haute-Marne dépendra de l'évolution du système énergétique à long terme, des caractéristiques de l'habitat humain et de l'évolution de la technologie. La salinité de l'eau ne peut être considérée comme suffisante pour empêcher à long terme l'exploitation de la ressource. Même si un forage à environ 1 500 m pour une ressource géothermique moyenne ne semble présenter aucun intérêt actuellement, ce ne sera pas obligatoirement le cas sur les longues périodes de temps

⁴⁴ Maget et Rambaud 1980. Cite dans Gros 2003

⁴⁵ ANDRA Géothermie 2004, p. 8.

concernées par l'évaluation de la performance du site de stockage. On peut raisonnablement supposer que l'évolution technologique à moyen et long terme pourrait modifier considérablement l'évaluation. Depuis plusieurs décennies, par exemple, les technologies de conversion de l'énergie thermique des mers sont en cours de développement et permettraient d'exploiter des différences de quelques dizaines de degrés entre les eaux océaniques profondes et de surface pour produire de l'électricité. Le chauffage avec des eaux à températures moyennes fait déjà l'objet d'un usage courant ; on peut même s'attendre à une baisse des températures économiquement exploitables avec une amélioration des matériaux pour un transfert thermique à partir de faibles différences de températures.

Les récentes recherches de l'ANDRA et son analyse représentent des progrès notables dans le traitement de la question de l'intrusion humaine inadvertante. L'importance de cette question mérite une caractérisation intensive supplémentaire.

1.4.3 Intrusion humaine délibérée

La nature des signes, marquages, et structures qui pourraient être employés pour alerter les générations lointaines des risques de l'intrusion a fait l'objet de débats considérables dans le contexte de la conception d'un site de stockage. Le type de marquage qui survivra et restera compréhensible pour des durées bien plus longues que l'histoire de la civilisation, est l'un des éléments clés de ces débats. Un échec de communication avec les générations futures n'est cependant qu'un aspect du problème dans la mesure où un succès pourrait augmenter le risque d'une intrusion délibérée ou malveillante. Il ne semble pas que l'ANDRA ait jusqu'ici étudié en détail le problème de l'intrusion humaine malveillante. La question est mentionnée brièvement dans l'un des bilans de la CNE.⁴⁶

Une intrusion malveillante pourrait s'avérer difficile ou impossible si les zones sont densément peuplées, par exemple, mais elle est tout à fait possible si l'habitat est très dispersé à une époque très éloignée dans le futur, au-delà de la période de contrôle institutionnel. Cette période, qui s'étend de 500 ans à un million d'années, est si longue qu'on ne peut formuler aucune hypothèse sur le type d'habitat qui prévaudra à ce moment.

Puisque les marquages en surface peuvent en fait attirer une intrusion humaine malveillante, le problème de l'intrusion humaine délibérée et malveillante est peut-être, de toutes les questions à long terme associées à l'estimation de la performance d'un système géologique, la question conceptuellement la plus difficile. Quelques principes peuvent être décrits ici à titre de première approche :

- Les mesures de prévention d'une intrusion humaine délibérée devraient être compatibles avec les mesures visant à prévenir l'intrusion humaine accidentelle.

⁴⁶ CNE 2000, p. XI.

Cet argument plaide à l'encontre des marquages puisque, même s'ils peuvent prévenir l'intrusion accidentelle, ils peuvent, par contre, rendre l'intrusion délibérée plus probable.

- Une approche possible, dont l'étude doit être approfondie, serait de concevoir un système pour lequel le coût et la complexité de l'extraction et du raffinage des ressources à partir des déchets stockés dans le site d'enfouissement seraient plus importants que le coût de leur acquisition par d'autres moyens à long terme. Les concepts qui sont étudiés devraient partir des technologies prévisibles, comme c'est le cas dans les autres domaines de recherche sur le site d'enfouissement.
- Il vaudrait la peine de considérer si une réduction de la surface d'emprise du stockage pourrait réduire les risques d'intrusion accidentelle sans augmenter les risques d'une intrusion délibérée. Dans ce contexte, une emprise est la projection verticale du site de stockage à la surface dans lequel les déchets fortement radioactifs sont enfouis. L'emprise ne se rapporte pas aux installations de surface, construites seulement pour la période d'exploitation et de surveillance du stockage parce qu'elles sont présumées ne pas subsister au-delà de la période de contrôle institutionnel. De fait, il faudrait peut-être même envisager de les enlever après la fermeture permanente du site de stockage pour réduire le risque d'intrusion volontaire. Cependant, une emprise réduite peut créer d'autres problèmes, tels que des températures inacceptables. Une emprise réduite et des températures modérées pourraient être plus compatibles si plusieurs couches verticalement espacées pouvaient être aménagées sans risque dans un site de stockage. Il s'agit en soi d'une question de recherche d'une grande complexité.

Il faut admettre qu'une intrusion humaine délibérée ne serait pas nécessairement malveillante. Le site d'enfouissement aura une importante signature thermique, au moins pendant plusieurs milliers d'années, et constituera également une anomalie géomagnétique persistante. Il pourrait donc bien être identifié au cours d'études aéromagnétiques ou d'autres recherches géologiques. L'exploration de cette anomalie pourrait alors intervenir pour diverses raisons, que ce soit pour identifier d'éventuelles ressources (la présence d'un gisement riche), ou pour satisfaire une curiosité scientifique.

1.5 Changements climatiques

Concernant les changements climatiques, la Règle III.2.f établit une distinction entre changements d'origine naturelle et changements induits par l'activité humaine. Une glaciation causant une importante érosion en surface est envisagée à une échéance de 60 000 ans (paragraphe 1.2.1, annexe 2). Une érosion superficielle importante n'est pas prise en compte dans le contexte d'un changement climatique lié à l'activité humaine. L'étude d'événements stochastiques de glaciation sur une échelle de temps de 160 000 ans est également indiquée (Para. 2.1, annexe 2). En ce qui concerne les changements climatiques liés aux activités humaines, la Règle III.2.f exige la prise en compte des effets d'une élévation du niveau de la mer « dont les effets seront étudiés dans le cadre de

l'évaluation des conséquences liées aux changements climatiques d'origine naturelle (période interglaciaire). » (para 3.3. Annexe 2, Règle III.2.f)

La convergence des avis scientifiques et les nombreuses évidences du développement de changement climatique grave font d'une intégration complète des changements climatiques un élément essentiel du programme de recherche sur le site de stockage.⁴⁷ Il faut accorder à l'ANDRA que, en tant que membre d'un consortium international, elle a fait des travaux approfondis sur les changements climatiques. Nous examinerons d'abord une partie de ce travail et présenterons ensuite nos remarques sur les implications pour le site de Bure.

Le travail international de l'ANDRA porte sur l'évolution naturelle prévue pour le climat ainsi que sur certains effets éventuels de l'accumulation dans l'atmosphère des gaz à effet de serre. Plus précisément, l'ANDRA a effectué ce travail dans le contexte d'une collaboration internationale de trois ans, connue sous le nom de BIOCLIM, dans lequel les établissements responsables des programmes géologiques de confinement des déchets de haute activité ont analysé l'ampleur et les effets des changements climatiques sur leurs programmes. Ce programme a débuté en octobre 2000.

L'abréviation BIOCLIM signifie « Modelling Sequential BIOSphere system under CLimate change for Radioactive Waste Disposal ». C'est un programme EURATOM, coordonné par l'ANDRA. Les autres agences de gestion des déchets y participant sont : NIREX (R-U), GRS (Allemagne), ENRESA (Espagne), et NRI (République Tchèque). On y retrouve aussi des organismes spécialisés dans la recherche sur le climat. Ce sont le LSCE (CEA/CNRS, France), le CIEMAT (Espagne), l'UPMETSIMM (Espagne), l'UCL/ASTR (Belgique) et la CRU (UEA, R-U). L'objectif d'ensemble de ce projet est l'étude de l'impact des changements climatiques, naturels et liés aux activités humaines, sur les sites de stockage géologique et l'aptitude de ces derniers à contenir les déchets et à limiter les doses pendant des périodes allant jusqu'à un million d'années et au-delà.⁴⁸

Dans son DOSSIER 2001 ARGILE, l'ANDRA décrit ainsi le concept de recherches :

« Les changements climatiques qui se produiront dans le futur peuvent modifier les caractéristiques de la biosphère tempérée qui existe aujourd'hui sur le site Meuse/Haute-Marne et pour lequel un modèle a été construit. L'évolution des climats entraînera des modifications de la végétation, de la faune et de la flore, de la géomorphologie du site, de la nature des sols actuels mais aussi des pratiques humaines connues actuellement dans la région. D'une part, les pratiques humaines peuvent aussi modifier l'évolution naturelle des climats. C'est le cas de l'effet de serre, et d'autre part, l'homme est amené à modifier son environnement pour en extraire les ressources nécessaires à son développement.

⁴⁷ Il existe maintenant une littérature scientifique abondante sur les changements climatiques, notamment sur les changements anthropiques. Voir par exemple NAS-NRC 2002 et Clark et al. 2002.

⁴⁸ Texier et al. 2003. Les commentaires sur la recherche BIOCLIM sont tirés de cet article sauf indication contraire. Voir aussi BIOCLIM D1 2001.

L'ensemble de ces questions est étudié de manière à fournir des illustrations des différents futurs possibles de la biosphère sur le site Meuse/Haute-Marne. »⁴⁹

L'intention de l'ANDRA était d'exécuter ce programme général de recherche en étudiant les changements climatiques du passé :

« Il est admis que l'évolution du climat sera similaire à celle qui a existé dans le passé, au cours du Quaternaire (depuis 2,4 millions d'années). Ainsi, les études ont montré qu'il existait une alternance de périodes froides (glaciaires) et tempérées (interglaciaires). L'Andra a donc engagé depuis plusieurs années des études pour connaître l'évolution de la végétation durant un cycle glaciaire-interglaciaire. »⁵⁰

La modélisation effectuée dans BIOCLIM correspond à ce concept général. Le Dossier 2001 Argile suppose que l'évolution naturelle du climat futur correspondra généralement aux cycles qui ont été observés par le passé avec des variations de l'insolation et du dioxyde de carbone qui sont les éléments moteurs, primaires et secondaires, des changements de température moyenne planétaire. Par conséquent on peut raisonnablement supposer que ceux-ci constituent également des fonctions de forçage pour le climat régional. On estime généralement que les prévisions climatiques régionales basées sur des fonctions de forçage globales sont beaucoup plus difficiles et incertaines. Le programme BIOCLIM tente de résoudre ces questions en employant des modèles de plus petite échelle pour obtenir des résultats régionaux à partir des prévisions globales du climat. Ces travaux de modélisation sont encore dans une phase préliminaire et nécessitent un approfondissement considérable.⁵¹

Le programme BIOCLIM porte également sur les changements anthropiques de la composition de l'atmosphère, notamment les changements de la concentration de dioxyde de carbone. Ces changements sont superposés aux variations cycliques naturelles estimées afin d'obtenir des scénarios climatiques composites. Nous sommes généralement d'accord avec cette approche. Le projet BIOCLIM a effectué des travaux très intéressants sur certains ensembles de scénarios importants pour la performance du site d'enfouissement, avec des implications pour la recherche non seulement sur les changements climatiques, mais également sur l'évolution du modelé du terrain, de l'hydrogéologie, l'hydrogéochimie et d'autres disciplines. Ces scénarios font intervenir

⁴⁹ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.B, p. 105

⁵⁰ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.B, p. 105

⁵¹ Par exemple, les résultats obtenus par modélisation des précipitations en Europe au cours du dernier maximum glaciaire (il y a environ 21 000 ans) en utilisant une réduction d'échelle, avaient tendance à indiquer des augmentations, alors que les reconstructions climatiques faisaient apparaître des diminutions, ce que BIOCLIM décrivait comme un « résultat décevant de réduction d'échelle. » BIOCLIM D8a 2003, p. 27. Ceci ne provient pas d'un manque de travail ou de compétence. Ceci vient du fait que les modèles, même les plus récents, sont eux-mêmes préliminaires et demandent beaucoup de travail. BIOCLIM D8b 2003 remarque qu' « alors que la méthodologie de réduction d'échelle a été développée soigneusement, il ne s'agit que de la première version d'une méthode plutôt nouvelle ; elle nécessite plus de validation et ceci suggérerait probablement des améliorations. » (p. 30).

des concentrations faibles ou élevées de dioxyde carbone. Ils intègrent les effets d'une fonte complète des calottes glaciaires.

1.5.1 Changements anthropiques dans la circulation thermohaline

BIOCLIM D1 2001 décrit certains des grands changements qui seraient induits dans le cycle hydrologique par l'alternance du gel et du dégel pendant une période glaciaire, ainsi que les changements dans les mécanismes d'érosion, les affleurements de surface, et les autres facteurs qui pourraient affecter l'évaluation de performance du site de stockage.

La durée et l'intensité d'un tel épisode de glaciation et de fonte présentent une certaine importance dans l'évaluation de l'impact du changement climatique sur la performance du site d'enfouissement. Elles déterminent la profondeur de pénétration du pergélisol, qui peut influencer de diverses manières le transport des radionucléides notamment par des changements de la conductivité hydraulique et l'expulsion des solutés de la glace du sol, ainsi que par des perturbations mécaniques.

Dans le Dossier 2001 Argile, l'ANDRA partait du principe que le *seul* résultat global plausible des émissions anthropiques de gaz à effet de serre sur le prochain cycle de glaciation serait de retarder le prochain maximum glaciaire et de réduire son intensité :

« Du fait de la production industrielle qui engendre l'émission de gaz à effet de serre, il est supposé que les activités humaines actuelles vont engendrer un réchauffement climatique qui perturbera l'évolution naturelle des climats. Un modèle climatique a été utilisé pour simuler l'évolution globale du climat sur le prochain million d'années. La concentration en CO₂ joue un rôle important car elle modifie l'amplitude de la réponse climatique au forçage solaire. Plusieurs scénarios mettant en jeu des concentrations variables en CO₂ ont été identifiés. Les premiers résultats montrent que la prochaine glaciation pourrait *n'avoir lieu que dans quelques centaines de milliers d'années au lieu des prochains 50 000 ans environ attendus*. Dans de telles conditions, les impacts des changements climatiques sur les modèles hydrogéologiques (absence de pergélisol.), la composition des groupes critiques et les modes de représentation des biosphères futures devront être revus afin d'être pleinement intégrés dans les calculs d'impact. »⁵²

Malheureusement, des recherches récentes indiquent qu'un retard de la prochaine période glaciaire n'est pas le seul résultat possible et que des conséquences bien plus défavorables sont possibles. Ces dernières années un nombre grandissant d'observations montre que la fonte du pergélisol et de la couverture glaciaire terrestre, en particulier de la calotte

⁵² ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.B, p. 106. C'est nous qui soulignons.

glaciaire du Groenland, ainsi que l'accroissement des précipitations extratropicales dans l'hémisphère nord pourraient perturber de façon critique la circulation globale du courant chaud de l'océan Atlantique Nord et causer l'arrivée soudaine d'une mini période glaciaire dans la plus grande partie de l'Europe en un temps relativement court, et peut-être même rapide.⁵³

Sous l'effet de l'évaporation et du refroidissement, la flottabilité des eaux de surface de l'océan Atlantique diminue au fur et à mesure que celles-ci se dirigent vers le Nord. En s'approchant du Groenland, la densité de ces eaux augmente. Elles plongent donc entraînant ainsi l'arrivée d'autres eaux de surface provenant de l'océan Atlantique tropical. Cette eau s'écoule alors en profondeur comme un fleuve géant à travers les océans du monde reparaissant à la surface dans le Pacifique pour circuler à nouveau à la surface de l'océan Atlantique. Ce fleuve océanique global, dénommé, Circulation thermohaline (CTH), constitue une composante essentielle dans la répartition de l'énergie thermique sur l'ensemble de la planète. La formation des eaux profondes dans l'Atlantique nord constitue un maillon essentiel dans la circulation de cette CTH. L'augmentation de la flottabilité de cette composante de la CTH par un afflux d'eau douce pourrait ralentir, et éventuellement arrêter, cette redistribution globale d'énergie.

Les recherches réalisées ces dernières années indiquent que des changements dans la puissance de la CTH ont été accompagnés par des changements brusques du climat, en particulier en Europe qui est réchauffée par le transport des eaux tropicales dans l'Atlantique Nord. McManus et ses collègues au Woods Hole Oceanographic Institution ont en particulier constaté que la formation des eaux profondes s'est nettement réduite ou a complètement disparue, débutant aux alentours de -17 500 pour aboutir aux alentours de -12 700 ans à la période froide de Younger Dryas. Ce changement a coïncidé avec les intervalles de déglaciation les plus froids dans la région Atlantique nord. De plus, la reprise de la formation profonde de l'eau de l'Atlantique nord a coïncidé avec les deux événements de réchauffement régionaux les plus forts pendant la déglaciation.⁵⁴

Les résultats obtenus à partir des données hydrographiques enregistrées dans le détroit du Labrador indiquent que, ces dernières 40 années, l'Atlantique nord s'est refroidi à cause de la fonte des glaces et de l'augmentation des précipitations régionales.⁵⁵ Un article récent de Robert Gagosian, président et directeur du Woods Hole Oceanographic Institution aux Etats-Unis, indique qu'il est possible qu'un refroidissement régional brusque en Europe soit compatible avec une tendance à un réchauffement progressif de la planète :

« Il est important de clarifier que nous ne prévoyons pas une situation soit de refroidissement brusque soit de réchauffement global. Au contraire, le refroidissement régional brusque et le réchauffement global progressif peuvent se dérouler simultanément. En effet, l'effet de serre est un facteur

⁵³ Pour une analyse détaillée du risque que le changement climatique représente pour le « tapis roulant » océanique de l'Atlantique nord, voir Gagosian 2003, Rahmstorf et Ganopolski 1999.

⁵⁴ McManus et al. 2004

⁵⁵ Dickson et al. 2002.

déstabilisant qui rend plus probables les changements climatiques brusques. En 2002 un rapport de l'Académie nationale des Sciences des Etats-Unis rapporte que les éléments d'information disponibles suggèrent que des changements climatiques brusques sont non seulement possibles mais probables à l'avenir, et s'accompagneraient d'impacts potentiellement importants sur les écosystèmes et les sociétés. »⁵⁶

Il est difficile de se servir de techniques de « réduction d'échelle » pour évaluer ces brusques variations du climat régional provoquées par les « feedbacks » des augmentations globales de la température. Actuellement, les modèles climatiques à l'échelle planétaire n'incorporent pas les complexités du transfert thermique océanique avec assez de détails pour pouvoir caractériser l'affaiblissement la formation des eaux profondes dans l'Atlantique nord et l'impact qui en résulte sur le climat régional, du point de vue de l'évaluation de la performance du site d'enfouissement.

Les deux modèles décrits dans BIOCLIM par rapport à l'évaluation des effets de modèles climatiques globaux réduits à l'Europe de l'Ouest sont encore en cours d'élaboration et sont des simplifications des modèles climatiques globaux. Dans le premier, que BIOCLIM a adapté pour son usage, qui est appelé MoBiDic, « le modèle de calotte glaciaire est plutôt simple » ; le second, élaboré en partie sous les auspices de BIOCLIM et connu sous le nom de CLIMBER-GREMLINS, conjugue deux modèles. Son modèle de calotte glaciaire est « plutôt complet ».⁵⁷ Toutefois le couplage des deux modèles ne tient pas compte des flux d'eau douce qui proviennent de la fonte d'une calotte glaciaire. Dans la version actuelle du modèle, aucun flux correspondant n'alimente l'océan. »⁵⁸ De ce fait, le rapport intitulé *Continuous climate evolution scenarios over Western Europe (1000 km scale)* incite à la prudence en indiquant que « les résultats de modèle, particulièrement ceux de CLIMBER-GREMLINS, doivent être considérées comme des illustrations de différentes possibilités plutôt que comme des prévisions absolues de l'évolution climatique. L'approche novatrice des changements climatiques qui a été adoptée dans BIOCLIM s'appuie sur des outils de recherche en élaboration constante, notamment en ce qui concerne le modèle CLIMBER-GREMLINS. »⁵⁹

Texier et al. ont décrit les effets d'un refroidissement hypothétique lié au ralentissement de la CTH (cependant sur des durées de 50 000 à 178 000 années). La température annuelle moyenne diminuerait de 5 °C. Beaucoup d'autres changements accompagneraient le refroidissement :

« Il faudra s'attendre à des changements substantiels des masses d'eau. Des hivers très froids engendreront la formation d'une couverture de neige étendue et les fleuves seront pris par les glaces. La fonte du printemps sera accompagnée de barrages de glace dans les rivières et de débits maxima très élevés. En conséquence, il y aura une reconfiguration considérable

⁵⁶ Gagosian 2003.

⁵⁷ BIOCLIM D7 2003, p. 7

⁵⁸ BIOCLIM D7 2003, p. 74

⁵⁹ BIOCLIM D7 2003, p. 6

des lits des rivières. On s'attend à la présence d'un pergélisol discontinu, recouvert par une couche active saisonnière. On s'attend aussi à la formation de structures de sol telles que des fentes de glace, caractéristiques des régions froides. »⁶⁰

Dans ce contexte, une érosion rapide et grave et des modes imprévisibles d'occupations post-glaciaires des terres par les hommes sont tout à fait dans le domaine du possible. Les effets radiologiques de ces changements régionaux dépendront considérablement du moment où le changement climatique en question se produira. Des changements dans la CTH pourraient se produire plus rapidement et causer des refroidissements qui pourraient persister pendant des milliers d'années. Différents modèles fournissent des résultats différents

Les modèles utilisés par le groupe intergouvernemental d'experts sur le changement climatique ne prédit pas de refroidissement sur l'Atlantique Nord dans l'éventualité d'une diminution rapide de la CTH.⁶¹ Mais l'étude de 2002 de l'Académie nationale des sciences (NAS) déjà citée, qui s'appuie sur des modèles utilisés par le Groupe intergouvernemental d'experts sur le changement climatique, met en garde contre les limites de ces modèles :

« Toutefois, nous ne pouvons exclure la possibilité d'un refroidissement net sur l'Atlantique Nord si la CTH diminue très rapidement. Une telle rapidité du refroidissement exercerait une importante contrainte sur les systèmes naturels et sociétaux. La probabilité d'occurrence de cette situation est inconnue mais probablement très inférieure à celle des scénarios beaucoup plus progressifs inclus dans le rapport du Groupe intergouvernemental d'experts sur le changement climatique....Il est bon de se souvenir que des modèles du type de ceux qui sont utilisés dans le rapport du Groupe intergouvernemental d'experts sur le changement climatique sous-estiment systématiquement la taille et l'ampleur des anomalies relatives aux anciens changements de la CTH. Si cette sous-estimation résultait d'un manque de sensibilité du modèle, éventuellement lié à une résolution trop grossière ou à d'autres défauts plutôt qu'une spécification inadéquate du forçage, les anomalies climatiques à venir pourraient être étonnamment importantes. »⁶²

Dans ce contexte, il faut garder présent à l'esprit un autre problème de changement global pour lequel les prévisions des premiers modèles se sont révélées extrêmement erronées : la diminution de la couche d'ozone. Pendant les années 1970 et au début des années 1980, avant la découverte du trou de la couche d'ozone au-dessus de l'Antarctique, les modèles d'appauvrissement de la couche d'ozone portaient d'une chimie en phase

⁶⁰ Texier et al. 2003, pp. 209-210.

⁶¹ NAS-NRC 2002, p. 109.

⁶² NAS-NRC 2002, pp. 115-116; c'est nous qui soulignons.

gazeuse et d'une diminution progressive de la couche d'ozone du fait de l'accumulation des CFC dans la stratosphère. Aucune évaluation scientifique n'avait prédit qu'un trou dans la couche d'ozone de la taille d'un continent apparaîtrait au-dessus de l'Antarctique et que les mécanismes dominants feraient intervenir des aspects aussi complexes de la chimie des gaz, des liquides et de la surface des solides (cristaux de glace). Il a fallu réviser la théorie de l'appauvrissement de l'ozone après cette découverte.

Le problème du changement climatique global est beaucoup plus complexe. Il est peu probable que les effets les plus désastreux soient limités à une zone pratiquement inhabitée. Il est encore moins probable que la société humaine soit capable de prendre des mesures comparables à celles qui ont été adoptées pour le trou dans la couche d'ozone pour abandonner les activités polluantes et prévoir un retour au statu quo antérieur en l'espace de quelques décennies. Le fait que les modèles existants du Groupe intergouvernemental d'experts sur le changement climatique soient loin de pouvoir reconstruire les effets historiques des importants changements liés à la CTH devrait conduire à beaucoup de réflexion et de prudence.

Il est à noter que les modèles du Groupe intergouvernemental d'experts sur le changement climatique cités dans l'étude de l'Académie nationale des sciences ne prennent pas en compte le forçage de l'eau douce résultant de la fonte des glaciers terrestres.⁶³ Le modèle de Rahmstorf et Ganopolski intègre ce facteur. En contraste des modèles du Groupe international d'experts le modèle de Rahmstorf et Ganopolski est capable d'estimer avec succès les événements de glaciation du passé. Par conséquent, les estimations de ce modèle sur les conséquences des changements de la CTH sont importantes et pertinentes.

Rahmstorf et Ganopolski présentent des scénarios divers sur les conséquences du forçage de l'eau douce pour l'Atlantique nord. Dans le scénario de fermeture de la CTH (avec une fermeture intervenant après 2100), ils indiquent que sur l'Atlantique Nord la température hivernale de l'air près de la surface à une latitude de 55 °N

« ...augmente de 3 °C jusqu'en 2100 puis chute de près de 3 °C en 40 ans pendant la phase de fermeture rapide de la circulation thermohaline. C'est un rythme de changement extrêmement rapide qui aurait de graves implications écologiques et socio-économiques. *Le refroidissement ne s'arrête pourtant pas là. Il continue jusqu'à la fin du millénaire suivant, à un moment où il fait 6 °C plus froid qu'à la période pré-industrielle.* »⁶⁴

La Figure 2(e) dans cet article indique que la température à la latitude 55 °N serait en l'an 2500 inférieure d'environ 3 °C à celle de l'époque industrielle.⁶⁵ Dans le cas précis des

⁶³ ICPP 2001, pp 562-563,

⁶⁴ Rahmstorf and Ganopolski 1999, p. 361-362, c'est nous qui soulignons. Les estimations de températures sont apparemment au-dessus de l'Océan Atlantique.

⁶⁵ Selon l'ANDRA cet article « quantifie la température en France dans les années 2500 dans le cas d'un arrêt de la CTH la température hivernale resterait de 1 à 2 °C supérieure à sa valeur pré-industrielle (années

résultats de sorties de modèles en question, l'article indique que « la faible résolution de notre modèle n'autorise pas des précisions au niveau régional, mais les éléments de la Figure 1 ne laissent guère de doute sur le fait que le grand refroidissement situé au-dessus de l'Atlantique nord toucherait les zones nord-ouest de l'Europe. »⁶⁶ Néanmoins, l'article ne précise pas l'extension de cette zone de refroidissement à l'intérieur de l'Europe ou comment ces effets de refroidissement pourraient diminuer progressivement en allant vers le sud. Enfin, l'article affirme qu'« [a]vec les plages d'incertitudes actuelles, les deux résultats du pic anthropique du taux de CO₂ atmosphérique *ont la même probabilité* : un déclin et une reprise ultérieure ou un effondrement complet de la circulation thermohaline atlantique. »⁶⁷

L'ANDRA a effectué des travaux utilisant des techniques de pointe sur les changements climatiques. Mais il est clair que l'état des connaissances est loin de pouvoir fournir des paramètres des changements climatiques qui s'intégreraient à une évaluation fiable du changement climatique sur une échelle de temps de plusieurs milliers d'années, et encore moins sur un million d'années.

1.5.2 Reconstructions paléo-climatiques

L'approche de l'ANDRA qui consiste à examiner le passé climatologique ainsi qu'à rechercher des environnements analogues dans le présent pour comprendre les futurs environnements possibles, est globalement robuste.⁶⁸

Une information détaillée sur le paléo-climat et le paléo-environnement, en particulier leurs caractéristiques hydrogéologiques, est indispensable au cours du développement des scénarios prédisant l'évolution du site et les changements associés à la dynamique du transfert des radionucléides. La reconstruction locale précise du climat, de l'hydrologie, de la végétation, etc. est très importante parce qu'elle fournit les deux contraintes et moyens de validation pour la modélisation associée au développement des scénarios de l'évolution future de la biosphère.

A en juger par les documents publiés qui décrivent les projets de recherche de l'ANDRA (ANDRA, 2002-2005, ANDRA, 2002), les recherches de l'agence sur cette question insistent pour le moment sur la modélisation plus que sur des recherches spécifiques au site. Sur la période 2000-2003, la recherche a été effectuée principalement dans le cadre du projet international BIOCLIM qui avait pour objectif principal de développer des modèles climatiques à différentes échelles. Des informations paléo-climatiques « concrètes » ont été obtenues à travers deux thèses de doctorat soutenues par l'ANDRA et une collaboration avec le LSCE de l'UMR CEA-CNRS sur deux sources d'informations potentielles (1) la séquence climatique du Bassin de Saint-Omer (Pas-de-

1800). » ANDRA 2004, p. 17. Cependant cela est une misinterprétation du scénario d'un arrêt de la CTH dans Rahmstorf et Ganopolski 1999, lesquels ne mentionnent pas la France .

⁶⁶ Rahmstorf et Ganopolski 1999, p. 362.

⁶⁷ Rahmstorf et Ganopolski 1999, p. 354, c'est nous qui soulignons.

⁶⁸ Les paragraphes suivants de l'étude sur le paléo-climat ont été écrits par Yuri Dublyansky.

Calais) et (2) les dépôts lacustres du lac d'Annecy (Haute-Savoie). Dans le Bassin de Saint-Omer, des informations palynologiques et micro-paléontologiques ont été utilisées pour reconstruire les fluctuations climatiques au cours de l'Holocène. L'objectif de l'étude du lac d'Annecy était de développer une courbe paléo-climatique de haute résolution pour la France à partir des propriétés isotopiques des sédiments du lac.

Ces activités de recherche de l'ANDRA sont pertinentes et importantes. Cependant il faut savoir que la transposition des informations paléo-climatiques de ces deux sites de référence à la région de Bure ne sera pas simple. Les facteurs déterminant le climat français sont nombreux, de sorte qu'un site de référence éloigné ne sera pas nécessairement représentatif du climat sur le site concerné.

« ... la France se situant dans une région soumise à la fois aux influences atlantiques, méditerranéens et continentales, en plus de l'incidence directe de la latitude et des reliefs, il s'agit d'estimer les valeurs des corrections à apporter aux données issues des séquences climatiques de référence (telle que La Grand-Pile ou Le Velay qui sont situées dans des contextes géographiques différents) pour l'application au site. »⁶⁹

L'ANDRA paraît parfaitement consciente de cette difficulté :

« ... toute analyse précise et plausible des conditions climatiques et de leur évolution, pour un site (une région), ne peuvent pas être effectuées par simple extrapolation des enregistrements qui servent de références globales, obtenus aux hautes latitudes et en milieu océanique ... A ce jour, les corrections réalisées pour l'application à un site donné sont restées empiriques. »⁷⁰

Il est crucial de disposer d'informations paléo-climatiques dérivées localement. Les remplissages (spéléothèmes), une importante source d'informations paléo-climatiques et paléo-environnementales, constituent une source précieuse pour des informations spécifiques au site. Cette source d'information a été étudiée de façon assez exhaustive au cours des trente dernières années. Les avantages des études à partir des spéléothèmes ont été résumés par McDermott.⁷¹

De nombreuses possibilités de recherche pour les études sur les spéléothèmes sont disponibles, y compris des études spécialisées de pétrographies⁷², des études de distribution spatiale des éléments trace,⁷³ et des études sur la composition des éléments stables de l'eau dans les inclusions fluides.⁷⁴ De telles études peuvent fournir des données d'une très haute résolution temporelle (annuelle et même sous

⁶⁹ ANDRA BET 2002, p. 222

⁷⁰ Brulhet 2001, p. 11

⁷¹ McDermott 2004

⁷² McDermott et al. 1999; Frisia et al. 2000

⁷³ McDermott et al. 1999; Frisia et al. 2000

⁷⁴ Serefiddin et al. 2002; McGarry et al. 2004

annuelle,⁷⁵, impossible à obtenir pour d'autres types de « milieu enregistrant » du paléoclimat.

« Si on s'appuie sur la connaissance des évolutions climatique passées, il convient de noter que les événements brefs, notamment saisonniers, ne sont en général pas accessibles à l'échelle des enregistrements climatiques du passé, qui servent de calage pour les estimations du future, dans lesquels ces variations sont lissées.

En effet, les dépôts sédimentaires enregistreurs du climat ne donnent qu'exceptionnellement accès à cette échelle de temps (laminés annuels des dépôts lacustres dans le meilleur des cas) et les possibilités de reconstructions climatiques classiques, basées sur les analyses polliniques notamment, n'atteignent en général pas ce niveau de précision. »⁷⁶

Une datation absolue précise est une condition indispensable pour des études paléoclimatiques des spéléothèmes. Dans le cadre des recherches doctorales soutenues par l'ANDRA, quelques 51 datations radiométriques ont été obtenues à partir de spéléothèmes prélevés dans cinq grottes de l'Est du Bassin parisien.⁷⁷ Toutefois, cette tentative pour obtenir des informations de paléoclimatologie par comparaison des âges radiométriques de spéléothèmes de l'est du Bassin parisien, avec un enregistrement $\delta^{18}\text{O}$ généralisé de coraux marins, SPECMAP⁷⁸ ne correspond pas à des pratiques reflétant l'état des connaissances. Ces informations ne contiennent même aucune donnée se rapportant à l'indicateur standard du paléo-climate, $\delta^{18}\text{O}$.

L'ANDRA devrait mener des recherches paléo-environnementales approfondies, avec des techniques de pointe (dont le paléo-climat et la paléo-hydrologie) sur la base d'information spéléothermique régionale (partie Est du Bassin parisien). Cette recherche, conjuguée avec les résultats de datation déjà disponibles,⁷⁹ pourrait permettre une reconstruction substantiellement détaillée du paléo-climat et de la paléo-hydrologie dans cette partie de la France pour les derniers 100 000 ans environ, et encore même plus détaillée pour l'Holocène (les derniers 10 000 ans).

1.5.3 Programme de l'ANDRA sur les changements climatiques pour le site de Bure

L'ANDRA a décrit son approche des changements climatiques dans les parties A et du B du Dossier Argile ainsi que dans BIOCLIM 2001 D1, Annexe A. Le Dossier 2001 Argile envisage un programme séquentiel d'incorporation des effets du changement climatique :

⁷⁵Treble et al. 2003

⁷⁶ Brulhet 2001, p. 6

⁷⁷ Pons-Branchu, 2001

⁷⁸ Pons-Branchu, 2001, p. 156

⁷⁹ Pons-Branchu, 2001

« L'objectif des études consiste, à partir de la compréhension des mécanismes de transfert de la radioactivité dans l'environnement, à construire une représentation de la biosphère qui servira à calculer l'impact d'un éventuel stockage sur l'homme et son environnement. Jusqu'à présent, il a été admis que l'homme constituait l'espèce la plus sensible du point de vue des rayonnements ionisants et que le protéger revenait aussi à protéger les autres espèces vivantes. Cette affirmation a été récemment nuancée conduisant à élargir le champ des recherches. Ces dernières visent à identifier les principaux processus de transfert dans un système biosphère de type agricole représentatif du site Meuse/Haute-Marne, à modéliser leur impact sur le long terme, puis à prendre en compte les conséquences de l'évolution climatique future sur les mécanismes de transfert et les modèles de biosphères. »⁸⁰

La création d'un modèle qui permettrait une estimation des changements climatiques à un niveau régional (par exemple au niveau de la France) résultant de la conjugaison des forçages d'origine naturelle et anthropique à un niveau de détail qui serait pertinent pour l'estimation des impacts sur un site d'enfouissement présente d'immenses difficultés. Notamment les éventuelles modifications de la CTH dans les quelques siècles à venir introduisent non seulement une incertitude sur le sens du changement climatique à un niveau régional ou local, mais aussi sur l'ampleur de ce changement. La façon dont des oscillations à court terme ou des impacts à long terme sur des milliers d'années pourraient affecter les performances sur des durées pertinentes en termes de migration des radionucléides est une question difficile qui demande des travaux supplémentaires considérables. Comme nous le remarquons plus haut, BIOCLIM, qui a effectué un travail reflétant l'état des connaissances sur l'estimation des impacts régionaux, reconnaît les importantes limites de ses modèles et son caractère préliminaire et évolutif. La fonte de la calotte glaciaire induite par les activités humaines et les changements de la CTH d'une façon qui peut être traduite en paramètres de l'évolution de performance ne sont pas encore intégrés.

La fourchette des possibilités en terme de baisse ou d'élévation des températures ne peut pas encore être décrite ou bien comprise, particulièrement dans le contexte d'une fonte rapide de la calotte glaciaire et des changements importants dans la CTH qu'elle peut induire. L'ANDRA envisage d'élaborer un programme de recherche sur le changement climatique spécifique au site en 2005. Ce programme spécifique au site devrait étudier les conséquences potentielles des changements de la CTH, ses effets sur la direction et la magnitude du changement de climat à l'échelle régionale ainsi que sur l'aptitude du site de Meuse/Haute-Marne d'assurer le confinement de déchets radioactifs. De telles recherches seront essentielles pour intégrer la gamme des changements de climat possibles dans une évaluation future de la performance. Tout aussi important, elles peuvent aider à définir les besoins de la recherche, par exemple pour la question de colis de déchets plus robustes dont les caractéristiques pourraient contribuer à réduire les incertitudes se rapportant aux effets du changement climatique sur la performance du système de confinement géologique dans son ensemble.

⁸⁰ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A, p. 79.

1.6. Références

40 CFR 197, 2004	United States. Environmental Protection Agency. <i>Code of Federal Regulations: Protection of the Environment</i> . Title 40, Part 197: Public health and environmental radiation protection. Washington, D.C.: Office of the Federal Register, National Archives and Record Service; U.S. Government Printing Office, 2004. Searchable on the Web at http://www.gpoaccess.gov/cfr/index.html .
ANDRA 2002-2005	ANDRA (2002-2005). <i>Projet HAVL-Argile Programme Scientifique 2002-2005</i> .
ANDRA 2004	ANDRA. <i>Commentaires sur le rapport provisoire de l'IEER</i> . 12 novembre 2004.
ANDRA BET 2002	ANDRA (2002) <i>Recherches pour le stockage des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue. Bilan des études et travaux</i> . 392 p. (Section Reconstructions Paléo-environnementales et Paléo-climatiques, Scénarios d'évolution future, pp. 221-233)
ANDRA Dossier 2001 Argile	ANDRA. <i>Dossier 2001 Argile, sur l'avancement des études & recherches relatives à la faisabilité d'un stockage de déchets à haute activité et à vie longue en formation géologique profonde. Partie A et Partie B</i> . Châtenay-Malabry: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, Décembre 2001.
ANDRA Géothermie 2004	ANDRA. <i>Site Meuse/haute-Marne: Géothermie: Inventaire de nouvelles données</i> . Indentification: C.NT.ASMG.04.0001. Date d'origine: 18/03/2004.
ANDRA Scellement 2001	ANDRA. <i>Projet HAVL: Scénario de défaut de scellement et/or de transfert par la zone endommagée autour des scellements et des bouchons de BO: Definition</i> . Indentification: SUR NT ADSU 00-038/B. Date d'origine: 24/07/00. Rév. B : 30/03/01
Bauer, Pépin, and Lebon 2003	C. Bauer, G. Pépin and P. Lebon. <i>EDZ in the performance assessment of the Meuse/Haute-Marne site: conceptual model used and questions addressed to the research program</i> . European Commission - EDZ cluster conference, November 3-5, 2003. [Conference: Impact of the Excavation Disturbed or Damaged Zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories.] ANDRA C.TR.ADSU.03.031.B. On the Web at http://www.sckcen.be/sckcen_en/activities/conf/conferences/related_sck/20031103/Lectures/IC6.pdf .
BIOCLIM D1 2001	BIOCLIM. <i>Deliverable D1, Environmental Change Analysis</i> . Châtenay-Malabry: ANDRA, 2001. On the web at http://www.andra.fr/bioclim/pdf/d1.pdf .
BIOCLIM D7 2003	BIOCLIM. <i>Deliverable D7: Continuous climate evolution scenarios over western Europe (1000km scale)</i> . Work package 2: Simulation of the future evolution of the biosphere system using the hierarchical strategy. Châtenay-Malabry: ANDRA, 2003. On the Web at http://www.andra.fr/bioclim/pdf/d7.pdf .
BIOCLIM D8a 2003	BIOCLIM. <i>Deliverable D8a: Development of the rule-based downscaling methodology for BIOCLIM Workpackage 3</i> . Work package 3: Simulation of the future evolution of the biosphere system using the hierarchical strategy. . Châtenay-Malabry: ANDRA, 2003. On the Web at http://www.andra.fr/bioclim/pdf/d8a.pdf .

BIOCLIM D8b 2003	BIOCLIM. <i>Deliverable D8b: Development of the physical/statistical downscaling methodology and application to climate model CLIMBER for BIOCLIM Workpackage 3.</i> Work package 3. : Simulation of the future evolution of the biosphere system using the hierarchical strategy. . Châtenay-Malabry: ANDRA, 2003. On the Web at http://www.andra.fr/bioclim/pdf/d8b.pdf .
Brulhet 2001	J. Brulhet. (2001) Analyse des variations climatiques possibles a l'échelle des prochains 20 000 ans. Projets Nouveaux. Stockage des déchets radifères. Note techniques. ANDRA. (Identification: F NT AGE 01-017). Date d'origine : 09/02/2001.
Clark et al. 2002	Peter U. Clark, Nicklas G. Pias, Thomas F. Stocker, & Andrew J. Weaver. "The role of the thermohaline circulation in abrupt climate change." <i>Nature</i> 415 , 21 February 2002, pp. 863-869.
CLIS	Comité local d'information et de suivi du laboratoire de Bure. Réunions et colloques. Bar-le-Duc, France. See the CLIS website at http://www.clis-bure.com/cadres/c_reunions.html .
CNE 1997	Commission Nationale d'Evaluation Relative aux Recherches sur la Gestion des Déchets Radioactifs. <i>Rapport d'Evaluation N° 3</i> . Paris: CNE, Septembre 1997.
CNE 2000	Commission Nationale d'Evaluation Relative aux Recherches sur la Gestion des Déchets Radioactifs. <i>Rapport d'Evaluation N° 6</i> . Paris: CNE, Juin 2000.
Dickson et al. 2002	Bob Dickson, Igor Yashayaev, Jens Meincke, Bill Turrell, Stephen Dye & Juergen Holfort. "Rapid freshening of the deep North Atlantic Ocean over the past four decades." <i>Nature</i> 416 , 25 April 2002. pp. 832-837, 2002. On the Web at http://asof.npolar.no/library/pdf/dicksonetal.pdf .
Frisia et al. 2000	Silvia Frisia, Andrea Borsato, Ian J. Fairchild, and Frank McDermott. "Calcite fabrics, growth mechanisms, and environments of formation in speleothems from the Italian Alps and southwestern Ireland." <i>Journal of Sedimentary Research</i> 70 (5) September 2000, pp.1183-1196.
Frisia et al. 2003	Silvia Frisia, Andrea Borsato, Nereo Preto, Frank McDermott, (2003) Late Holocene annual growth in three Alpine stalagmites records the influence of solar activity and the North Atlantic Oscillation on winter climate. <i>Earth and Planetary Science Letters</i> 216 (2003) pp. 411-424.
Gagosian 2003	Robert B. Gagosian, "Abrupt Climate Change: Should We Be Worried?" prepared for a panel on abrupt climate change at the World Economic Forum, Davos, Switzerland, January 27, 2003. Woods Hole, MA: Woods Hole Oceanographic Institution, 2003. On the Web at http://www.whoi.edu/institutes/occi/images/Abruptclimatechange.pdf .
Gopal and Makhijani 2001	Sriram Gopal and Arjun Makhijani. <i>Setting Cleanup Standards to Protect Future Generations: The Scientific Basis of the Subsistence Farmer Scenario and Its Application to the Estimation of Radionuclide Soil Action Levels (RSALs) for Rocky Flats</i> . Takoma Park, MD: Institute for Energy and Environmental Research, December 2001. On the Web at http://www.ieer.org/reports/rocky/toc.html .
Gros 2003	J.C. Gros. <i>Etat des connaissance sur la présence de ressources géothermiques dans le sous-sol du Site de l'Est</i> . IRSN/DPRE/SERGD. Rapport DPRE/SERGD 03-12 bis. Fontenay-aux-Roses: Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, Département de protection de l'environnement, Mai 2003.

Housse et Maget 1976	B. Housse et Ph. Maget. <i>Potentiel géothermique du Bassin Parisien. Compte rendu de fin de contrat d'une étude réalisée par le BRGM et Elf Aquitaine</i> , Financée par la DGRST (Comité: A.C.C. Géothermie) - Contrat no 74-7-0990, 125 p., 29 pl. Hors-texte, Mai 1976. As cited by Gros 2003.
IAEA BIOMASS 6	IAEA. <i>"Reference Biospheres" for solid radioactive waste disposal: Report of BIOMASS Theme 1 of the BIOSphere Modelling and ASSEssment (BIOMASS) Programme</i> . Part of the IAEA Co-ordinated Research Project on Biosphere Modelling and Assessment (BIOMASS). IAEA-BIOMASS-6. International Atomic Energy Agency, July 2003.
ICRP 81	International Commission on Radiological Protection. <i>Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste</i> . Annals of the ICRP, v. 28, no.4. ICRP Publication 81. Kidlington, Oxford, UK ; Tarrytown, NY, December 1998.
IPCC 2001	Intergovernmental Panel on Climate Change. <i>Climate Change 2001: The Scientific Basis</i> . Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by J. T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and D. C.A. Johnson. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. On the Web at http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1 .
Kautsky et al. 2000	Ulrik Kautsky, Allan Hedin, Fredrik Lindström, Lena Morén, Tönis Papp, Patrik Sellin & Jan-Olof Selroos. "The Safety Assessment of High Level Waste in Sweden- SR97." T-18-3, P-5-337. On the Web at http://www.irpa.net/irpa10/cdrom/00422.pdf . From the reports of the Topical Session: T-18: Management of Long-Lived and High-Level Radioactive Waste, of the 10th Congress of the International Radiation Protection Association, 14 – 19 May 2000, Hiroshima, Japan.
Maget et Rimbaud 1980	Ph. Maget et D. Rambaud. Possibilités géothermiques de la région "Champagne-Ardenne" – II Etude hydrogéologique de sites. Société Nationale pour l'Application de la Géothermie / GEOCHALEUR. Rapport BRGM / SGN no. 80 SGN 649 GTH / CHA, septembre 1980As cited by Gros 2003.
McDermott 2004	Frank McDermott. (2004) Palaeo-climate reconstruction from stable isotope variations in speleothems: a review. <i>Quaternary Science Reviews</i> 23 (2004) 901–918.
McDermott et al. 1999	Frank McDermott, Silvia Frisia, Yiming Huang, Antonio Longinelli, Baruch Spiro, Tim H.E. Heaton, Chris J. Hawkesworth, Andrea Borsato, Eddy Keppens, Ian J. Fairchild, Klaas van der Borg, Sophie Verheyden, Enrico Selmo. (1999) Holocene climate variability in Europe: Evidence from $\delta^{18}\text{O}$, textural and extension-rate variations in three speleothems. <i>Quaternary Science Reviews</i> 18 (1999) 1021-1038.
McGarry et al., 2004	Siobhan McGarry, Miryam Bar-Matthews, Alan Matthews, Anton Vaks, Bettina Schilman, Avner Ayalon. "Constraints on hydrological and paleotemperature variations in the Eastern Mediterranean region in the last 140 ka given by the δD values of speleothem fluid inclusions." <i>Quaternary Science Reviews</i> 23 (2004) 919–934
McManus et al. 2004	J.F. McManus, R. Francois, J.-M. Gherardi, L.D. Keigwin & S. Brown-Leger. "Collapse and rapid resumption of Atlantic meridional circulation linked to deglacial climate changes." <i>Nature</i> 428 , 834-837 (2004) <i>Letters to Nature</i> . Summary on the web at http://www.nature.com/cgi-taf/DynaPage.taf?file=/nature/journal/v428/n6985/abs/nature02494_fs.html .

NAS-NRC 1995	National Research Council. Committee on the Technical Bases for Yucca Mountain Standards. , <i>Technical Bases for Yucca Mountain Standards</i> . Committee on the Technical Bases for Yucca Mountain Standards, Board on Radioactive Waste Management, Commission on Geosciences, Environment, and Resources, National Research Council. Washington, DC: National Academy Press, 1995.
NAS-NRC 2002	National Research Council. Committee on Abrupt Climate Change. <i>Abrupt Climate Change: Inevitable Surprises</i> . Committee on Abrupt Climate Change, Ocean Studies Board, Polar Research Board, Board on Atmospheric Sciences and Climate, Division on Earth and Life Studies, National Research Council. Washington, DC: National Academy Press, 2002. Summary on the Web at http://www.nap.edu/books/0309074347/html .
Pigford 1995	Thomas H. Pigford. Appendix E: Personal Supplementary Statement of Thomas H. Pigford. In <i>Technical Bases for Yucca Mountain Standards</i> , by the Committee on Technical Bases for Yucca Mountain Standards, Board on Radioactive Waste Management, Commission on Geosciences, Environment, and Resources, National Research Council. Washington, DC: National Academy Press, 1995. pages 161-185.
Pigford 1997	Thomas H. Pigford. “The Yucca Mountain standard: proposals for leniency.” <i>Science for Democratic Action</i> , v. 6, no. 1, May 1997.
Pons-Branchu 2001	Edwidge Pons-Branchu (2001) <i>Datation haute résolution de spéléothèmes (²³⁰Th/²³⁴U et ²²⁶Ra/²³⁸U)</i> . Application aux reconstitutions environnementales autour des sites du Gard et de Meuse/Haute-Marne. Thèse de l'Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille. GdR FORPRO CNRS-ANDRA G0788. 12 décembre 2001
Rahmstorf et Ganopolski 1999	Stefan Rahmstorf and Andrey Ganopolski. “Long-term global warming scenarios computed with an efficient coupled climate model.” <i>Climatic Change</i> 43 (1999) pp. 353–367.
Règle N° III.2.f	Règle N° III.2.f (10 juin 1991) <i>Règles fondamentales de sûreté relatives aux installations nucléaires de base autres que reacteurs Tome III: production, contrôle et traitement des effluents et déchets. Chapitre 2: Déchets solides</i> .
Schwartz et Randall 2003	Peter Schwartz et Doug Randall. <i>An Abrupt Climate Change Scenario and Its Implications for United States National Security</i> . October 2003. On the Web at http://www.ems.org/climate/pentagon_climatechange.pdf . Report commissioned by the United States Department of Defense.
Serefiddin et al. 2002	F. Serefiddin, H.P. Schwarcz, and D.C. Ford. Paleotemperature reconstruction using isotopic variations in speleothem fluid inclusion water. . <i>Geochimica et Cosmochimica Acta</i> , 66 . Special Supplement. Abstracts of the 12th Annual V.M. Goldschmidt Conference, Davos, Switzerland, August 18-23, 2002, p. A697.
Texier et al. 2003	D. Texier, P. Degnan, MF Loutre, D. Paillard and M. Thorne. “Modelling sequential BIOSphere systems under CLIMate change for radioactive waste disposal. Project BIOCLIM.” In 10th International High-Level Radioactive Waste Management Conference, March 30-April 2, 2003, Las Vegas, Nevada. Chicago: American Nuclear Society, 2003. pp. 202-212. A copy on the Web at http://www.andra.fr/bioclim/publications/LasVegas.pdf .

Treble et al. 2003	Pauline Treble, J.M.G. Shelley, John Chappell. Comparison of high resolution sub-annual records of trace elements in a modern (1911-1992) speleothem with instrumental climate data from southwest Australia. <i>Earth and Planetary Science Letters</i> 216 (2003) 141-153.
US Court 2004	United States Court of Appeals for the District of Columbia Circuit, No. 01-1258, Nuclear Energy Institute, Inc. <i>contre</i> Environmental Protection Agency, Débat du 14 janvier 2004, Décision du 9 juillet 2004. On the Web at http://www.epa.gov/radiation/docs/yucca/dc_circuit_ruling.pdf .

Chapitre 2. Mécanique des roches

Jaak Daemen

Conclusions principales

Le programme de l'ANDRA sur la géomécanique aborde la plupart des principales questions géomécaniques dont la résolution est nécessaire. D'excellentes recherches en laboratoire et études de modélisation ont été achevées ou sont en cours, la poursuite de ces activités doit être vivement encouragée. Un travail de qualité sur le terrain (par exemple de diagrapie des forages) est en cours. Il ne peut cependant remplacer des investigations in situ à grande échelle.

Un problème crucial tient au fait que l'essai simulé d'un scellement de saignée dans le laboratoire souterrain risque de ne présenter qu'un intérêt marginal. Il est envisagé de procéder à cet essai très peu de temps après le creusement et après une très courte période de temps comparativement à la durée des exigences de performance, et même par rapport à la période pendant laquelle l'EDZ va réellement se développer, avant la mise en place du scellement. Ceci n'est ni convaincant ni satisfaisant. Il est difficile de comprendre comment et pourquoi l'augmentation de la composante de contrainte parallèle aux parois de la galerie réduirait la perméabilité dans cette direction ou comment un vérin plat pourrait simuler un scellement en argile gonflante, sinon de manière très rudimentaire.

Ni les essais de laboratoire, ni la modélisation, ni les essais sur le terrain envisagés sur la mécanique des roches ne semblent directement traiter des questions relatives à l'influence éventuelle de discontinuités sur divers aspects de la performance du stockage, stabilité du creusement, EDZ, déformations à long terme, réversibilité, scellement, remblai et charge des déchets mis en place, exigences de soutènement/armature. Les études in situ nécessaires prendront, au minimum, plusieurs années.

Il est important d'effectuer des recherches sur les effets des cycles de déshydratation/réhydratation dans des roches comme les argilites. Les essais de durabilité par immersion sont assez largement utilisés, particulièrement pour les siltites, et peuvent être pratiqués rapidement et à un coût modique. Ils peuvent fournir un outil de recherche efficace pour l'étude de la variabilité spatiale ainsi que de l'hétérogénéité d'une éventuelle détérioration de l'argilite. Aucun ne semble être envisagé.

L'ANDRA reconnaît que l'ancrage des scellements pourrait demander le retrait du soutènement/de l'armature, ainsi qu'un creusement supplémentaire, et que ces activités doivent être effectuées sans réactiver la zone perturbée/endommagée et, surtout, sans engendrer une propagation plus profonde de ce dommage ou de cette perturbation. On ne sait toutefois pas très bien si une attention particulière a été accordée à cette question pour déterminer si et comment cela pourrait être réalisé, notamment, étant donné qu'au moment où cette opération pourrait avoir lieu, il paraît probable que le soutènement/l'armature sera peut-être en place depuis de nombreuses années, voire des

décennies, et aura été soumis aux effets combinés de lourdes charges, de fortes contraintes, et peut-être de déformations importantes.

Les variables fondamentales décrivant l'interaction roche-support laquelle détermine l'ampleur et la gravité des éventuels dommages aux ouvrages sont bien définies. Par contre il n'est pas précisé s'il est envisagé des études in situ pour déterminer numériquement les actions à prendre pour réduire les dommages à un niveau acceptable, ou même si cette approche est réellement prise en compte dans les recherches, la conception ou la programmation du stockage.

Notre crainte que le choix, par l'ANDRA, de la résistance de la roche n'est pas conservatif est renforcée par des éléments indiquants que des dommages peuvent être initiés bien avant que la résistance maximale soit atteinte et que la résistance à de faibles taux de charges apparaît inférieure, d'une façon mesurable, à ce qu'elle est pour des taux de charge plus élevés. Le choix de valeurs de dimensionnement éventuellement non conservatrices pour la résistance est particulièrement troublant au vu des exigences de stabilité à long terme pour cette structure et du besoin reconnu de réduire au maximum l'ampleur de l'EDZ, et l'intensité des dommages quelconques dont elle pourrait souffrir. On suppose que les observations in situ approfondies envisagées dans le laboratoire souterrain permettront une meilleure estimation de ce que seraient les « meilleures » paramètres réels, et seront utilisées pour de tels exercices d'étalonnage.

Recommandations

Compréhension approfondie de l'EDZ : Il est important de mettre en œuvre tous les moyens possibles pour arriver à une compréhension approfondie de l'EDZ, de son comportement et de ses caractéristiques, notamment de son évolution dans le temps. Il serait très souhaitable que l'ANDRA s'engage sur un programme prolongé d'essais géomécaniques in situ.

Compréhension in situ et essai de scellement : Il semblerait plus pertinent d'essayer d'abord de développer une connaissance in situ plus réaliste de l'EDZ, de ses propriétés et de ses caractéristiques, avant de concevoir un système de scellement. Il est essentiel qu'un véritable essai de scellement soit effectué in situ, en utilisant les technologies et les matériaux qui sont réellement prévus pour la fermeture finale de l'installation de stockage.

Recherche approfondie sur les scellements : Un programme approfondi et réaliste de recherche in situ sur les scellements devrait comporter des recherches sur la façon de procéder avec l'EDZ, de mettre en place les scellements et de les tester. Il serait très souhaitable qu'un tel programme comporte un volet plus complet et détaillé sur l'influence des pratiques de construction sur le développement et les caractéristiques de l'EDZ. Des investigations complémentaires pourraient comporter une recherche sur les conséquences du retrait du soutènement/de l'armature, sur une éventuelle réactivation de la propagation de l'EDZ, et sur les technologies qui pourraient être utilisées pour réduire

au minimum ou prévenir une telle réactivation. Dans l'idéal, une telle recherche devrait être menée dans un emplacement où le soutènement et l'EDZ ont subi les mêmes effets conjugués de charges mécaniques, thermiques, hydrologiques et chimiques (par exemple, à l'endroit où un essai avec éléments chauffants à l'échelle d'une alvéole a été effectué). Ces types d'essais nécessiteraient un engagement minimum de plusieurs années.

Echelle spatiale des essais : Etant donné la variabilité et l'hétérogénéité intrinsèques de la plupart des masses rocheuses, et certainement de celles qui sont stratifiées, les essais doivent être pratiqués à une échelle spatiale permettant de prendre en compte un volume de masse rocheuse raisonnablement représentatif et sur une durée suffisamment longue pour que le facteur temporel du comportement soit correctement intégré. Cet exercice devrait comprendre des essais et une modélisation plus explicite des propriétés et du comportement des discontinuités, par exemple des plans de stratification et des diaclases dans la roche hôte.

Mont Terri et Bure : Il serait extrêmement souhaitable que l'ANDRA démontre plus formellement une éventuelle analogie entre Mont Terri et Bure.

Impact des pratiques de construction des ouvrages : L'ANDRA devrait prendre en compte plus explicitement l'impact des pratiques de construction sur la performance de la sûreté du stockage, et envisager des recherches sur les choix de méthodes de construction dans le laboratoire souterrain, probablement après 2005. Il serait préférable d'essayer de réduire au minimum des dommages de ce type par des contrôles de la construction.

Confiance statistique dans les essais de laboratoires dans certains domaines : Pour certains types d'essais en laboratoire le nombre d'essais effectués pourrait être trop limité pour avoir une signification statistique. Nous recommandons que des essais supplémentaires des types entrant dans cette catégorie soient effectués aussitôt que possible, c'est-à-dire aussitôt que des spécimens peuvent être obtenus à partir des puits et/ou de la niche.

Perte de résistance à des températures élevées : Bien que les résultats soient très loin d'être clairs, il semble que si l'argilite est exposée à des températures situées entre 80 et 100 °C il s'ensuit une perte de résistance. Une telle possibilité est plus que suffisante pour justifier des recherches plus approfondies. De ce point de vue des essais in situ avec des forages munis d'éléments chauffants sont vivement recommandés.

2.1 Introduction

Ce chapitre examine l'état actuel du programme de recherche de l'ANDRA sur la mécanique des roches visant à étudier la faisabilité d'un stockage sûr en couche géologique profonde pour les déchets radioactifs dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien du site de Bure. Mise à part une visite aux alentours du site et sur le site même, cet examen se fonde principalement sur une consultation de la littérature scientifique. La

visite géologique, guidée par Messieurs Mourot et Kossura, s'est montrée particulièrement instructive. Elle nous a donné une perspective des aspects régionaux de la géologie et tout particulièrement de la structure géologique du secteur. Nous avons ainsi pu avoir une meilleure compréhension de la disposition des formations sédimentaires et, surtout, des aspects structurels dominants et des failles.

La visite du laboratoire du site de Bure s'est montrée très utile pour mieux comprendre la disposition des installations et les travaux achevés, en cours et prévus. La possibilité d'examiner des diagraphies détaillées des forages, ainsi que la méthode choisie pour les diagraphies des puits et certains essais en laboratoire se sont avérées instructives. Par contre nous avons regretté de n'avoir eu qu'un accès limité aux carottes des forages. La visualisation des déblais provenant du fonçage du puits n'a été que d'un intérêt limité étant donné que le fonçage du puits n'avait pas encore atteint la couche callovo-oxfordienne.

Comme la littérature concernée est très volumineuse, et que certains documents sont difficilement accessibles ou ne sont tout simplement pas disponibles, et que de plus les délais impartis à cette étude sont limités, il est probable que cette analyse de la documentation sera loin d'être complète et n'arrivera pas au degré de précision qui aurait été souhaitable. Par conséquent cette analyse critique pourra comporter des lacunes.

2.2 Exigences réglementaires

La règle N° III.2.f⁸¹ identifie un certain nombre de questions se rapportant à la mécanique des roches qui doivent être abordées. Plusieurs d'entre elles sont traitées du point de vue technique dans les sections ci-dessous ;

La section 2.3, *Le système de confinement*, inclut dans la partie *les barrières ouvragées* «... des matériaux de rebouchages des cavités de stockage et des forages, de remblayages des galeries et de scellement des puits d'accès. »

La section 3.1, *Objectif*, confirme que “Les caractéristiques du site retenu, ... la conception des barrières artificielles (colis, barrières ouvragées) et la qualité de leur réalisation constituent le fondement de la sûreté du stockage. »

La section 4.1, *Remarques préliminaires*, indique que “Le site et les barrières artificielles de confinement devront jouer un double rôle:

- protéger les déchets en s'opposant à la fois aux circulations de l'eau au contact des déchets et aux actions humaines intrusives;
- limiter et retarder, pendant le délai nécessaire à une décroissance radioactive suffisante des radionucléides concernés, le transfert vers la biosphère des substances radioactives éventuellement relâchées par les déchets.

⁸¹ Règle N° III.2.f

... à long terme et après décroissance d'une partie importante de la radioactivité contenue dans les déchets, la barrière géologique et les matériaux de scellement des puits devront pouvoir assurer à eux seuls le confinement."

La section 4.3, *Les barrières ouvragées*, stipule que

"Après remplissage des ouvrages, les vides créés lors de la réalisation du stockage devront être comblés pour rétablir autant que possible l'étanchéité du milieu et éviter que les ouvrages ne constituent des drains préférentiels pour les eaux souterraines et, le cas échéant, pour éviter des tassements préjudiciables aux couches géologiques surmontant la formation d'accueil. Les dispositions prévues à cet égard devront être précisées et justifiées. Par ailleurs, les forages de reconnaissance devront être efficacement scellés dès qu'ils ne seront plus utiles pour la connaissance ou la surveillance du site."

De plus, dans cette section, la règle spécifie et donne des détails sur les types de matériaux de remblayage, leurs fonctions et les exigences de comportement que chaque type doit satisfaire. L'accent est particulièrement mis sur les matériaux de remblayage et de scellement pour les puits d'accès pour répondre au besoin d'assurer une qualité et une longévité compatibles avec le rôle qui leur est assigné dans le système des barrières, compte tenu de la décroissance de la radioactivité des déchets au fil des années. Dans cette section la règle identifie aussi clairement le potentiel de cicatrisation, tout particulièrement dans les roches sédimentaires, et la nécessité de l'étudier.

La constructibilité, ou la faisabilité du développement d'un site de stockage sont abordées dans la section 4.4.2 de la règle, Critères importants, où apparaît l'exigence que la construction du site de stockage ne doit pas altérer significativement la barrière géologique. De plus, les alvéoles de stockage doivent se trouver dans un milieu qui ne nécessitera pas un agrandissement (une excavation supplémentaire) pour accueillir les déchets à stocker. Cette section de la règle exige également très clairement que :

« Des études, notamment à l'aide d'une amélioration couplée des phénomènes thermiques et mécaniques, devront être effectuées pour étudier l'influence du mode et des séquences de mise en place des déchets sur les effets mécaniques dans le stockage et en particulier du temps de refroidissement préalable et de la densité du stockage des déchets.»

La section 4.5, *Le concept de stockage*, exige que les perturbations causées par les travaux d'excavation soient réduites au maximum. La conception et la construction des puits d'accès devraient permettre, d'une part, de minimiser tout risque de circulation d'eau et, d'autre part, de prendre en compte l'objectif d'un scellement effectif une fois les opérations terminées.

La section 5.1 de la règle stipule "Afin de vérifier que les objectifs de conception du stockage sont atteints, l'évaluation de la sûreté post-fermeture devra porter sur les trois aspects complémentaires suivants :

- justification du caractère favorable des performances de chacune des barrières de confinement, ...
- évaluation des perturbations apportées par la création du stockage et vérification que ces perturbations restent acceptables vis-à-vis du niveau de qualité choisi pour chacune des barrières, en particulier de la barrière géologique; on considérera notamment les perturbations liées au creusement du stockage, et aux effets thermiques, thermomécaniques et hydrogéologiques associées à la charge thermique des colis ainsi que les modifications éventuelles des écoulements et des caractéristiques chimiques de la formation géologique,
- ..."

Bien que la Section 5.3. *Situations prises en compte* semble porter principalement sur la barrière géologique, le texte est suffisamment général pour être interprété comme exigeant la modélisation des barrières ouvragées c'est-à-dire notamment le remblaiement et le scellement à divers moments spécifiés après la mise en place et la fermeture. A l'appui de l'analyse de sûreté, elle demande une modélisation et une caractérisation indiquant que les connaissances sur les barrières ouvragées devront certainement être suffisantes et adéquates pour permettre ces modélisations et caractérisations.

La situation de référence décrite dans la section 5.3.1 précise que "Les événements à considérer sont:

- les événements liés à la présence du stockage: l'impact de ce dernier se traduira par la mise en jeu de processus associés à l'émission de chaleur, à des modifications mécaniques, physico-chimiques ou encore à la désaturation du milieu naturel autour du stockage. L'ensemble des processus de dégradation progressive des barrières artificielles (corrosion des conteneurs et des matrices de confinement, vieillissement des barrières ouvragées et des scellements...) devra être considéré;
- »

La section 5.4 *Modélisation*, identifie des sous-systèmes ayant besoin d'être modélisés, ainsi que les exigences de modélisation. Du point de vue de la mécanique des roches « le champ proche, qui comprend les colis, les matériaux de remplissage des cavités, des galeries et des puits (barrières ouvragées) et la partie de la barrière géologique directement affectée par le stockage de déchets. » est particulièrement important.

Section 6, *Assurance de la qualité*, exige de façon explicite que la conception des barrières ouvragées soit conforme aux impératifs de l'assurance qualité et prenne en compte le rôle qui leur sera assigné dans la performance du confinement.

La section 1.1 de l'Annexe N° 1 stipule, dans la section 1, *Investigations à mener en surface*, que

1.1. « *Les objectifs fondamentaux doivent être, pour chaque site, de:*

- déterminer en premier lieu ses caractéristiques lithologiques, structurales, pétrographiques, hydrogéologiques, géomécaniques, géochimiques et tectoniques

- afin en particulier de le situer par rapport aux critères de choix de site (chapitre 4.4);
- rassembler les éléments contribuant à la modélisation du site en vue de l'évaluation de sa sûreté.

Ces objectifs pourront être atteints de façon complémentaire par des investigations de surface, des forages de reconnaissance, et par l'étude des matériaux extraits de ces forages (eau, gaz et roche). »

La section 1.3 de l'Annexe N° 1 demande que, aussitôt la formation atteinte, tous les efforts soient faits pour déterminer in situ les propriétés mécaniques et l'état de contrainte naturel de la roche en vue de s'assurer que l'information nécessaire est obtenue pour prévoir le comportement hydro-thermomécanique.

La section 1.4 de l'Annexe N°1 *Etude des matériaux extraits des forages* précise que:

« Il sera nécessaire de caractériser les roches de la barrière géologique à partir des échantillons prélevés sur les carottes de forage, du point de vue minéralogique, chimique, physique et mécanique. Une attention particulière sera portée aux paramètres mécaniques de l'argile et du sel. Pour l'ensemble des milieux, devront être mesurés dans le cadre du programme de reconnaissance:

- les paramètres mécaniques (résistance, déformabilité, viscosité)
- [...]

L'anisotropie de ces paramètres sera évaluée.

[...]

Des expériences conduites sur échantillons permettront également dès ce stade de mettre en évidence certains effets couplés (thermiques, mécaniques et hydrauliques) et d'évaluer les coefficients d'échange entre les fluides et les phases minérales du système. »

La Section 2.1 de l'Annexe N°1 énumère les investigations à mener dans le laboratoire souterrain. Elle impose que la roche soit testée de manière à ce que ce test la perturbe le moins possible tout en tenant compte des phénomènes naturels et des changements induits par la construction du site de stockage. Cette section demande que les objectifs du laboratoire souterrain comportent la détermination des méthodes de creusement, de rebouchage et de scellement des cavités.

La Section 2.2, *Mesures in situ et sur les échantillons*, de l'Annexe N° 1, indique que

« Des mesures devront être effectuées pour confirmer ou préciser les valeurs des paramètres et pour apprécier leur anisotropie, leur distribution spatiale, ainsi que les effets d'échelle.

Parmi les investigations à mener, il conviendra:

- d'évaluer le tenseur des contraintes initiales;
- d'apprécier à partir des cavités creusées dans le laboratoire souterrain la forabilité de la roche ainsi que son comportement en parois (risque d'écaillage pour les roches dures, convergence pour les roches plastiques);
- de mesurer les effets mécaniques différés (relaxation, fluage) »

La Section 3 de l'Annexe N°1 de la Règle spécifie l'instrumentation qu'il faudra mettre en place en vue de surveiller l'évolution du site pendant la période de mise en place des déchets. Il faudra surveiller les déplacements et, plus généralement, le comportement des parois des excavations qui devront rester ouvertes sur une longue durée (certains forages de reconnaissance, les puits d'accès, les galeries de service) ;

La section 4.3 de l'Annexe N°1 énumère plus particulièrement les exigences pour les sites argileux pour lesquels il est important de déterminer la nature et l'importance des hétérogénéités géotechniques au sein de la formation hôte.

L'Annexe N° 2 identifie la sélection des situations qui doivent être évaluées dans le cadre de l'analyse de sûreté dont, dans la Section 1, la situation de référence : « Les événements liés à la présence du stockage : l'impact de ce dernier se traduira par la mise en jeu de processus associés à l'émission de chaleur, à des modifications mécaniques, physico-chimiques ou encore à la désaturation du milieu naturel autour du stockage. L'ensemble des processus de dégradation progressive des barrières artificielles (corrosion des conteneurs et des matrices de confinement, vieillissement des barrières ouvragées et des scellements...) devra être considéré. »

La section 1.1 de l'Annexe N° 2 *Situation évolutive du système due à la présence du stockage*, spécifie :

« Les effets des travaux de creusement des cavités de stockage sur les propriétés hydrauliques de la roche et l'influence des effets transitoires autour des ouvrages sur le comportement hydraulique seront appréciés.

En ce qui concerne le dégagement thermique des déchets C, il faudra évaluer:

- les déformations et les contraintes induites par les effets thermomécaniques sur la formation hôte;
- les conséquences de l'ensemble des effets ci-dessus sur les formations sus-jacentes, pour les sites argileux et salifères. ...
- pour un site argileux:
 - l'importance des phénomènes de déshydratation des minéraux argileux en fonction de la température et de la distance au stockage; »

2.3 Les questions techniques

Les principales questions techniques de la mécanique des roches associées au stockage des matériaux radioactifs sont

- la réversibilité (proche de la "retrievability" [récupérabilité]), un concept souvent utilisé dans les autres programmes de gestion des déchets nucléaires.
- la stabilité à long terme de la zone de stockage et des excavations d'accès,
- la zone perturbée par l'excavation (EDZ),
- les problèmes de constructibilité et
- les impacts des travaux de construction sur la performance du site de stockage, le comportement de la mécanique des roches.

La prise en compte du dernier point est une question complexe qui comporte de nombreux aspects. De manière générale, il englobe l'analyse du comportement thermo-hydro-chimio-mécanique de la zone excavée à court et long termes. Plus précisément, l'état de contraintes dans le massif rocheux non perturbé et les changements de contraintes induits par les travaux de construction, notamment les effets de la mise en place des matériaux radioactifs, doivent faire partie de cette analyse. Les efforts de modélisation comprennent la prise en compte de l'influence des effets thermiques, hydrologiques, et chimiques sur le comportement mécanique et le scellement des voies d'accès

2.3.1 Réversibilité

Les aspects légaux, sociaux et techniques de la réversibilité sont discutés de façon très claire par la CNE.⁸² La "retrievability", une approche très voisine, est une exigence absolue de certains programmes de gestion des déchets nucléaires.⁸³ Cependant, il n'existe aucune unanimité sur la désirabilité de la "retrievability" comme le montrent les recommandations récemment émises par le comité chargé des critères pour la sélection d'un site de stockage en Allemagne. Ce comité reconnaît que des conflits intrinsèques peuvent exister entre l'exigence de "retrievability" et le confinement ultime des déchets.⁸⁴ Bien que la Suède ne soit pas explicitement tenue par la loi de maintenir l'option de reprendre les déchets, le sujet a été étudié de façon approfondie.⁸⁵ Le maintien de la réversibilité et/ou de la "retrievability" a des implications pour de nombreux aspects de la performance du site de stockage.⁸⁶ De nombreux autres sujets abordés ici, notamment le comportement mécanique des roches au fil des années, la stabilité du creusement, la surveillance in situ et la modélisation, jouent un rôle essentiel dans la démonstration de la réversibilité.

⁸² CNE « réversibilité », 1998

⁸³ Par exemple pour le programme américain, Boyle et Rowe, 1998, Section 8.5

⁸⁴ AkEnd, 2002, Section 2.1.7

⁸⁵ Par exemple. SKB, 2001, Section 14.5.6, Kalbantner et Sjöblom, 2000

⁸⁶ Un résumé, très instructif, sur la différence entre réversibilité et "retrievability" est présenté dans le rapport CNE, 2001, pp.109-10

2.3.2 La stabilité à long terme du creusement

Généralement, la stabilité à long terme des creusements souterrains dans lesquels les matériaux radioactifs sont stockés et celle des creusements qui permettent d'y accéder sont considérées comme souhaitable. (Les sites de stockage dans le sel font exception. Dans ce cas, la fermeture progressive des cavités encapsulant étroitement les matériaux dans une roche hôte presque imperméable est considérée comme un avantage.) La stabilité à long terme est souhaitable puisqu'elle :

- facilite le maintien de l'option de réversibilité
- réduit les charges sur les matériaux stockés (et par conséquent réduit le risque de corrosion des conteneurs et/ou des surconteneurs),
- réduit la taille de la zone perturbée, et le risque associé aux mouvements d'eaux favorisés au travers de ces zones, et
- facilite la conception et la mise en place des scellements permanents.

Dans les approches techniques conventionnelles quelques peu simplifiées sur la stabilité du creusement souterrain, la stabilité à long terme est souvent traitée en termes de temps de stabilité sans soutènement.⁸⁷ Cette approche est peut être acceptable pour les ouvrages d'ingénierie de routine, néanmoins elle reste entachée d'un grand nombre d'incertitudes. Pour toute extrapolation, même légèrement au-delà des pratiques courantes d'ingénierie (au delà de 50 à 100 ans ?), elle doit être considérée comme très problématique.

Dans le contexte des sites de stockage de déchets nucléaires, il est probablement important d'insister sur le fait que le terme "stabilité à long terme", peut avoir plusieurs sens. Il a par exemple été utilisé pour décrire l'absence d'instabilités sismiques affectant l'ensemble de la masse rocheuse à grande échelle,⁸⁸ plutôt que comme un terme se rapportant spécifiquement, principalement, ou exclusivement aux excavations souterraines. Dans le contexte de cette évaluation du programme d'études et de recherches de l'ANDRA, ce chapitre ne traite que de la stabilité des excavations souterraines.

2.3.3 Zone perturbée par l'excavation (EDZ)

Il est clairement reconnu que les excavations produisent une zone perturbée ou endommagée. Cette zone entoure de manière générale les cavités et s'étend à une certaine profondeur dans la masse de la roche à proximité. Au niveau le plus élémentaire et le moins préjudiciable une telle perturbation peut consister purement et simplement en une redistribution des contraintes autour de l'excavation.⁸⁹ Il arrive souvent que la redistribution des contraintes dépasse la résistance de la roche. Dans ces conditions la

⁸⁷ Par exemple Hoek et Brown, 1980, pp 25, 289 ; Fairhurst, 1999, p. 17

⁸⁸ Par exemple ANDRA Résultats, 1996, section 1.5 : Stabilité Géologique

⁸⁹ Par exemple Hoek et Brown, 1980, p. 87, p. 101 et après ; Hoek et al., 1995, p. 66

roche autour des cavités, n'absorbe plus les contraintes et se fracture. La « fracturation » autour des excavations est un phénomène complexe, pouvant se traduire par la création de fractures fraîches dans la roche intacte, ainsi que le glissement et/ou l'ouverture de plans fragiles préexistants, par exemple des plans de stratification et/ou des diaclases. Une des difficultés majeures pour le confinement souterrain des matériaux radioactifs tient au fait que la zone perturbée autour des excavations, en particulier en situation de dépassement de la résistance, pourrait entraîner le développement de voies d'écoulement préférentielles, par exemple parallèles aux excavations, et pourrait rendre le scellement des excavations plus difficile.

L'importance attribuée à la zone perturbée dans les programmes de gestion des déchets nucléaires est soulignée par le fait que de nombreux programmes ont consacré une recherche approfondie à ce sujet.⁹⁰ De Marsily et al.⁹¹ sont parmi les nombreux auteurs qui ont attiré l'attention sur l'importance de la zone perturbée qui pourrait éventuellement jouer un rôle de court-circuit pour l'écoulement.

L'ANDRA elle-même a pleinement reconnu l'importance de l'EDZ pour diverses raisons, en particulier vis-à-vis de la sûreté d'ensemble du site de stockage (confinement, isolation), et projette de traiter en détail les incertitudes relatives à l'EDZ, par la modélisation et en particulier par des études in situ approfondies.⁹² La Commission nationale d'évaluation est très claire sur la grande importance qu'elle attache à la question de l'EDZ.⁹³ Nous partageons cet avis; c'est une des principales questions soulevées par notre examen du programme de recherche de l'ANDRA.

L'ANDRA a obtenu des informations considérables sur le potentiel du développement de l'EDZ à partir d'informations recueillies par des calculs sur l'ovalisation par rupture de parois des forages.

2.3.4 Comportement mécanique de la roche et du massif rocheux

Le comportement mécanique de la roche dans laquelle les matériaux radioactifs doivent être placés est un aspect fondamental de la performance du site. Il doit être connu en détail, parce qu'il influence de nombreux aspects de la performance du site de stockage et de l'évaluation de sûreté. Chronologiquement :

- Il aura d'abord une influence significative sur la constructibilité, et sur le coût de construction.
- Deuxièmement, il déterminera des exigences de soutènement et d'armatures.

⁹⁰ Par exemple Sugihara et al., 1999, Chandler, 1999, Sato et al., 2000

⁹¹ De Marsily et al., 2002

⁹² Par exemple ANDRA Référentiel Géologique Tome 5, 2001, Chapitre III, ANDRA Programme prévisionnel 1999, ANDRA Cahier des charges REP, ANDRA Cahier des charges SUG, 2001, ANDRA Cahier des charges E-GIS, 2000. Voir aussi CNE 2001, 2003, pp 27-28, 31, 34-35, 47

⁹³ CNE, 2003, p. 26 ; Annexe A du chapitre 5, pp 47-48

- Troisièmement, il pourra influencer la réversibilité : les alvéoles de stockage et les galeries d'accès demeureront-elles suffisamment stables, sur une période suffisamment longue, pour permettre de retirer les matériaux radioactifs, si cela devait devenir souhaitable ou nécessaire ? Bien qu'en principe cela soit certainement possible, creuser à nouveau des alvéoles de stockage effondrées, sans aucun doute, compliquerait considérablement la reprise des déchets stockés, et la rendrait plus dangereuse.
- Quatrièmement, au fil des années, il influencera (i) le type de charge qui pourrait se développer sur les matériaux stockés et, (ii) le type de déformations que la roche pourrait subir, avec comme conséquence un impact éventuel sur l'écoulement de l'eau et des gaz.
- Cinquièmement, il déterminera l'ampleur et les caractéristiques de n'importe quelle zone perturbée par l'excavation, et par conséquent les scellements qui seront nécessaires.
- Finalement, il déterminera la charge et la déformation auxquels tous les remblayages et/ou scellements pourront être soumis.

La caractérisation du comportement mécanique de la roche hôte d'argilite est particulièrement importante parce que ces matériaux sont notoirement difficiles à caractériser.⁹⁴ Typiquement, ces roches, et les massifs rocheux qui en sont constitués, sont nettement affectés, parfois très fortement, par des influences environnementales, par exemple par l'humidité et les changements de la teneur en humidité, ce qui renforce la difficulté à prédire leurs comportements, particulièrement à long terme. De plus, les effets chimiques et thermiques pourraient affecter encore plus le comportement mécanique des argilites. Par conséquent il est nécessaire de les inclure dans des études dont l'objectif est de prédire le comportement à long terme de ces matériaux

2.3.5 Constructibilité

Bien que la constructibilité puisse apparaître une nécessité évidente pour une installation souterraine, elle a, dans le contexte actuel, des implications à la fois plus larges et plus étroites que le simple sens littéral d'être constructible. Elle a des implications importantes tant sur le coût que sur la performance, cette dernière étant d'une importance cruciale pour une installation nucléaire. C'est vraisemblablement pour ces raisons que la constructibilité est l'un des critères recommandés par la règle française de sûreté pour l'implantation d'un site de stockage.⁹⁵

⁹⁴ Par exemple Lashkaripour, 2002

⁹⁵ Par exemple Hoorelbeke et al., 2003, section 2

2.3.6 Les effets de la construction sur la performance du site de stockage

C'est un fait bien établi qu'une construction faite sans précautions/négligée, notamment le creusement effectué avec des explosifs, peut avoir un effet très néfaste sur la roche avoisinante.⁹⁶ En raison de l'impact important que ce genre de dommages pourrait avoir sur la performance du site de stockage (voir section 2.2.3 sur l'EDZ), il est souhaitable, sinon impératif, que tout dommage causé par l'excavation soit limité à un niveau acceptable dicté par les exigences du confinement des déchets nucléaires. De même, l'interaction soutènement/armature, notamment avec des roches plus tendres déterminera quel déplacement ou convergence sera autorisé. Un déplacement ou une convergence excessive sont susceptibles d'engendrer un plus grand volume poral dans la roche avoisinante. Pour cette raison l'enchaînement des étapes de la construction, la rigidité du soutènement/de l'armature, et le moment de son installation, peuvent être des variables importantes pour contrôler l'EDZ. Les travaux de construction devraient être planifiés, conçus, sous traités, mis en œuvre, et supervisés/surveillés en conséquence. L'ANDRA est très consciente de ces facteurs, et les a analysés à plusieurs reprises.⁹⁷ Il est important de souligner que la majorité des dommages intervenant pendant la construction seront susceptibles d'être, au moins partiellement, permanents. Il est possible qu'un certain degré de cicatrisation, de scellement, de fermeture des volumes poraux, etc. puisse se produire, avant ou après la fermeture. Néanmoins, il sera, en toute probabilité difficile de démontrer de façon fiable ces avantages "curatifs", et par conséquent de s'appuyer sur eux pour les évaluations de performance. Il est par exemple tout à fait possible qu'intervienne une reconstruction d'un état de contraintes plus uniforme en raison d'une convergence sur une armature rigide. Mais il est loin d'être évident que cela puisse ramener la perméabilité à son état d'origine. Pour cela il faudrait que les surfaces des diaclases et des fractures se rejoignent parfaitement pour assurer l'étanchéité.

2.3.7 Scellement

Pour la plupart des sites de stockage le scellement final est considéré comme absolument nécessaire. L'Agence internationale de l'énergie atomique dans son *Draft Safety Requirements* (Version provisoire des exigences de sûreté),⁹⁸ analyse la "Disposal facility closure" (la fermeture de l'installation de stockage) dans la spécification 19 :
« L'installation de stockage sera fermée de façon à assurer à long terme les fonctions de sûreté dont l'importance a été établie par le scénario de sûreté. Les programmes de fermeture [...], seront bien définis et faisables, pour que la fermeture puisse se faire sans risque à un moment approprié. Les fonctions de sûreté d'une installation de stockage, sur le long terme, dépendront d'un certain nombre d'activités, dont la qualité du remblayage et du scellement de l'installation de stockage. La nécessité de la fermeture doit être prise en compte dans la conception initiale de l'installation, et la planification de la fermeture et la conception des scellements doivent être actualisées au fur et à mesure de l'avancement

⁹⁶ Par exemple Hoek et Brown, 1980, pp 367, 380

⁹⁷ Par exemple ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B, p. 195

⁹⁸ IAEA, 2003

des travaux de conception des ouvrages. Dans la mesure du possible, la faisabilité et l'efficacité de la mise en place de matériaux de remblayage et de scellement devraient être démontrées à l'avance. »

La majorité des programmes de stockage de déchets nucléaires dans le monde ont mené d'importantes études sur le scellement du site,⁹⁹ et certains ont réalisé des essais in situ à grande échelle, notamment centrés sur les techniques de mise en place.¹⁰⁰ Ces dernières sont particulièrement importantes étant donné que la performance in situ d'un scellement en grandeur nature dépend étroitement de la procédure et de la qualité d'installation, c'est-à-dire qu'elles ne peuvent pas dépendre uniquement des propriétés des matériaux. A moins qu'une installation satisfaisante puisse être assurée, les caractéristiques des matériaux, par elles-mêmes, ne pourraient être que d'une importance secondaire.

Tout indique que le scellement sera nécessaire pour le site de stockage de Bure. L'objectif principal du scellement est de réduire, à un niveau répondant aux exigences de la performance du confinement des déchets nucléaires, le risque d'ouverture de voies préférentielles à l'eau à travers le creusement des alvéoles et/ou des galeries d'accès. La Commission nationale d'Evaluation a souligné l'importance des études de scellement, étant donné le rôle critique du scellement à Bure, et notamment la nécessité d'essais souterrains in situ.¹⁰¹ Elle identifie le scellement comme un problème majeur.

2.3.8 Contrainte

L'état de contrainte dans la roche est important pour plusieurs raisons. L'importance relative de la contrainte vis-à-vis de la résistance détermine la stabilité des cavités. Le rapport contrainte/résistance influence la gravité des dommages dans la zone perturbée par l'excavation, et la profondeur à laquelle les perturbations se propagent. Le rapport entre l'ampleur des principales contraintes, en particulier entre la plus grande contrainte principale et la plus petite contrainte principale, affectera les concentrations de contrainte autour des cavités. Ce rapport pourrait être un élément à prendre en compte pour choisir la meilleure orientation et la forme des excavations. Un effet identique pourrait résulter des directions des principales contraintes.

C'est un fait bien établi que les mesures de contrainte sont difficiles¹⁰² dans des roches plus tendres, particulièrement dans les roches sensibles à l'humidité. Par conséquent il ne serait pas surprenant qu'une certaine incertitude subsiste sur l'état de contrainte à Bure, particulièrement dans le Callovo-Oxfordien.

Les résultats déjà obtenus sur le site, notamment les mesures directes sur l'ovalisation par rupture des parois des forages, sont particulièrement utiles et instructifs puisqu'ils fournissent une base physique directe pour faire des prédictions sur l'endommagement de

⁹⁹ Par exemple Pusch, 2002

¹⁰⁰ Par exemple Pusch, 2001, chapitre 8

¹⁰¹ CNE, 2002, p. 39

¹⁰² Par exemple Martin et Lanyon, 2003

l'excavation, sans avoir recours à des analyses intermédiaires indirectes. Des analyses sont nécessaires pour transposer les ovalisations des forages aux dimensions des endommagements potentiels associés au creusement des puits et tout particulièrement des galeries. La nécessité de faire des analyses et des modélisations pour les galeries est d'autant plus importante que leur orientation est différente de celle des forages (verticaux), autant du point de vue du champ de contraintes que de la structure dominante des stratifications, dans ces formations sédimentaires.

2.3.9 Modélisation

La modélisation du comportement mécanique des roches encaissantes est un élément essentiel d'un programme de recherche pour l'étude du confinement à long terme des matériaux radioactifs dans un site de stockage en couche géologique profonde. Puisque, par définition, il n'est pas possible d'étudier physiquement le comportement à long terme du massif rocheux, toutes les prévisions de performance pour le long terme doivent se faire à partir de la modélisation, en grande partie numérique. Par conséquent la modélisation joue un rôle critique dans l'évaluation de la performance à long terme et de la sûreté d'un site de stockage.¹⁰³

Dans une certaine mesure, la qualité de la modélisation et de l'entrée des données peut être évaluée par une surveillance et des investigations in situ du comportement du massif rocheux, par exemple pendant et après la construction du laboratoire souterrain. Des comparaisons entre les prédictions des modèles et les mesures sur le terrain seront des plus utiles pour évaluer la pertinence des efforts des prédictions des modèles réalisés à ce jour.

2.3.10 Instabilités structurales majeures résultant des effets du site de stockage

Il n'est pas clair que les instabilités principales le long des structures géologiques principales (c'est-à-dire des failles), induites par des effets du site de stockage, doivent être discutées dans ce chapitre sur la mécanique des roches. Elles sont mentionnées ici, d'une part parce que Fairhurst les inclut dans son importante publication de synthèse sur les "*Rock Mechanics and Nuclear Waste Repositories*",¹⁰⁴ et d'autre part pour souligner que ces questions doivent être traitées quelque part.

2.4. Éléments de la recherche poursuivie par l'ANDRA

¹⁰³ Par exemple CNE «réversibilité», 1998, résumé, D

¹⁰⁴ Fairhurst, 1999

2.4.1 Recherche en cours

2.4.1.1 Réversibilité

Il est clair que l'ANDRA a porté une attention considérable à la question de la réversibilité. Le sujet est par exemple fréquemment mentionné dans le Dossier 2001 Argile.¹⁰⁵ La section II.8 présente une stratégie exhaustive pour assurer la réversibilité des diverses classes de déchets, en fonction de la phase de fonctionnement à laquelle la décision de reprendre les colis pourrait être prise. Cette section ne fait pas apparaître clairement si l'ANDRA s'est engagée à accompagner ce résumé détaillé des stratégies de reprise de colis par des études d'ingénierie détaillées démontrant ce qu'il faudra effectivement faire pour effectuer cette reprise.

Le Dossier 2001 Argile contient un bref inventaire du type d'instrumentation capable de surveiller la stabilité des alvéoles.¹⁰⁶ Par contre, il n'est pas précisé si la faisabilité, la praticabilité, et la durée de l'utilisation de cette instrumentation dans l'environnement d'un site de stockage de déchets nucléaires seront évalués. Il n'y a aucune indication qui permettrait de savoir si de futures études et de quels types sont envisagées (par exemple dans le laboratoire souterrain ?). Sur ce sujet l'ANDRA pourrait considérablement bénéficier du retour d'expérience acquis dans d'autres programmes,¹⁰⁷ en tenant compte évidemment du fait que les changements en fonction du temps (par exemple soutènement charge/déformation, convergence) sont susceptibles d'être très différents dans l'argilite par rapport à ceux dans le granit. Par conséquent des ajustements technologiques peuvent être nécessaires.

2.4.1.2 Stabilité à long terme de l'excavation

Il n'apparaît pas clairement que l'ANDRA traite spécifiquement et explicitement de cette question, bien que beaucoup d'études, en cours et prévues, fourniront des informations sur cette question. L'ANDRA a développé des modèles constitutifs pour décrire le comportement à long terme des échantillons de roche. Néanmoins ceux-ci ne traitent que d'un seul aspect de la stabilité de l'excavation sur le long terme. Une analyse complète de ce sujet doit également prendre en compte le comportement à long terme (c'est-à-dire la durabilité) de tout le système de soutènement et/ou de l'armature. Elle doit aussi considérer le comportement de la détérioration éventuelle du massif rocheux qui ne pourrait pas être pris en compte dans les modèles continus développés à partir des expériences de laboratoire, notamment ceux qui portent sur la déshydratation et/ou plus généralement des changements d'humidité. Finalement, de manière générale, les effets thermiques, chimiques, hydrologiques et même biologiques devraient être également étudiés

¹⁰⁵ Par exemple ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B, section II.8

¹⁰⁶ ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B, p. 182

¹⁰⁷ Par exemple Kalbantner et Sjöblom, 2002

2.4.1.3 Zone perturbée par l'excavation (EDZ)

L'ANDRA a développé un programme détaillé pour étudier la zone perturbée par l'excavation. De plus, elle a participé à d'autres programmes qui étudient cette question, et ceci depuis un certain temps.¹⁰⁸

Étant données les ovalisations observées dans les forages sur ou près du site de Bure¹⁰⁹ il se pourrait très bien qu'une importante zone perturbée se développe autour des cavités, en particulier dans les puits d'accès, les galeries d'accès, et les alvéoles de stockage. Par conséquent une recherche in situ détaillée et robuste est entièrement justifiée. Des observations in situ seront essentielles.

L'ANDRA a développé un programme de surveillance de la réponse de la roche au fonçage des puits. Ce travail est vraisemblablement en cours d'avancement.¹¹⁰

Une étude a été menée sur les mécanismes géochimiques de scellement potentiels dans la zone perturbée.¹¹¹ Certains résultats sont suffisamment encourageants pour justifier des recherches supplémentaires, ainsi que le recommande cette étude.

L'ANDRA (2001)¹¹² donne des dimensions assez précises pour différents types de perturbations autour des alvéoles. Elles se fondent vraisemblablement sur des analyses (qui ne sont pas citées), et semblent indiquer que beaucoup de travaux de modélisation ont été déjà achevés sur ce sujet.

L'ANDRA présente un excellent programme d'étude pour continuer la caractérisation de la zone endommagée et,¹¹³ ce qui est peut-être encore plus important, des mesures à prendre pour limiter, ou même annuler, tout dommage aux endroits où des scellements permanents doivent être installés. Il est particulièrement encourageant de noter que l'ANDRA constate que la construction d'une zone d'ancrage pour un scellement, dont l'objet est d'interrompre efficacement tout écoulement le long de la zone perturbée ou endommagée, présente des difficultés non négligeables, et que cette question mérite donc beaucoup d'attention. Il n'est cependant pas évident que ces facteurs aient été pris en compte, et dans quelle mesure, pour la construction en cours (le fonçage des puits en cours et, bientôt, le creusement en profondeur de la niche et des galeries).

2.4.1.4 Comportement mécanique de la roche

¹⁰⁸ Par exemple Alheid et al., 1999 ; ANDRA Programme prévisionnel 1999; GdR FORPRO, 2002

¹⁰⁹ ANDRA Ovalisation 1997; voir aussi Heitz et al., 1999

¹¹⁰ ANDRA Cahier des charges REP, 2001

¹¹¹ Homand et Chatelineau, sans date, référencé dans ANDRA Cahier des charges SUG, 2001, section IV.5.5

¹¹² ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B, p. 146

¹¹³ ANDRA Cahier des charges KEY, 2002

L'ANDRA a mis en place un important programme d'étude sur le comportement mécanique de l'argilite du Callovo-Oxfordien. Elle a accompli toute une série d'études de caractérisation en laboratoire très impressionnantes.¹¹⁴ L'ANDRA a sans aucun doute mené un programme remarquablement sophistiqué d'essais géomécaniques en laboratoire sur le comportement complexe des composants de l'argilite. Néanmoins il semble qu'il n'existe pas d'études semblables ou parallèles sur la caractérisation géomécanique des discontinuités dans l'argilite, notamment des plans de stratification et des diaclases. A ce sujet il faut insister tout particulièrement sur l'influence potentielle que pourraient avoir les stratifications sur le comportement mécanique anisotrope du massif rocheux. Il est important de savoir si cette question a fait l'objet de recherche et si des dispositions sont prises pour l'étudier. On s'attend généralement à un comportement mécanique anisotrope avec ce type de massifs sédimentaires. Il faudra donc présenter des éléments convaincants pour affirmer avec confiance qu'une modélisation isotrope est suffisante dans le cas de Bure.

L'obligation faite par la Règle fondamentale de sûreté d'étudier l'hétérogénéité géotechnique et la variabilité spatiale dans la couche hôte a été abordée dès le début par l'ANDRA dans un rapport de 1996.¹¹⁵ Ce rapport fait également mention de la constructibilité, mais uniquement dans le contexte d'une affirmation plutôt générale et non étayée. L'ANDRA fournit des éléments plus complets et plus détaillés sur le travail de variabilité spatiale.¹¹⁶

La variabilité spatiale des propriétés géomécaniques a été étudiée à partir d'un grand nombre de mesures des vitesses sismiques, des essais de compression (uniaxiale et triaxiale), et des modules de déformation.¹¹⁷ Les résultats ont permis l'identification de différentes zones, au moins dans la direction verticale, pour le comportement géomécanique. Des corrélations avec la minéralogie/pétrologie permettront vraisemblablement de faire des extrapolations fondées sur la caractérisation géologique, et permettront de traiter, au moins indirectement, la question de la continuité et de la variabilité latérales. Ces essais ont également comporté une recherche sur l'anisotropie de la roche.

Bien que les publications de l'ANDRA font de temps à autre mention de la nécessité et de la difficulté d'extrapoler le comportement mécanique de la roche de l'échelle du laboratoire au comportement en vraie grandeur,¹¹⁸ il n'est pas encore précisé jusqu'où cet effort d'extrapolation a été poursuivi. Ce problème a été identifié par la Commission nationale d'évaluation,¹¹⁹ spécifiquement dans le contexte de la transposition des résultats du Mont Terri à Bure.

¹¹⁴ Par exemple Hoteit et al.,1998, Nguyen Minh et al.,1999, Gasc-Barbier et al.,1999, ANDRA Référentiel Géologique Tome 3, 2001, section IV.3.1.2 ; ANDRA Cahier des charges SUG, 2001, section IV.1, mais plus particulièrement, Wright et al.,2000, Valès et al.,2002, Zhang et Rothfuchs plus détaillés, 2002, Gratier et al.,2002, Bemer et al.,2002, Malinsky et al.,2002

¹¹⁵ Par exemple ANDRA Résultats, 1996, section 1.3.5 et p. 45

¹¹⁶ ANDRA Cahier des charges SUG, 2001, chapitre IV

¹¹⁷ ANDRA Cahier des charges SUG, 2001, chapitre IV

¹¹⁸ Par exemple ANDRA Référentiel Géologique Tome 3, 2001

¹¹⁹ CNE, 2003, p. 33

Des essais ont été réalisés sur l'effet des températures élevées sur la résistance et la rigidité des argilites du Callovo-Oxfordien.¹²⁰ Ces résultats prouvent que cet argilite pourrait connaître un affaiblissement significatif une fois exposé à des températures situées entre 80 et 100 °C. Il est donc extrêmement important que des données de performance plus robustes soient obtenues là où pourraient intervenir de telles températures.

2.4.1.5 Constructibilité

L'ANDRA¹²¹ a déclaré très tôt que la constructibilité ne devrait pas être un problème important et que la construction (au moins du laboratoire souterrain) devrait être faisable sans aucune difficulté particulière. Cette affirmation a été reprise,¹²² une fois encore avec peu de justifications ou d'éléments pour l'étayer et, ce qui est plus grave, sans référence(s) à des études plus détaillées qui pourraient la rendre plus crédible. Néanmoins, il a aussi été admis¹²³ qu'une caractérisation mécanique de la roche plus avancée était nécessaire pour la conception du site de stockage. ANDRA¹²⁴ contient une analyse importante des méthodes de construction et d'une éventuelle coordination construction/exploitation (mise en place de déchets).

2.4.1.6 Les effets de la construction sur la performance du site de stockage

L'ANDRA reconnaît que les effets de la construction peuvent avoir une influence sur la performance du site de stockage. Elle a mis en place un programme pour observer, tout particulièrement, la perturbation le long des puits en cours de fonçage.

2.4.1.7 Le scellement

L'ANDRA a reconnu depuis longtemps la nécessité de prendre en compte, dans ses recherches, les normes de scellement.¹²⁵ L'impact de la zone perturbée sur des exigences de scellement a en particulier été mentionné à plusieurs reprises. L'ANDRA coopère avec Mont Terri sur des expériences de scellement

Un vaste programme d'essais sur les matériaux de scellement semble se poursuivre.¹²⁶ La Commission nationale d'évaluation a soulevé un certain nombre de problèmes scientifiques qui doivent être résolus pour accorder une confiance totale à la performance

¹²⁰ ANDRA Cahier des charges SUG, 2001, section IV.8.2.2

¹²¹ ANDRA Résultats, 1996, p. 39

¹²² ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B

¹²³ ANDRA Résultats, 1996, pp. 45-46

¹²⁴ ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B, II.7

¹²⁵ Par exemple ANDRA Résultats, 1996, p. 46

¹²⁶ CNE, 2002, pp. 47-49

des matériaux de scellement, notamment la durabilité de ces matériaux dans le milieu spécifique au sein duquel ils devront agir et rester fonctionnels pendant une très longue période de temps. Néanmoins, il n'est pas évident que la technologie de mise en place de scellement soit une question résolue, ou tout du moins, comme la discussion semble l'indiquer, dénuée de difficulté. La qualité et l'importance du travail de soutènement sera, dans le cas de Bure un critère important pour l'installation d'un scellement. Cette question est cruciale puisqu'il est très probable que le soutènement subira des contraintes, celles-ci pouvant être sévères.

L'ANDRA a mené des expériences en laboratoire sur la caractérisation des matériaux de remblayage.¹²⁷

2.4.1.8 Les mesures de contrainte

L'ANDRA a fait des efforts louables pour mesurer l'état de contrainte du site de Bure, et notamment de l'argilite du Callovo-Oxfordien.¹²⁸ Puisque les résultats sont basés sur un ensemble de méthodes bien établies (fracturation hydraulique, ovalisations,¹²⁹ réseaux de contraintes régionaux), il est raisonnable de penser que l'état de contrainte est plutôt bien connu. Clairement, il serait souhaitable de confirmer ces mesures par des mesures supplémentaires in situ quand la galerie d'accès sera disponible. Néanmoins, les résultats sont suffisamment cohérents pour indiquer que l'état de contraintes dans le Callovo-Oxfordien semble plus ou moins favorable, tout du moins du point de vue d'une construction souterraine/des ouvrages souterrains, avec un champ de contrainte quelque peu anisotrope. Comme le confirment les ovalisations des forages, on peut s'attendre à un endommagement significatif autour des excavations à moins que cet endommagement puisse être restreint par des renforcements forts, rigides, et installés très rapidement.¹³⁰

2.4.1.9 La modélisation

L'ANDRA poursuit depuis un certain temps un effort impressionnant de modélisation géomécanique, notamment de modélisation mécanique et hydromécanique.¹³¹ La modélisation «*en continu*» du comportement géomécanique de l'argilite effectuée par l'ANDRA reflète sans aucun doute l'état de l'art dans ce domaine. Par contre il n'est pas évident que l'effort de modélisation ait suffisamment porté sur l'impact potentiel des discontinuités, en particulier des plans de stratification et des diaclases, sur le comportement du massif rocheux.

¹²⁷ Par exemple Fleureau et al.,2002

¹²⁸ Par exemple ANDRA Cahier des charges SUG, 2001, section IV.7, Wileveau, 2004

¹²⁹ Par exemple Heitz et al.,1999

¹³⁰ ANDRA ovalisatoins 1997.

¹³¹ ANDRA Référentiel Géologique Tome 5, 2001, Chapitre III, ANDRA Cahier des charges E-REG, 2001, chapitres 2 et 3, mais particulièrement annexe 1, Vaunat et al.,2002, Hoxha et al.,2002, Miura et al.,2002, Conil-Aublivé et al.,2002, Kolmayer et al.,2002, Cosenza et al.,2002

2.4.2 Travaux envisagés

De nombreux documents décrivent les programmes de recherches extensifs et exhaustifs que l'ANDRA propose de faire.¹³² L'ANDRA a sans aucun doute développé des programmes de recherches approfondis sur la mécanique des roches qui fourniraient une grande partie des informations requises pour une évaluation de sûreté, s'ils pouvaient être mis en application dans les délais impartis. Les questions qui demandent plus d'attention sont abordées dans la section 2.6, qui traite des imperfections de recherches, et la section 2.10, qui traite des recommandations.

2.4.2.1 La réversibilité

Bien que les futurs efforts de recherche géomécanique se rapportant directement à la réversibilité ne soient pas clairement définis, il apparaît que des travaux supplémentaires approfondis sont envisagés pour fournir à la fois des informations et des indications supplémentaires pour les études sur la réversibilité. Ces études portent principalement sur la surveillance in situ des excavations et les investigations prévues sur la mécanique des roches. Le programme d'instrumentation du soutènement prévu est particulièrement important de ce point de vue.

2.4.2.2 La stabilité à long terme de l'excavation

Il n'est pas précisé clairement si l'ANDRA dispose d'un programme pour traiter cette question, mais la plupart des données rassemblées sur des sujets s'y rapportant (notamment des études de modélisation de comportement de la roche et des études correspondantes sur l'EDZ et la réversibilité) s'intéressent directement à la question de la stabilité à long terme de l'excavation. Il est clair que depuis un certain temps l'ANDRA a poursuivi un programme sophistiqué d'essais en laboratoire sur le comportement mécanique de la roche hôte en fonction du temps.¹³³

2.4.2.3 Zone perturbée par l'excavation (EDZ)

L'ANDRA a mis en place un important programme de caractérisation de l'EDZ.¹³⁴ Elle a même mis en place un programme d'étude sur la faisabilité d'atténuer l'impact négatif de toute zone perturbée.¹³⁵ De plus, plusieurs études connexes fourniront des informations supplémentaires au sujet de l'EDZ.¹³⁶ L'ANDRA a activement participé à des études sur la zone perturbée à Mont Terri. Nous sommes de l'avis que tous ces programmes et études poursuivies par l'ANDRA indiquent que celle-ci est très consciente de l'importance

¹³² Par exemple ANDRA, 2002-2005

¹³³ Par exemple ANDRA Cahier des charges SUG, 2001, section IV.5

¹³⁴ ANDRA Cahier des charges REP, 2001, ANDRA Cahier des charges SUG, 2001, ANDRA Cahier des charges E-REG, 2001, GdR FORPRO, 2002

¹³⁵ ANDRA Cahier des charges KEY, 2002

¹³⁶ Par exemple ANDRA Cahier des charges E-GIS, 2000

de l'EDZ comme voie de passage pour l'eau qui pourrait constituer un court-circuit dans la formation hôte.

2.4.2.4 Comportement mécanique de la roche

L'ANDRA a depuis longtemps reconnu la nécessité de vérifier in situ le comportement mécanique de la roche,¹³⁷ parce que de telles données seront essentielles pour la conception des ouvrages du site de stockage ainsi que pour des évaluations de sûreté (confinement). Il s'avère que la majeure partie de la caractérisation mécanique de l'argilite in situ sera accomplie par des essais au dilatomètre.¹³⁸ Dans ces brèves mentions des essais, la façon de transposer ces résultats aux propriétés sous différents cheminements de contrainte n'est pas mentionnée. L'ANDRA indique à plusieurs reprises que les divers programmes d'essai en laboratoire se poursuivent.¹³⁹ De plus, il est prévu de multiples exercices de caractérisation tels que la surveillance par extensiomètres. La façon dont l'information obtenue de ces diverses sources sera intégrée demande à être clarifiée.

2.4.2.5 Constructibilité

L'ANDRA a projeté depuis longtemps d'employer des essais in situ dans le laboratoire souterrain à l'appui des études de constructibilité.¹⁴⁰ La construction même du laboratoire sera une étape majeure dans la démonstration de la constructibilité

2.4.2.6 Les effets de la construction sur la performance du site de stockage

Au minimum, les effets de la construction sur la performance du site de stockage seront intégrés implicitement dans les études approfondies qui sont prévues sur l'EDZ.¹⁴¹ Bien que des remarques soient faites à de nombreuses reprises dans les documents de l'ANDRA identifiant l'impact éventuel des effets de construction sur la performance du site de stockage, il n'apparaît pas clairement dans quelle mesure ces effets ont été pris en compte ou sont étudiés. A ce sujet, la perturbation qu'engendrera l'EDZ quand les soutènements et/ou les armatures seront enlevés pour pouvoir installer les scellements est une question de grande importance. Les expériences du passé sur le retrait des supports ne sont pas encourageantes.¹⁴²

¹³⁷ Par exemple ANDRA Résultats, 1996, p. 46, ANDRA Programme prévisionnel 1999

¹³⁸ Par exemple ANDRA Programme prévisionnel 1999, section 2.3.1, ANDRA Cahier des charges E-GIS, 2000, sections 4.3, 4.4

¹³⁹ ANDRA Cahier des charges SUG, 2001

¹⁴⁰ ANDRA Résultats, 1996, p. 45

¹⁴¹ GdR FORPRO, 2002

¹⁴² e.g. Dereeper and Volckaert, 2002

2.4.2.7 Le scellement

L'ANDRA dispose d'un programme suivi d'étude des matériaux de scellement.¹⁴³ Elle prévoit une simulation d'essai de scellement pour démontrer la faisabilité de la prévention des écoulements à travers ou le long de l'EDZ. Dans la section 2.6 : *les insuffisances de la recherche*, de sérieuses réserves sont émises sur cet essai. ANDRA¹⁴⁴ décrit un programme important de recherche sur la faisabilité de ramener une zone perturbée quelconque à un état similaire à celui de la roche non perturbée, et de réduire ainsi la possibilité qu'une zone endommagée entourant les excavations devienne une voie de passage préférentielle pour la migration des radionucléides. Le document de programmation, reconnaît clairement et explicitement que la restauration autour des cavités soulèvera des difficultés majeures.

2.4.2.8 Mesures de contrainte

L'ANDRA a déjà accompli une campagne détaillée de mesures de contrainte. Elle décrit les mesures de contrainte supplémentaires prévues, leur nombre, leur emplacement, leur type, etc.¹⁴⁵ Au minimum de nouveaux calculs de contrainte découleront de la modélisation approfondie prévue pour étayer l'analyse des mesures in situ (par exemple convergence, EDZ). Il est très probable que la plupart des incertitudes sur l'état des contraintes du site seront résolues très tôt par l'investigation in situ en profondeur et que les incertitudes restantes sont suffisamment réduites pour ne pas avoir une influence déterminante sur une quelconque conclusion portant sur l'acceptabilité du site.

2.4.2.9 Modélisation

Il est clair qu'une modélisation supplémentaire considérable est prévue, notamment pour étayer les mesures sur le terrain (par exemple convergence, caractérisation de l'EDZ), même si une modélisation importante a déjà été réalisée. Pratiquement tous les programmes géomécaniques in situ évoquent d'importantes modélisations supplémentaires.¹⁴⁶

2.5. Relation(s) entre les éléments de recherches (2.4) et les questions techniques (2.3)

¹⁴³ CNE, 2002, pp 48-9, 51

¹⁴⁴ ANDRA Cahier des charges KEY, 2002

¹⁴⁵ ANDRA Programme prévisionnel 1999

¹⁴⁶ Par exemple ANDRA Cahier des charges REP, 2001, chapitre 3, ANDRA Cahier des charges SUG, 2001, chapitre 3, ANDRA Cahier des charges E-REG, 2001, chapitres 2 et 3, ANDRA Cahier des charges KEY, 2002, section 3.3

Les paragraphes des sections précédentes (2.3), les questions techniques et (2.4), les éléments de recherches ont les mêmes sous-titres, et apparaissent dans le même ordre, pour faciliter la lecture. Il y a cependant des recouvrements entre la plupart de ces paragraphes, voire la totalité. Par exemple, les essais en laboratoire introduisent la modélisation qui, à son tour, introduit la caractérisation de l'EDZ. Les observations sur le terrain et la surveillance de l'EDZ fournissent les informations nécessaires pour la modélisation en permettant, par exemple, une calibration sur le terrain des paramètres du modèle, et peuvent fournir de nouvelles données pour poursuivre les essais en laboratoire destinés à affiner des comportements, des modèles ou des paramètres.

2.6 Évaluation de la recherche : exhaustivité et pertinence

De façon générale les programmes de recherche de la mécanique des roches du site de Bure comportent beaucoup d'éléments qui sont excellents, et devraient fournir les informations nécessaires pour évaluer la faisabilité d'un site de stockage. Par contre, l'intégration de tous ces éléments dans le cadre d'une évaluation de la performance du site de stockage est absente. Il n'apparaît pas clairement comment et pourquoi certaines investigations de la mécanique des roches se rapportent aux exigences du confinement des déchets nucléaires et comment elles seront utilisées pour l'évaluation de la performance. Naturellement, le problème réside dans les délais impartis. Il est difficile d'imaginer comment une recherche, même partielle, pourrait être menée à bien d'ici fin 2005.

Une des réserves que nous émettons sur le programme de recherche porte sur les questions de l'hétérogénéité et de la variabilité spatiale qui ne semblent pas être suffisamment étudiées. La poursuite des caractérisations géologiques et géophysiques apportera vraisemblablement les justifications nécessaires, mais on ne sait pas très bien si des observations directes et suffisantes sont envisagées (c'est-à-dire distinctes des observations indirectes, comme par exemple des corrélations avec la minéralogie, la pétrographie, la densité, la vitesse sismique) pour la variabilité des propriétés et des caractéristiques de la mécanique des roches. Une question similaire se pose pour le champ de contrainte et pour les mesures de contrainte.

2.7 Les insuffisances de la recherche

Le problème majeur de la recherche en cours et de la recherche envisagée réside dans le fait que seuls des essais in situ des plus élémentaires pourront être menés dans les délais impartis. Ceci pose bien sûr un problème de crédibilité. La question de la date butoir n'est pas nouvelle.¹⁴⁷ On peut même se demander si le calendrier de départ développé pour ce programme aurait pu être respecté. Les retards dans la construction d'ouvrages souterrains ne sont certainement pas rares et ne peuvent être considérés comme totalement imprévisibles. La Commission, sur ce point et d'autres, a proposé des

¹⁴⁷ Par exemple CNE, 2001, p. 11

approches visant à minimiser l'impact négatif sur l'analyse de sûreté qui résultera vraisemblablement des retards par rapport à l'échéance de 2006. Toute approche visant à mettre en place des mesures correctives serait souhaitable, bien que cela soit difficile si près des échéances.

Une des faiblesses majeures du programme de recherche géomécanique se trouve dans l'absence apparente d'un plan d'ensemble qui établit un lien entre la nécessité d'informations géomécaniques et la performance du site de stockage. De ce fait, on ne sait pas bien quel type de données sont nécessaires pour effectuer des évaluations de sûreté du site de stockage et si toutes les données qui seront nécessaires seront obtenues.

L'essai simulé proposé pour le scellement d'une saignée dans le laboratoire souterrain pourrait être de valeur et d'utilité marginales, et devrait être reconsidéré. L'essai proposé sera effectué dans un endroit où, par définition, le développement de l'EDZ n'aura progressé que sur une courte période de temps, peut-être de quelques mois seulement. On peut s'interroger sur la représentativité de ce type de test pour le scellement de l'EDZ quand celle-ci se sera développée sur beaucoup d'années, plus probablement des décennies. L'interaction entre un vérin plat et la roche hôte sera très probablement différente de celle entre l'argile gonflante et la roche hôte, certainement pour les interactions prenant place au point de contact entre les deux types de "scellements".

Tout d'abord, le scellement de l'EDZ est-il vraiment la priorité absolue (vu les contraintes de temps) pour ce programme très limité de caractérisation du site ? On peut certainement avancer l'argument qu'il vaudrait mieux, en premier lieu, développer in situ une connaissance plus réaliste de l'EDZ, de ses propriétés, de ses caractéristiques, etc. avant même de concevoir un système de scellement.

Deuxièmement, l'essai de scellement proposé semble extrêmement artificiel. (Je dois ajouter que ces critiques sont basées sur des descriptions extrêmement brèves et superficielles de l'essai, et que je n'ai pas eu l'opportunité de consulter d'analyse expliquant ou justifiant ce test.) L'essai sera réalisé très vite après l'excavation, c'est-à-dire bien avant qu'une importante détérioration puisse se manifester (en supposant qu'une détérioration se produira).

Troisièmement, il est difficile de concevoir comment et pourquoi l'augmentation de la composante de la contrainte parallèle aux parois de la galerie réduira la perméabilité dans cette direction. Bien qu'il soit généralement admis qu'un essai de saignée puisse réduire la perméabilité parallèlement à la saignée, cet effet reste très localisé. La perméabilité, qui pourrait augmenter parallèlement à l'excavation à sceller, pourrait s'avérer au moins aussi importante. Il serait souhaitable de faire une analyse approfondie des conséquences de cette méthode de scellement.

Quatrièmement, il est difficile de concevoir comment un vérin plat peut simuler un scellement de bentonite sinon dans ses aspects les plus rudimentaires. Il semble évident que même les interactions physiques/mécaniques entre un vérin plat et un anneau de bentonite seront entièrement différentes, ainsi que, en toute probabilité, l'interface

hydraulique entre le scellement et la roche hôte. Nous constatons que certaines de ces remarques ou critiques ne sont pas nouvelles – certaines sont faites par la Commission nationale d'évaluation,¹⁴⁸ elles sont donc faites ici pour renforcer explicitement les réserves et les préoccupations relatives à cet essai. D'un autre côté, une connaissance approfondie du même essai au Mont Terri serait d'une valeur incalculable. Il devrait en effet fournir des informations conceptuelles de base sur la méthode d'essai, et permettre une évaluation méticuleuse de son "succès", particulièrement du réalisme avec lequel l'essai simule une vraie conception et/ou un essai de scellement.

Il s'avère qu'aucun essai de durabilité par immersion, ou de tout autre essai similaire visant à déterminer les impacts mécaniques des changements de la teneur en humidité n'a été fait sur le Callovo-Oxfordien. Ceci est plutôt surprenant, puisque ce test est très utilisé, notamment pour les schistes,¹⁴⁹ et puisque les résultats peuvent se montrer très utiles pour identifier des problèmes de stabilité susceptibles de se manifester lors des excavations souterraines dans des formations de roche schisteuses. Bien que ce test puisse certainement être considéré comme plutôt rudimentaire, comparé à certains tests sophistiqués et ultramodernes déjà effectués en laboratoire par l'ANDRA, il peut être fait pour un coût modeste et rapidement. Par conséquent il peut s'avérer un outil efficace pour étudier, entre autres, les conséquences de la détérioration potentielle de l'argilite sur la variabilité spatiale et l'hétérogénéité. Celles-ci pourraient avoir des effets sur la stabilité des excavations, la détérioration, l'agrandissement de la zone endommagée, les travaux de soutènement/armature et, dans le cas extrême, sur la réversibilité. Les essais de durabilité sont normalisés par l'ASTM (American Society for Testing and Materials)¹⁵⁰ et font l'objet d'une procédure d'essai suggérée par l'ISRM (International Society for Rock Mechanics).¹⁵¹ Naturellement, il est souhaitable de procéder à des essais, simples de préférence, pour pouvoir en faire un nombre important en vue de déterminer les effets de l'assèchement, ou plus généralement les changements dans la teneur en humidité sur le comportement mécanique de argilites. (Bien que ce chapitre porte sur l'impact du comportement mécanique des argilites, il est évident que, par implication, il pourrait y avoir un impact sur les aspects de la performance hydrogéologique, notamment dans l'EDZ.)

L'ANDRA a admis à plusieurs reprises¹⁵² que l'ancrage des scellements pourrait demander le retrait du soutènement/armature, ainsi qu'un creusement supplémentaire. L'ANDRA admet aussi que ces activités doivent être accomplies sans réactiver la zone endommagée, et, surtout, sans causer de propagation plus profonde de l'endommagement et/ou de la perturbation. Bien qu'il y ait du mérite à reconnaître ce problème, il est difficile de savoir si un effort a été consacré à déterminer si ce travail doit être accompli, et comment. La question est d'autant plus pertinente qu'au moment où l'opération devra être réalisée, le soutènement/l'armature seront en place depuis de nombreuses années,

¹⁴⁸ CNE, 2003, p. 48

¹⁴⁹ Par exemple Goodman, 1989, pp 37-39 ;Hoek et Brown, 1980, pp 52, 54

¹⁵⁰ ASTM, 2000

¹⁵¹ Brown, 1981

¹⁵² Par exemple ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B, p. 196

probablement des décennies, et seront soumis à de lourdes charges, d'importantes contraintes, et probablement d'importantes déformations.

Il s'avère que très peu, ou même aucune attention explicite n'a été prêtée aux zones de subsidences et de discontinuités dans le massif rocheux, par exemple les plans de stratification et les diaclases. Ni les essais en laboratoire, ni la modélisation, ni les investigations prévues sur le terrain sur la mécanique des roches ne semblent porter directement sur les questions liées à l'influence que les discontinuités pourraient avoir sur divers aspects de la performance du site de stockage, la stabilité de l'excavation, l'EDZ, les déformations à long terme, la réversibilité, le scellement, le remblayage, la mise en place des colis, et les travaux nécessaires de soutènement/armature. Les discontinuités peuvent éventuellement avoir un effet néfaste sur beaucoup d'aspects géomécaniques de la performance du site de stockage¹⁵³ et, par conséquent, semblent mériter bien plus d'attention que celle qui leur est consacrée dans le programme de l'ANDRA.

Il y a peu ou pas d'indication permettant de savoir si la question de la variation des propriétés de la roche en fonction de la taille ou de l'échelle a reçu beaucoup d'attention. Il est bien connu que la transposition du laboratoire au comportement sur le terrain est presque toujours nécessaire¹⁵⁴ et que cet ajustement est souvent difficile. Il est prévu qu'un grand nombre de ces informations d'échelle soient recueillies lors des investigations in situ prévues, et qu'elles fassent partie des calculs de vérification et de la modélisation du comportement structural en vraie grandeur qui sera observé et surveillé. Néanmoins, une reconnaissance plus explicite de la nécessité d'étudier cette question confirmerait que son importance est reconnue, et qu'elle sera prise en compte

Les effets chimiques sur le comportement du massif rocheux méritent certainement plus d'attention que celle qu'ils ont reçue jusqu'à maintenant. Cela s'applique notamment aux roches argileuses dans lesquelles les modifications des taux d'humidité pourraient provoquer des changements importants dans les propriétés mécaniques. Ces changements seront certainement produits, en grande partie par la chimie des eaux souterraines et peut-être par les changements de températures qui se produiront simultanément.

2.8 Avancement des travaux et calendrier prévu

D'excellentes études de laboratoire et de modélisation ont été achevées, sont en cours, et méritent qu'on encourage leur poursuite. D'importants travaux sur le terrain (par exemple la diagraphie des puits) sont en cours. Cependant, ce travail ne peut que partiellement se substituer à des études in situ en grandeur nature. La contrainte du calendrier sera clairement la raison principale qui limitera l'état d'avancement de l'étude d'ici la fin de 2005. Dans ce contexte, il est intéressant de noter qu'en 1999 déjà la Commission nationale d'évaluation a exprimé son inquiétude vis-à-vis de ce calendrier très tendu.¹⁵⁵

¹⁵³ Par exemple Hakami et Olofsson, 2002

¹⁵⁴ Par exemple Lecampion et al., 2002

¹⁵⁵ CNE, 1999, p. 7

2.9. Comparaison avec d'autres programmes

Bien qu'il soit plus limité dans son objet que certains autres importants programmes de recherches sur le stockage souterrain des déchets nucléaires, le programme géomécanique de l'ANDRA traite de la plupart des importantes questions géomécaniques qui nécessitent une solution. La différence la plus sérieuse réside dans le temps excessivement court alloué à l'ANDRA pour mener des expérimentations in situ. Les autres programmes ont accès à des laboratoires souterrains depuis de longues années, et par conséquent ont pu effectuer des essais in situ sur une période prolongée. D'un autre côté l'ANDRA peut tirer parti de l'expérience acquise sur d'autres sites, ce qu'elle a déjà fait très efficacement. En particulier vu le temps très court qui lui reste jusqu'à la fin 2005, date à laquelle elle doit achever ses investigations, il est normal et souhaitable qu'elle maintienne des contacts étroits avec les autres programmes, afin de tirer avantage des résultats positifs obtenus, et d'éviter de répéter certaines erreurs. Il est évident qu'une coopération avec des organismes qui étudient des formations hôtes suffisamment proches de celle du site de Bure est très précieuse pour utiliser directement les résultats obtenus pour l'évaluation de sûreté.

Le programme suédois est probablement exemplaire en termes d'ampleur et d'approfondissement de la recherche, en termes de transparence, et en termes de la facilité d'accès à une documentation importante et détaillée.¹⁵⁶

2.10 Conclusions

L'ANDRA a élaboré un excellent programme de recherche géomécanique. D'excellentes études individuelles de laboratoire, de terrain, et de modélisation ont été menées à bien, et/ou sont prévues. Cependant, il est difficile d'imaginer comment un programme complet d'étude sur le terrain pourrait être accompli d'ici la fin 2005. L'absence d'intégration globale des diverses études sur la mécanique des roches dans l'évaluation de la performance du site pèse d'un poids encore plus important. Ceci est impératif pour permettre de conclure si le nombre d'essais prévus est suffisant pour apporter le degré de confiance nécessaire à une quelconque conclusion sur l'acceptabilité du site.

Pour ce qui concerne l'échéance exigée par la loi, elle ne pourra pas raisonnablement être satisfaite puisqu'un programme raisonnablement approfondi d'études in situ demanderait au minimum plusieurs années, probablement de l'ordre d'au moins cinq à dix ans. Il est difficile de concevoir comment obtenir autrement une compréhension suffisamment complète du comportement de la masse rocheuse à grande d'échelle, y compris de la compréhension essentielle du couplage des effets mécaniques, thermiques, hydrologiques, géochimiques et biologiques. Etant donné la variabilité et l'hétérogénéité intrinsèques de presque tous les massifs rocheux, et certainement de ceux qui sont

¹⁵⁶ Par exemple Milnes, 2002, SKB, 2001, 2002, 2003

stratifiés, les expérimentations doivent être conduites sur une échelle spatiale qui permet aux essais de rendre compte d'un volume raisonnablement représentatif de la masse rocheuse. Etant donné que le comportement de la roche varie avec le temps, l'essai doit être réalisé sur une période suffisamment longue pour confirmer qu'il est bien pris en compte dans les résultats d'un tel essai. Cela est d'autant plus vrai qu'il sera même alors nécessaire d'extrapoler ces résultats à des durées dépassant de loin celles pour lesquelles ces mesures peuvent être faites.

Etant donné l'impact du scellement et de l'EDZ sur la performance du site de stockage, dont l'ANDRA a conscience et reconnaît l'importance, une expérimentation réaliste sur ces aspects, dans l'horizon du site de stockage, serait presque impérative pour établir un climat de confiance. L'alternative proposée, un essai très artificiel de scellement, dans une EDZ qui ne s'est développée que sur une période très courte (certainement par rapport à la durée des exigences de performance, mais même par rapport à la durée opérationnelle de l'installation, c'est-à-dire par rapport au temps qu'il faudra pour que l'EDZ se développe, avant l'installation du scellement) n'est ni convaincante, ni satisfaisante. Il est très important que tous les efforts possibles soient faits pour développer une connaissance complète de l'EDZ, de son comportement et de ses caractéristiques, notamment de son évolution dans le temps.

La façon dont les investigations géomécaniques contribuent aux évaluations de performance du site et dont elles sont reliées aux exigences du confinement des déchets nucléaires reste plutôt vague.

2.11 Recommandations

Il serait très souhaitable que l'ANDRA s'engage à poursuivre un programme d'expérimentations géomécaniques in situ, bien au-delà de 2005, en supposant qu'un tel engagement soit légalement et administrativement possible.

Si cela est possible, il serait très souhaitable que l'ANDRA démontre de manière plus formelle les analogies entre Mont Terri et Bure. (Un effort similaire pourrait être entrepris entre Mol et Bure, mais il est possible que les résultats soient bien moins intéressants). Comme il est inéluctable que seulement un programme limité d'expériences in situ pourra être accompli fin 2005, il serait très souhaitable de faire un usage approfondi de tous les résultats, conclusions et observations de Mont Terri. Pour qu'une telle approche soit suffisamment crédible, il serait très utile d'établir explicitement la liste de tous les sites analogues à celui de Bure, c'est-à-dire en termes de propriétés géomécaniques, du comportement des déformations lors du creusement, etc. Il n'est pas sûr que l'ANDRA se soit penchée sur le programme japonais sur la mine de Tono.¹⁵⁷ Il est évident que trop se fier à des informations provenant d'autres sites est quelque peu risqué. Néanmoins il semblerait que les similarités entre Bure et Tono puissent justifier un examen, au moins superficiel, pour déterminer si un échange d'informations serait

¹⁵⁷ Par exemple Sato et al., 2000

utile. Un transfert de connaissances et de technologies du site de Tournemire à Bure serait, de la même manière, possible, notamment à cause de la présence d'un tunnel vieux de plus de cent ans et dans lequel de nombreuses études in situ ont déjà été réalisées.¹⁵⁸

Une recommandation de moindre importance, mais qui a déjà été faite par d'autres groupes d'évaluation,¹⁵⁹ se rapporte au système de mise en référence : une amélioration de celui-ci par l'ANDRA serait très utile aux personnes chargées d'une revue critique. Il est souvent difficile de localiser les informations techniques sur des sujets importants qui sont référencées dans divers documents. La difficulté d'accès à la documentation n'affaiblit pas nécessairement la crédibilité d'un argument, mais en réduit souvent l'impact, la force et le caractère percutant. Nombres de rapports et de publications de l'ANDRA sont écrits pour les initiés, qui seuls reconnaissent sans difficulté les acronymes, les abréviations, la structure de l'organisation, ou les divers participants au programme. Un programme de recherche sur les déchets nucléaires suscite toujours un intérêt très vif à l'extérieur, et justifierait une approche plus ouverte de la part de l'ANDRA dans la préparation de ses rapports. Un exemple typique est donné par le rapport de l'ANDRA *Résultats des travaux de reconnaissance géologique, Janvier 1994 – Mars 1996*¹⁶⁰ qui donne un résumé – et seulement un résumé – des propriétés géomécaniques. Le lecteur ne dispose d'aucune indication sur l'endroit où il pourrait obtenir plus d'informations sur la façon dont les essais ont été effectués, sur le nombre d'essais réalisés, sur les raisons qui mènent à la conclusion (importante) que la construction sera possible sans problèmes particuliers, etc. La même critique est valable pour le *Dossier 2001 Argile*.¹⁶¹

L'ANDRA pourrait (re ?) envisager si l'essai de scellement proposé est effectivement l'essai le plus important et le plus fondamental pouvant être réalisé, dans une période relativement courte. Cela est d'autant plus vrai que la nature de l'essai est plutôt artificielle. Cette nature artificielle soulève certainement d'autres questions sur sa représentativité pour le scellement définitif du site de stockage dans la réalité. La question se pose de savoir, notamment dans le cas de l'argilite, si la zone perturbée aura eu le temps de finir de se développer si un essai de scellement est programmé dans les mois suivant son creusement. Ou bien serait-il plus raisonnable d'attendre (des années ?) pour être en mesure d'évaluer de façon réaliste l'évolution dans le temps de la zone perturbée.

Afin de démontrer d'une façon convaincante que le scellement sera possible et fiable, un programme plus complet et plus réaliste de recherche sur le scellement serait souhaitable. Cela est d'autant plus vrai vue l'importance cruciale du rôle de la performance des scellements dans la performance du système géologique de confinement.¹⁶² Un tel programme comprendrait des études sur la meilleure approche pour traiter la question de l'EDZ, la façon de mettre en place les scellements et de les tester. Ce programme pourrait

¹⁵⁸ Par exemple Rejeb, 2000

¹⁵⁹ CNE, 2002, p. 17, p. 38 ; OECD-NEA, 2003, p. 55

¹⁶⁰ ANDRA Résultats, 1996

¹⁶¹ ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B

¹⁶² ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B, Section VI.4.3.6

être réalisé dans une section de l'installation souterraine consacrée à l'essai de scellement. Un tel programme d'essai de scellement pourrait exiger un engagement sur de longues années. Il serait très souhaitable qu'un tel programme de scellement comprenne une recherche plus complète et plus détaillée sur l'influence des pratiques de construction sur le développement et les caractéristiques de l'EDZ, par exemple en comparant les caractéristiques de l'EDZ en fonction des méthodes de creusement de soutènement/armature. Il serait de même très utile d'entreprendre une recherche complémentaire sur les conséquences de la réactivation de la propagation de l'EDZ causée par la nécessité d'enlever le soutènement/armature. La même chose est vraie pour l'investigation des technologies qui pourraient être nécessaires pour prévenir ce genre de réactivation. Idéalement, une telle recherche devrait être conduite dans un endroit où le soutènement et l'EDZ ont été soumis aux effets combinés des charges mécanique, thermique, hydrologique, et chimique, par exemple dans un endroit (de la taille d'une pièce/à l'échelle d'une alvéole ?) où un essai chauffant prolongé aura été effectué. Évidemment pour mener à bien cet essai il faudrait compter plusieurs années (en supposant un minimum de quelques années pour un essai chauffant à grande échelle).

La recommandation de la Commission nationale d'évaluation d'effectuer des forages de reconnaissance déviés est très pertinente, notamment parce que les retards pris par les travaux de construction limiteront la superficie des installations souterraines et ce à une distance très voisine des puits d'accès. Les forages déviés fourniraient des informations d'une valeur inestimable tout particulièrement s'ils pouvaient traverser l'horizon du site de stockage et les formations sus et sous-jacentes. De plus cette information répondrait directement aux exigences de la Règle fondamentale de sécurité. Un des avantages les plus importants qui seraient retirés de ces forages serait d'obtenir des éléments d'information physiques directs sur l'homogénéité/l'hétérogénéité et la variabilité spatiale de la couche hôte et des formations encaissantes. L'ANDRA a procédé à ce type de forage en 2004¹⁶³ mais dans ce rapport nous n'avons pas pu consulter les données obtenues à partir de ces forages.

Les forages déviés auraient l'avantage supplémentaire important de fournir une quantité d'information beaucoup plus grande sur les aspects structuraux verticaux et subverticaux tout particulièrement les diaclases et les failles (même si la présence de ces dernières est peu probable, la confirmation physique directe de leur absence semblerait tout à fait valable). Tout système dense et important de diaclases verticales et/ou subverticales affectera vraisemblablement le comportement du massif rocheux, certainement dans le champ proche. Par conséquent ces systèmes auront des implications potentielles pour l'EDZ, la stabilité à court et long terme des cavités, et donc sur la réversibilité – sans compter les aspects évidents du confinement des déchets tels que des voies de circulation, le contournement des barrières absorbantes, etc. Les forages déviés pourraient être employés pour fournir des informations supplémentaires sur le champ de contrainte. Ils pourraient également fournir des informations sur la stabilité probable, et sur tous les problèmes potentiels de stabilité qui pourraient intervenir dans des excavations horizontales proches de l'horizontale.

¹⁶³ CNE 2004

Une autre alternative complémentaire, et même préférable, aux forages déviés consisterait à faire des forages horizontaux à partir de l'installation souterraine, dans la mesure où ces travaux peuvent être effectués sans interférer avec d'autres efforts de caractérisation se déroulant au même endroit. Les forages horizontaux, à l'instar des forages déviés, permettront de confirmer la présence ou l'absence d'aspects structuraux verticaux et/ou subverticaux et de les caractériser. Les forages horizontaux ont aussi l'avantage, par rapport aux forages déviés creusés à partir de la surface, de ne pas créer une possibilité d'ouverture de voies artificielles de circulation à travers tout l'horizon du site de stockage ou certaines sections.

Etant donné que l'ANDRA reconnaît que les réparations des dommages autour des cavités seront difficiles,¹⁶⁴ on peut se demander s'il ne serait pas préférable d'essayer de réduire au minimum de tels dommages par un contrôle des méthodes de construction utilisées, et si une attention suffisante a été prêtée aux moyens de réduire au minimum les dommages produits par les excavations et les travaux de construction. Les documents examinés ne permettent pas de savoir clairement comment de tels contrôles seront appliqués, par exemple, pendant le fonçage actuellement en cours des puits, ni quels contrôles pourraient être prévus, mis en place et surveillés pendant la construction du site de stockage. Néanmoins, nous constatons qu'un effort considérable est prévu pour caractériser l'EDZ dans les installations du laboratoire souterrain. Nous recommandons que l'ANDRA prenne plus explicitement en compte l'impact des pratiques en matière de construction sur la performance de sûreté du site de stockage, et envisage d'étudier l'impact des différentes options de méthode de construction dans le laboratoire souterrain, vraisemblablement après 2005. Les variables fondamentales qui décrivent l'interaction entre la roche et le soutènement laquelle détermine l'ampleur et l'importance des dommages potentiels sont bien définies.¹⁶⁵ On ne sait en revanche pas très bien si des études in situ sont prévues pour déterminer, éventuellement numériquement, ce qu'il est nécessaire de faire pour réduire les dommages à un niveau acceptable, ou si cette approche est même effectivement envisagée dans le cadre des investigations, de la conception, ou de la programmation du site de stockage.

Il semblerait souhaitable d'expliquer de façon plus approfondie comment les résultats des essais de dilatation proposés¹⁶⁶ seront analysés et interprétés vis-à-vis du comportement de l'argilite dans des conditions de contrainte très différentes. Bien que des essais de dilatation soient poursuivis dans le cadre d'un programme d'expérimentation plus vaste qui comprend une surveillance par extensomètres, par vitesse sismique, etc., il apparaît que ceux-ci soient les seuls essais visant à mesurer directement la rigidité de la masse rocheuse. Par conséquent, il est d'un intérêt tout particulier de s'assurer que les paramètres de rigidité (par exemples le module de Young?) sont reliés aux valeurs des paramètres qui seront utilisés pour la modélisation, ou peuvent être comparés à la rigidité déjà utilisée, c'est-à-dire la modélisation de l'étendue de l'EDZ.

¹⁶⁴ ANDRA Cahier des charges KEY, 2002

¹⁶⁵ ANDRA Cahier des charges KEY, 2002, section 2.1.3, p. 13

¹⁶⁶ ANDRA Programme prévisionnel 1999, ANDRA Cahier des charges E-GIS, 2000

En ce qui concerne plus généralement la caractérisation mécanique de la roche, nous recommandons que l'ANDRA envisage de tester et modéliser plus explicitement les propriétés et le comportement des discontinuités, par exemple des plans de stratification et des diaclases, dans la roche hôte (et aussi, mais secondairement, dans les formations sus et sous-jacentes). Il est bien connu et largement admis que les discontinuités ont souvent une influence dominante sur le comportement de la masse rocheuse.¹⁶⁷ Bien qu'il ne soit pas immédiatement évident de savoir si oui ou non, et dans quelle mesure, les discontinuités peuvent affecter ou dominer le comportement (thermo -, hydro-, chimio-) mécanique, celles-ci ne peuvent certainement pas être ignorées. L'intégration de leurs effets dans un comportement d'ensemble moyen du massif rocheux est une simplification qui peut être acceptable pour certaines applications,¹⁶⁸ mais pour une structure aussi critique qu'un site de stockage il serait de loin préférable de la démontrer plutôt que de la supposer

L'ANDRA reconnaît¹⁶⁹ que pour certains types d'essais en laboratoire le nombre d'essais réalisés peut être trop limité pour être statistiquement significatif. Nous recommandons que des essais supplémentaires, là où ils font défaut, soient réalisés aussitôt que possible, par exemple dès que des spécimens pourront être obtenus à partir des puits et/ou de la niche. Un tel essai complémentaire en laboratoire apportera non seulement une meilleure confiance statistique dans les données, mais fournira aussi des données supplémentaires pour traiter les questions de variabilité spatiale. Cet essai peut vraisemblablement être mené avec une interférence minimale et même inexistante avec l'essai souterrain in situ.

Il est plutôt surprenant de constater que dans le critère de défaillance de Hoek et Brown, le paramètre s , est choisi égal à 1 à la fin de la discussion sur la détermination en laboratoire des propriétés de la roche. Selon le tableau 4.4-0.1, $s = 1$ est employé pour la conception souterraine. Ceci semble être une approche plutôt non pénalisante¹⁷⁰ et mérite donc certainement d'en poursuivre l'élaboration et la justification. Évidemment, dans une certaine mesure, ce choix du paramètre s est compensé par la valeur réduite proposée pour la force compressive uniaxiale. Mais cette approche n'est pas très courante, et il n'est pas du tout sûr qu'elle soit suffisamment majorante, ou réaliste. Nous admettons que le choix d'une résistance à long terme ou d'une réduction de celle-ci est une question qui a toujours posé problème,¹⁷¹ et fait l'objet de nombreuses incertitudes.¹⁷²

On peut avancer l'argument que ces questions préliminaires de conception, ou que ces aspects technologiques d'implémentation sont vraisemblablement des paramètres de conception critiques même pour le laboratoire un situ. Il sera donc nécessaire de les évaluer dans tous les creusements souterrains, par exemple les puits et les galeries, dans le cadre de l'évaluation de la faisabilité du site. Les questions suivantes se posent : ces paramètres sont-ils réalistes en terme de leur utilisation pour décrire le comportement de

¹⁶⁷ Par exemple CFMR, 2000, section 4.1, Hudson et Harrison, 1997, p. 113

¹⁶⁸ Par exemple CFMR, 2000, section 5.8

¹⁶⁹ ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001, section IV.2.4

¹⁷⁰ Comparer par ex. avec Hoek et al., 1995, tableau 8.4

¹⁷¹ Par exemple Hoek et Brown, 1980, p. 150

¹⁷² Par exemple Fairhurst, 1999, pp 9-10

la masse rocheuse in situ ? Et, par conséquent, sont-ils pertinents pour l'évaluation de l'étendue, de la géométrie et du développement mécanique de l'EDZ ? Une confirmation sur le terrain, ou plus vraisemblablement un ajustement des paramètres basé sur des observations sur le terrain, constitueraient un exercice inestimable pour établir la confiance. Par contre, si moins d'ajustements sont nécessaires, et si la sélection initiale de la valeur du paramètre s'avère plus pertinente, l'approche en sera d'autant plus crédible, tout en tenant compte qu'en matière d'ingénierie géotechnique basée sur des expériences in situ des ajustements sont quasiment toujours nécessaires.¹⁷³ Le choix de valeurs éventuellement non pénalisantes de résistance pour la conception est particulièrement préoccupante étant donnée l'exigence de stabilité à long terme pour cette structure, et la nécessité reconnue de réduire au minimum la taille de l'EDZ, et l'intensité de tout dommage qu'elle pourrait subir. Les observations approfondies in situ prévues dans le laboratoire souterrain permettront vraisemblablement une meilleure évaluation de quelles sont les "meilleures" valeurs de paramètres effectives qui peuvent, et seront employées pour de tels exercices de calibrage.

2.12 References

- AkEnd, 2002 AkEnd, 2002, *Site Selection Procedures for Repository Sites, Recommendations of the AkEnd – Committee on a Site Selection Procedure for Repository Sites* [Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte] established by (German) Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety [Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)], printed by W & S Druck GmbH, Köln.
- Alheid et al., 1999 Alheid, H.-J., M. Knecht, J.-Y. Boisson, F. Homand-Etienne & S. Pepa, Comparison of in-situ hydraulic and seismic measurements in the excavation damaged zone of underground drifts, *Comptes-rendus, 9ieme Congrès international de mecanique des roches = Proceedings, 9th International Congress on Rock Mechanics* (1999, Paris, France) G. Vouille & P. Berest, Eds.. Balkema Publishers, Lisse ; Exton (PA). Tome 2, pp. 1263-6.
- ANDRA Cahier des charges E-GIS, 2000 ANDRA, 1999f, *Cahier des charges de réalisation de l'experimentation : E-GIS, Caractérisation géomécanique in-situ des argilites du Callovo-Oxfordien, Objectifs scientifiques et résultats attendus*. Identification: C CC AGEM 99-083, Émetteur: DS/GM. [Bure] : Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, ANDRA, Date d'origine. 01/12/1999. Rév. A: 30/10/00.
- ANDRA Cahier des charges E-REG, 2001 ANDRA, 2000, *Cahier des charges de réalisation de l'experimentation : E-REG, Réponse hydro-mécanique de l'argilite au creusement d'une galerie*, Identification: C CC AGEM 00-060/B. Émetteur: DS/GM. [Bure] : Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, ANDRA, Date d'origine. 23/10/2000. Rév. B: 15/05/2001.
- ANDRA Cahier ANDRA, 2002, *Cahier des charges de réalisation de l'experimentation :*

¹⁷³ Par exemple au Canada, Chandler, 1999 ; aux Etats-Unis Blair, et al.,2001

des charges KEY, 2002	<i>KEY, Maîtrise de l'endommagement au droit d'un serrement de galerie</i> , Identification: C CC ASMG 02-012, Émetteur: DS/MG. [Bure] : Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, ANDRA, Date d'origine. 02/05/2002. Rév. B: 20/06/2002.
ANDRA Cahier des charges REP, 2001	ANDRA, 1999d, <i>Cahier des charges de réalisation de l'experimentation REP, Réponse mécanique de l'argilite au creusement du puits d'accès</i> , Objectifs scientifiques et résultats attendus. Identification: C CC AGEM 99-049, Émetteur: DS/MG. [Bure] : Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, ANDRA, Date d'origine. 25/06/1999. Rév. C: 04/12/01
ANDRA Cahier des charges SUG, 2001	ANDRA, 1999e, <i>Cahier des charges de réalisation du suivi scientifique du creusement des galeries du laboratoire souterrain : SUG, Objectifs scientifiques et résultats attendus</i> . Identification: C CC ADS 00-001, Émetteur: DS, [Bure] : Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, ANDRA, Date d'origine. 17/12/99. Rév. B: 12/11/2001.
ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B	ANDRA, 2001, <i>Dossier 2001 Argile, sur l'avancement des études & recherches relatives à la faisabilité d'un stockage de déchets à haute activité et à vie longue en formation géologique profonde : Rapport de Synthèse – Partie B</i> . [Châtenay-Malabry?]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, Décembre.
ANDRA Programme prévisionnel 1999	ANDRA, 1999c, <i>Programme prévisionnel de recherche en laboratoire souterrain : Site de Meuse/Haute Marne, Presentation generale, Description detaillée des experimentations envisagees</i> . Identification: CRP ADS 99-003, Émetteur: DS/SR. Bure: Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne, Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, 03/02/99
ANDRA Référentiel Géologique Tome 3, 2001	ANDRA, 1999a, <i>Référentiel Géologique du Site de Meuse/Haute-Marne, Tome 3, Les connaissances à l'échelle du secteur</i> , Identification: A RP ADS 99-005/B. Émetteur: Direction Scientifique, Date d'origine. Janvier 1999. Rév. B: 18/07/2001
ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001	ANDRA, 1999g, <i>Référentiel Géologique du site de Meuse/Haute-Marne, Tome 4, Le Callovo-Oxfordien</i> , Identification: A RP ADS 99-005/B, Émetteur: Direction Scientifique, Date d'origine. Janvier 1999. Rév. B: 16/07/2001.
ANDRA Référentiel Géologique Tome 5, 2001	ANDRA, 1999b, <i>Référentiel Géologique du Site de Meuse/Haute-Marne, Tome 5, Etat d'avancement de la modélisation</i> . Identification: A RP ADS 99-005, Émetteur: Direction Scientifique, Date d'origine. Janvier 1999. Rév. B; 03/09/2001
ANDRA Résultats, 1996a	ANDRA, 1996a, <i>Laboratoires souterrains d'études géologiques : Résultats des travaux de reconnaissance géologique, Janvier 1994 – Mars 1996</i> . Cover title: Recherches préliminaires à l'implantation des laboratoires de recherche souterrains : Bilan des travaux. Châtenay-

- Malabry : Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, 9 avril 1996
- ANDRA, 2002-2005 ANDRA, 2002-2005, *Projet HAVL-Argile Projet Programme Scientifique 2002-2005*.
- ASTM, 2000 ASTM D 4644 – 87 (Reapproved 1998), 2000, Standard test method for slake durability of shales and similar weak rocks, *Annual Book of ASTM Standards 2000*, ASTM, West Conshohocken, PA, USA. Section 4, Construction, Volume 04.08, pp. 778-780
- Bemer et al., 2002 Bemer, E., P. Longuemare, O. Vincke, 2002, Poroelastic parameters of Meuse/Haute-Marne argillites: effect of loading and saturation states, pp. 199-200, *Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*, International Meeting, Reims, December 9-12, 2002, Abstracts, ANDRA, Châtenay-Malabry, France.
- Blair et al, 2001 Blair, Stephen C., Steven R. Carlson, & Jeffery L. Wagoner, 2001, Distinct element modeling of the drift scale test, pp. 527-531, *Rock Mechanics in the National Interest*, Vol. 1, Derek Elsworth, John P. Tinucci, and Keith A. Heasley, eds., *Proceedings of the 38th U.S. Rock Mechanics Symposium, DC Rocks 2001*, Washington, D.C., USA, 7-10 July 2001. Balkema Publishers, Lisse ; Exton (PA).
- Boyle et Rowe, 1998 Boyle, William and Patrick Rowe, 1998, Rock mechanics of the proposed United States nuclear waste repository, pp. 65-90, *Proceedings of the International Workshop on the Rock Mechanics of Nuclear Waste Repositories*, Saeid Saeb and Christopher Francke, eds., Vail, CO, June 5-6, 1998, American Rock Mechanics Association, Alexandria, Virginia, 1999.
- Brown, 1981 Brown, E.T., Editor, 1981, Suggested method for determination of the slake-durability index, pp. 92-94, *Rock Characterization Testing & Monitoring*, ISRM Suggested Methods, Published for the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics, Pergamon Press, Oxford; New York.
- CFMR, 2000 CFMR, 2000, *Manuel de Mécanique des Roches*, Tome 1: Fondaments, par le Comité Français de Mécanique des Roches, Coordonné par Françoise Homand et Pierre Duffaut. Les Presses de l'Ecole des Mines, Paris.
- Chandler, 1999 Chandler, Neil A., 1999, Geotechnical and rock mechanics research for nuclear fuel waste management in Canada, pp. 91 – 115, *Proceedings of the International Workshop on the Rock Mechanics of Nuclear Waste Repositories*, Saeid Saeb and Christopher Francke, eds., Vail, CO, June 5-6, 1998, American Rock Mechanics Association, Alexandria, Virginia, 1999.
- CNE «réversibilité», 1998 CNE, 1998, *Réflexions sur la réversibilité des stockages*, Commission Nationale d'Evaluation Relative aux Recherches sur la Gestion des Déchets Radioactifs, Paris, Juin. On the Web at <http://www.ladocfrancaise.gouv.fr/BRP/004001166/0000.htm>.
- CNE, 1999 CNE, 1999, *Rapport d'Evaluation N° 5*, Commission Nationale d'Evaluation Relative aux Recherches sur la Gestion des Déchets

- Radioactifs, Paris, Juin.
- CNE, 2001 CNE, 2001, *Rapport d'Evaluation N° 7*, Commission Nationale d'Evaluation Relative aux Recherches sur la Gestion des Déchets Radioactifs, Paris, Juin. On the Web at <http://www.ladocfrancaise.gouv.fr/brp/notices/014000485.shtml>.
- CNE, 2002 CNE, 2002, *Rapport d'Evaluation N° 8*, Commission Nationale d'Evaluation Relative aux Recherches sur la Gestion des Déchets Radioactifs, Paris, Septembre.
- CNE, 2003 CNE, 2003, *Rapport d'Evaluation N° 9*, Commission Nationale d'Evaluation Relative aux Recherches sur la Gestion des Déchets Radioactifs, Paris, Juin.
- CNE, 2004 CNE, 2004, *Rapport d'Evaluation N° 10*, Commission Nationale d'Evaluation Relative aux Recherches sur la Gestion des Déchets Radioactifs, Paris, Juin.
- Conil-Aublivé et al., 2002 Conil-Aublivé, Nathalie, Irimi Djeran-Maigre, Richard Cabrillac, Kun Su, 2002, Poroplastic damage model for geomaterial, pp. 193-194, *Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*, International Meeting, Reims, December 9-12, 2002, Abstracts, ANDRA, Châtenay-Malabry, France.
- Cosenza et al., 2002 Cosenza, Ph., M. Ghoreychi, G. Vasseur, S. Violette, 2002, An indirect approach to predict Biot's coefficient of argillaceous rocks, pp. 197-198, *Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*, International Meeting, Reims, December 9-12, 2002, Abstracts, ANDRA, Châtenay-Malabry, France.
- De Marsily et al., 2002 de Marsily, Ghislain, Julio Gonçalves, Sophie Violette, Maria-Clara Castro, 2002, Migration mechanisms of radionuclides from a clay repository toward adjacent aquifers and the surface, *C.R. Physique 3*, 945-959.
- Dereeper et Volckaert, 2002 Dereeper, Bernard et Volckaert, Geert, 2002, The Reseal Project: a large scale shaft sealing demonstration test, pp. 269-270, *Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*, International Meeting, Reims, December 9-12, 2002, Abstracts, ANDRA, Châtenay-Malabry, France.
- Fairhurst, 1999 Fairhurst, Charles, 1999, Rock mechanics and nuclear waste repositories, Keynote paper, pp. 1 – 43, *Proceedings of the International Workshop on the Rock Mechanics of Nuclear Waste Repositories*, Saeid Saeb and Christopher Francke, eds., Vail, CO, June 5-6, 1998, American Rock Mechanics Association, Alexandria, Virginia, 1999.
- Fleureau et al., 2002 Fleureau, Jean-Marie, Arézou Modaressi, Muzahim Al-Mukhtar, Luc Deroo, Odile Ozanam, 2002, Evaluation of crushed clay rocks as a filling material for wastes storage galleries, pp. 179-180, *Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*, International Meeting, Reims, December 9-12, 2002, Abstracts, ANDRA, Châtenay-

- Malabry, France.
- Gasc-Barbier et al., 1999 Gasc-Barbier, M., M. Ghoreychi, and D. Tessier, 1999, Comportement mécanique de roches argileuses profondes: incidence de la texture, *Comptes-rendus, 9ieme Congrès international de mecanique des roches = Proceedings, 9th International Congress on Rock Mechanics* (1999, Paris, France) G. Vouille & P. Berest, Eds.. Balkema Publishers, Lisse ; Exton (PA). Tome 2, pp. 595 – 600.
- GdR FORPRO, 2002 GdR FORPRO, 2002, *Observatoire interdisciplinaire sur l'EDZ: Programme des expérimentations du GdR FORPRO dans le Laboratoire souterrain de recherche de Meuse/Haute-Marne et annexes 1 et 2 (synthèse des demandes en ouvrages et en équipements)*, Centre national de la recherche scientifique ; ANDRA, Version du 24 juin 2002.
- Goodman, 1989 Goodman, Richard E., 1989, *Introduction to Rock Mechanics*, 2nd ed. Wiley, New York.
- Gratier et al., 2002 Gratier, J.P., L. Jenatton, R. Guiguet, 2002, Long-term behavior of the natural barrier in the Bure site: creep, swelling and pressure-solution studied by indentor techniques, pp. 93-94, *Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*, International Meeting, Reims, December 9-12, 2002, Abstracts, ANDRA, Châtenay-Malabry, France.
- Hakami et Olofsson, 2002 Hakami, Eva, and Stig-Olof Olofsson, 2002, *Numerical modelling of fracture displacements due to thermal load from a KBS-3 repository*, Technical Report TR-02-08, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Sweden, January.
- Heitz, et al., 1999 Heitz, J.-F., D. Fourmaintraux, and N. Hoteit, 1999, Ovalisations de forages dans une formation argiliteuse: analyse mécanique en retour et relations avec les caractéristiques physiques, *Comptes-rendus, 9ieme Congrès international de mecanique des roches = Proceedings, 9th International Congress on Rock Mechanics* (1999, Paris, France) G. Vouille & P. Berest, Eds.. Balkema Publishers, Lisse ; Exton (PA). Tome 2, pp. 1095 – 1100.
- Hoek et al., 1995 Hoek, E., P.K. Kaiser, and W.F. Bawden, 1995, *Support of Underground Excavations in Hard Rock*, Balkema, Rotterdam; Brookfield.
- Hoek et Brown, 1980 Hoek, E. and E.T. Brown, 1980, *Underground Excavations in Rock*, Institution of Mining and Metallurgy, London.
- Homand and Cathelieneau Homand, F. and M. Cathelieneau, date unknown (1998?), Etude sur l'évolution des fissures produites par un chargement mécanique et/ou thermique des siltites et des argillites, LAEGO – Rapport ANDRA n° D RP 0ENG 98-013.
- Hoorelbeke et al., 2003 Hoorelbeke, Jean-Michel, Stefan Mayer and Frédéric Plas, 2003, Managing design requirements of the French HLLW programme in clay media, pp. 43-49, *Engineered Barrier Systems (EBS) in the Context of the Entire Safety Case, Workshop Proceedings*, Oxford, United Kingdom, 25-27 September 2002, Nuclear Energy Agency, Organisation for

- Economic Co-operation and Development, Paris, France, 2003.
- Hoteit et al., 1998 Hoteit, N., O. Ozanam, and K. Su, 1998, Geomechanical investigation of an argillaceous formation in the east of France, pp. 185 – 203, *Proceedings of the International Workshop on the Rock Mechanics of Nuclear Waste Repositories*, Saeid Saeb and Christopher Francke, eds., Vail, CO, June 5-6, 1998, American Rock Mechanics Association, Alexandria, Virginia, 1999.
- Hoxha et al., 2002 Hoxha, Dashnor, Albert Giraud, Françoise Homand, Clement Chavant, 2002, A poromechanical model for M/H-M argillite, pp. 51-52, *Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*, International Meeting, Reims, December 9-12, 2002, Abstracts, ANDRA, Châtenay-Malabry, France.
- Hudson et Harrison, 1997 Hudson, John A. and John P. Harrison, 1997, *Engineering Rock Mechanics: An Introduction to the Principles*, Pergamon, Amsterdam ; New York.
- IAEA, 2003 IAEA, 2003, *Geological Disposal of Radioactive Waste, Draft Safety Requirements DS 154*, IAEA Safety Standards Series, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2003-04-01. On the Web at <http://www.iaea.or.at/ns/committees/drafts/ds154.pdf>.
- Kalbantner et Sjöblom, 2000 Kalbantner, Pal and Rolf Sjöblom, 2000, *Techniques For Freeing Deposited Canisters*, Technical Report TR-00-15, SKB, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Sweden.
- Kolmayer et al., 2002 Kolmayer, Philippe, Roméo Fernandes, C. Chavant, 2002, Numerical implementation of a new rheological law for argillites, pp. 195-196, *Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*, International Meeting, Reims, December 9-12, 2002, Abstracts, ANDRA, Châtenay-Malabry, France.
- Lashkaripour, 2002 Lashkaripour, G.R., 2002, Predicting mechanical properties of mudrock from index parameters, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 61: 73-77.
- Lecampion et al., 2002 Lecampion, B., A. Constantinescu and D. Nguyen Minh, 2002, Parameter identification for lined tunnels in a viscoplastic medium, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 26, pp. 1191-1211.
- Malinsky et al., 2002 Malinsky, L., S. Chancole, F. Coste, 2002, Hydromechanical testing of an argillaceous rock, Experimental set up and testing procedure, pp. 201-202, *Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*, International Meeting, Reims, December 9-12, 2002, Abstracts, ANDRA, Châtenay-Malabry, France.
- Martin et Lanyon, 2003 Martin, C.D., and G.W. Lanyon, 2003, Measurement of in-situ stress in weak rocks at Mont Terri Rock Laboratory, Switzerland, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 40, pp. 1077-1088.
- Milnes, 2002 Milnes, Alan Geoffrey, 2002, Swedish deep repository siting programme: Guide to the documentation of 25 years of geoscientific research (1976-2000) , Technical Report TR-02-18, SKB, Svensk

Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Sweden, March.

- Miura et al., 2002 Miura, Kzuhiko, Nasser Hoteit, Kun Su, Odile Ozanam, 2002, Comparison of the two long-term creep modes of rock, pp. 95-96, *Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*, International Meeting, Reims, December 9-12, 2002, Abstracts, ANDRA, Châtenay-Malabry, France.
- Nguyen Minh et al., 1999 Nguyen Minh, D., J. Bergues, and N. Hoteit, 1999, Détermination du comportement mécanique des roches argileuses, *Comptes-rendus, 9ieme Congrès international de mecanique des roches = Proceedings, 9th International Congress on Rock Mechanics* (1999, Paris, France) G. Vouille & P. Berest, Eds.. Balkema Publishers, Lisse ; Exton (PA). Tome 2, pp. 645 – 650.
- OECD-NEA, 2003 OECD, 2003, *The French R&D Programme on Deep Geological Disposal of Radioactive Waste, An International Peer Review of the "Dossier 2001 Argile,"* Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-Operation and Development, Paris, France.
- Pusch, 2001 Pusch, Roland, 2001, *The Buffer and Backfill Handbook, Part 2: Materials and techniques*, Technical Report TR-02-12, Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB, Stockholm, Sweden, December.
- Pusch, 2002 Pusch, Roland, 2002, *The Buffer and Backfill Handbook, Part 1: Definitions, basic relationships, and laboratory methods*, Technical Report TR-02-20, Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB, Stockholm, Sweden, April.
- Règle N° III.2.f Règle N° III.2.f (10 juin 1991) *Règles fondamentales de sûreté relatives aux installations nucléaires de base autres que réacteurs. Tome III: production, contrôle et traitement des effluents et déchets. Chapitre 2: Déchets solides.* Règle N° III.2.f (10 juin 1991) *Tome III: Production, contrôle et traitement des effluents et déchets. Chapitre 2: Déchets solides.* In Règles Fondamentales de Sûreté Relatives aux Installations Nucléaires de Base Autres que Réacteurs, pp. 470-480.
- Rejeb, 2000 Rejeb, Amel, 2000, Mechanical characterisation of the argillaceous Tournemire site (France), IN *Site Characterisation Practice: Proceedings of the International Conference on Rock Engineering Techniques for Site Characterisation*, Bangalore, India, December 6-8, 1999, edited by P.C. Jha and R.N. Gupta. Rotterdam ; Brookfield, VT: Balkema, 2000. pages 45-50/
- Sato et al., 2000 Sato, T., T. Kikuchi, K. Sugihara, 2000, In-situ experiments on an excavation disturbed zone induced by mechanical excavation in Neogene sedimentary rock at Tono mine, central Japan, pp. 105-116, *Engineering Geological Advances in Japan for the New Millennium*, edited by Yuji Kanaori, Kazuhiro Tanaka and Masahiro Chigira, Elsevier, Amsterdam ; New York.
- SKB, 2001 SKB, 2001, *RD&D-Programme 2001*, Technical Report TR-01-30,

- Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Sweden, September.
- SKB, 2002 SKB, 2002, *Äspö Hard Rock Laboratory: Annual Report 2001*, Technical Report TR-02-10, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Sweden, September.
- SKB, 2003 SKB, 2003, *Äspö Hard Rock Laboratory: Annual Report 2002*, Technical Report TR-03-10, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Sweden, June.
- Sugihara et al., 1999 Sugihara, Kozo, Hiroya Matsui, and Toshinori Sato, 1999, In-situ experiments on rock stress condition and excavation disturbance in JNC's geoscientific research program in Japan, a rock mechanical basis of Underground Research Laboratory project, pp. 159-183, *Proceedings of the International Workshop on the Rock Mechanics of Nuclear Waste Repositories*, Saeid Saeb and Christopher Francke, eds., Vail, CO, June 5-6, 1998, American Rock Mechanics Association, Alexandria, Virginia, 1999.
- Valès et al., 2002 Valès, F., P. Bérest, H. Gharbi, 2002, Interaction between creep, swelling and pressure-solution during indentation tests, p. 207, *Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*, International Meeting, Reims, December 9-12, 2002, Abstracts, ANDRA, Châtenay-Malabry, France.
- Vaunat et al., 2002 Vaunat, J., A. Gens, and E.E. Alonso, 2002, A Constitutive Model for Eastern Argillite, pp. 49-50, *Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*, International Meeting, Reims, December 9-12, 2002, Abstracts, ANDRA, Châtenay-Malabry, France.
- Wileveau, 2004 Wileveau, Y., 2004, Determination of in situ stress at the Meuse/Haute-Marne Underground Research Laboratory, Northeastern France, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 6, 05876, 2004 Sref-ID:1607-7962/gra/EGU04-A-05876, 2004. On the Web at <http://www.cosis.net/abstracts/EGU04/05876/EGU04-J-05876.pdf>.
- Wright et al., 2001 Wright, H., J.-M. le Cléac'h and M. Deveughèle, 2001, Altération et rupture d'échantillons d'argilite lors de sollicitations thermomécaniques en conditions humides contrôlées, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 60:59-67.
- Zhang et Rothfuchs, 2002 Zhang, C.L. and T. Rothfuchs, 2002, Experimental Study of Hydromechanical Behaviour of the Callovo-Oxfordian Argillites, pp. 53-5, *Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*, International Meeting, Reims, December 9-12, 2002, Abstracts, ANDRA, Châtenay-Malabry, France.

Chapitre 3. Aspects thermiques dans la conception et la construction des ouvrages d'enfouissement

George Danko

Conclusions principales

Le concept de stockage de l'ANDRA's n'est pas étayé par un modèle numérique crédible, qui satisfait aux objectifs thermiques. Tout particulièrement, l'ANDRA n'a pas démontré dans ses travaux la corrélation entre (a) la conception de stockage, (b) la caractérisation du site, et (c) la modélisation.

Aucune évidence ne se trouve d'une évolution des modèles allant de modèles simples, puis de modèles d'ensemble, ou de modèles conceptuels pour aboutir à des modèles de conception du stockage et d'une évaluation du site. Les possibilités d'évaluer les modèles en les comparant aux résultats expérimentaux directs ont été omises. Les modèles simples décrits dans les documents ne semblent pas satisfaire à l'évaluation/la vérification des propriétés thermophysiques du site.

La raison pour laquelle les résultats de modèles unidimensionnels sont incorporés dans la modélisation inverse des expérimentations in situ n'est pas claire; l'écoulement de la chaleur est loin d'être un problème linéaire et unidimensionnel. Même le modèle analytique bidimensionnel pour un dispositif chauffant d'une longueur infinie s'avère être un modèle très médiocre pour un dispositif utilisant un élément chauffant de seulement 2 m de long. La grande différence entre les modèles bidimensionnels, analytiques, et les modèles tridimensionnels, numériques disqualifie les autres modèles. Il est même contestable que les conditions d'un modèle pour un domaine tridimensionnel qui postule des propriétés matérielles/physiques homogènes et isotropes soit satisfaisant, puisque la stratigraphie du site de Bure révèle des séquences dont les propriétés diffèrent selon les différentes directions.

La conductivité thermique, une des caractéristiques la plus importante du site thermophysique, n'a pas été proprement définie. L'écart-type de ce paramètre est exceptionnellement élevé. Il laisse donc une grande marge d'incertitude dans la capacité du site à dissiper la chaleur. Le nombre d'échantillons utilisés pour établir les propriétés thermophysiques du site à partir d'échantillons de laboratoire semble être trop petit, tout particulièrement quand la possibilité de variabilité spatiale de ces propriétés dans la zone prévue de stockage est prise en compte.

Bien que le régime des températures selon le concept de stockage de référence se situe en dessous du point d'ébullition, il n'est pas impossible d'avoir une situation où la température dépasse le point d'ébullition. Dans certaines circonstances le développement d'un système binaire stable – c'est-à-dire un système caractérisé par des températures soit au dessus, soit en dessous du point d'ébullition - dans la zone de stockage est tout à fait possible. La création d'un cycle de vapeur est par conséquent possible dans certaines conditions de charge thermique, notamment si le matériau tampon de remblayage ne se sature pas et que la zone endommagée ne se re-sature pas en raison de la perte d'eau dans la phase de vapeur causée par les zones de condensation de la zone de stockage.

Puisque, dans la conception du stockage retenue, on peut s'attendre à des températures supérieures au point d'ébullition dans les modules de déchets de type C et de combustible utilisé pendant de longues périodes, ces modules peuvent développer des cycles de vapeur continus dans la zone de stockage et cela pendant des siècles. Cependant, aucun effort de réévaluation n'a pu

être trouvé dans la documentation traitant de la détermination "d'une charge thermique critique" (CTC) pour chaque colis de déchets dans son aire de stockage. La conception et l'exploitation d'une installation nucléaire de stockage dépassant la limite CTC au site de Bure semble être une contradiction en regard de la prévisibilité.

Il n'existe dans les documents aucune discussion et aucune étude justificative de modèle sur l'effet de la ventilation sur la désaturation de la roche, la fissuration secondaire potentielle pendant la ventilation, et l'extension de l'EDZ qui s'ensuit. L'exploitation souple de type entreposage est un vœu indiqué, mais les conséquences d'une telle souplesse en termes d'effets d'altération du site n'ont pas été établies.

Recommandations

1. Propriétés thermophysiques de Bure: Conduire une caractérisation plus détaillée du site de Bure concernant les propriétés thermophysiques, particulièrement celles des alvéoles dédiées au combustible usé

2. Des essais thermiques in situ: Inclure les propriétés thermophysiques et la vérification du modèle thermique dans les essais de chauffage in situ à grande échelle sur le site de Bure

3. Des techniques informatiques plus avancées: Employer des techniques numériques-informatiques de modélisation inverse plus sophistiquées pour l'évaluation des essais thermiques in situ sur le site de Bure.

4. Modes pour les processus thermiques: Développer/adopter et vérifier des modèles numériques de base de conception pour les processus thermiques qui comprennent les domaines relatifs à l'échelle proche du colis de déchet, aussi bien qu'à l'échelle du massif. Coupler ces modèles aux effets thermo-hydrologiques et géomécaniques pertinents.

5. Limites de la CTC : Établir les limites de la CTC pour les alvéoles dédiées à recevoir le combustible usé en utilisant les propriétés du site et les modèles couplés thermo-hydrologiques-vapeur/air pertinents.

6. La migration de la vapeur à haute température : Étudier les effets éventuels (changements chimiques, minéralisation) de la migration à hautes températures de vapeur dans le matériau de remblayage comme dans les fractures de la zone endommagée dans l'argilite.

7. Effet de la ventilation pendant des durées prolongées: Evaluer d'une façon critique les effets de la ventilation sur la désaturation de la roche, la fissuration secondaire qui en résulte et l'extension de l'EDZ tout particulièrement dans le contexte d'une stratégie d'exploitation d'une installation d'entreposage pour laquelle les galeries pourraient être maintenues ouvertes et aérées pendant des durées prolongées

8. Modèle thermique-hydraulique-de ventilation couplé . Utiliser un modèle de simulation thermique-hydraulique-de ventilation couplé pour l'analyse de la température et des champs de désaturation dans et autour des galeries de stockage dans l'EDZ , ceci pendant la période précédant la fermeture.

3.1 Introduction

Quelque soit le site de stockage de déchets nucléaires à haute activité, l'effet thermique sur la sûreté et la performance de l'installation est une question de premier ordre. Dès le début de ce chapitre, il est nécessaire d'apporter quelques clarifications sur la nature des matériaux nucléaires exothermiques destinés à être évacués dans le site de stockage. On considère généralement qu'un matériau nucléaire à stocker pendant une période indéfinie (bien que réversible) dans un site de stockage géologique est un "déchets." Ce n'est toutefois pas le cas dans le programme français d'entreposage de déchets nucléaires. Dans toute la documentation de l'ANDRA, le terme «Déchet» se réfère spécifiquement aux matières nucléaires de types B et C. La chaleur émise par les déchets de type B est assez faible pour être insignifiante, alors que celle émise par les déchets de type C représente une charge thermique considérée de moyenne à élevée.¹⁷⁴ Une décroissance nucléaire intense à laquelle est associé un dégagement thermique élevé est le fait d'un autre matériau nucléaire : "le combustible usé" spécifiquement le MOX (Mixtes Oxydes) et l'UOX (combustible à base d'oxyde d'uranium) ainsi que l'URE (Uranium de retraitement réenrichi) qui sont les combustibles nucléaires du programme français. Dans le scénario de mise en place, S2 également appelé le modèle « de stockage direct » il est envisagé d'évacuer le combustible usé dans le site de stockage.¹⁷⁵ L'inventaire du combustible usé est significatif. Il représente plus de 60 % de l'ensemble des matériaux nucléaires à stocker dans le site de stockage proposé.¹⁷⁶ En raison de son important volume et puisque le stockage du combustible nucléaire fait partie du programme français de gestion de déchets, dans ce chapitre le terme "déchets" est employé dans un sens général pour tous les matériaux nucléaires évacuables.

L'importance des questions thermiques est sous tendue par trois raisons majeures:

1. Tout d'abord, avec l'impact des travaux de construction, la chaleur est la principale perturbation durable sur la formation hôte. Une fois les déchets mis en place et les cavités remplies de matériaux de remblayage et scellées, la couche hôte est reconstituée. Toutefois, la chaleur l'empêche de revenir à son état d'origine. Des milliers d'années s'écouleront avant que la charge thermique s'affaiblisse assez pour que les processus causés par la chaleur se dissipent.
2. Ensuite, l'effet de la chaleur, c'est-à-dire, l'élévation de la température du site de stockage se développe plus lentement. Par conséquent l'évolution de la température maximale peut être retardée de plusieurs centaines d'années. Une erreur de prédiction sur la charge thermique pourrait induire des effets permanents et mêmes impossibles à corriger.
3. Finalement, cette longue période de temps s'applique à une roche hôte de volume et dimensions importants, bien supérieurs en taille à la zone de travaux. D'un autre côté, les zones du champ proche, à proximité de la source de chaleur, ont une influence majeure sur le champ thermique. Cet aspect multidimensionnel du problème pose de grands défis pour la modélisation et la prédiction des réponses

¹⁷⁴ Voir la discussion dans ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt. A et Pt.B

¹⁷⁵ ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.A

¹⁷⁶ ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.A, Tableau VI.1-1

thermiques. En outre, l'important volume de la roche hôte soulève une question importante concernant l'hétérogénéité et la variabilité spatiale. Les variations spatiales de la charge thermique au sein de la zone de mise en place des déchets, ainsi que les variations des propriétés thermiques de la roche hôte ont comme effet de rendre plus complexes tant les tâches de modélisation que celles d'acquisition des propriétés du site

Quatre thèmes seront abordés ici :

1. le programme de caractérisation thermique du site et les données de base nécessaires pour la conception du site de stockage;
2. la démonstration des modèles analytiques destinés à évaluer la réponse thermo-hydrologique des barrières ouvragées et géologiques;
3. les méthodes d'évaluation/de mesures à employer pour déterminer les propriétés thermo-hydrologiques des éléments du système des barrières ouvragées notamment les scellements et les matériaux de remblayage ; et
4. le programme de gestion pour caractériser, mélanger, et, éventuellement laisser en entreposage des déchets nucléaires avant leur mise en place dans le site d'enfouissement.

3.2 Programme de caractérisation thermique du site et base des données de conception qui en découle

Le programme de recherche présenté dans le document *E-TER*¹⁷⁷ décrit un programme détaillé dont l'objectif est l'étude du comportement et des propriétés des argilites sous l'effet de la charge thermique. Dans le chapitre 2, le document explique les objectifs et les expérimentations à mener pour caractériser:

- «le comportement thermique, par la caractérisation des propriétés thermiques (conductivité ou diffusivité thermique et chaleur spécifique) ;
- le couplage thermomécanique : déplacement, dilatation, endommagement et fissuration thermique, modules d'élasticité et de résistance sous température ;
- les couplages thermohydraulique et thermohydromécanique : dilatation différentielle entre le fluide interstitiel et la matrice solide, désaturation, perméabilité, vaporisation, surpression et dépression interstitielles.»

Le document E-TER a été préparé en 2000 à partir des conclusions du programme de mesures en laboratoire mené entre 1994 et 1996. D'après les études de laboratoire décrites dans le document *Modèles rhéologiques des argilites de l'EST – bilan d'étape des études rhéologiques*,¹⁷⁸ il s'avèrerait que les couplages, c'est-à-dire, les interactions entre les systèmes mécanique-thermique (M→T) et hydraulique-thermique (H→T) sont négligeables. Il est donc possible de découpler l'équation thermique des équations mécaniques et hydrauliques.

¹⁷⁷ ANDRA Cahier des charges E-TER 2001

¹⁷⁸ ANDRA Modèles rhéologiques 1999 cité dans ANDRA Cahier des charges E-TER, Section 2.1.1

3.2.1 L'évaluation de l'interaction H→T

3.2.1.1 La question de la perméabilité

L'hypothèse de l'interaction H→T présentée dans le document E-TER se base essentiellement sur les résultats d'essais en laboratoire obtenus sur la perméabilité de la roche hôte. La conclusion est logique et semble pouvoir être acceptable puisqu'elle traite tout particulièrement de la très faible perméabilité de l'argilite. La littérature fait apparaître qu'un consensus est atteint sur le sujet de l'interaction H→T dans les roches hôtes de faible perméabilité. Une discussion sur ce sujet est présentée dans E-TER.¹⁷⁹ Selon la conclusion de Giraud présentée dans Cuisiat et Besnus,¹⁸⁰ le modèle hydrologique n'est pas nécessaire pour résoudre le problème thermique. Cependant, il n'est pas démontré que cette hypothèse sera également valable pour la zone perturbée autour des excavations résultant des dommages créés par le creusement des galeries et la fracturation de la roche hôte. L'analyse en laboratoire d'échantillons, même prélevés dans la zone endommagée, ne pourra pas forcément représenter fidèlement les conditions in situ. Par nature les échantillons sont de petites dimensions et ne peuvent pas préserver les caractéristiques des fractures. Par conséquent, il n'est pas évident que l'hypothèse sur l'interaction H→T demeurera valide pour la zone la plus importante de la roche hôte du site d'enfouissement proposé, c'est-à-dire, la zone à proximité immédiate de la galerie de mise en place pendant la phase thermique.

L'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) étudie les propriétés de la formation d'argilite dans le laboratoire souterrain de Tournemire (France).¹⁸¹ En raison de la conductivité hydraulique très faible de l'argilite, le coefficient de Darcy à travers cette roche devrait être très faible. Des traceurs comme le deutérium et le chlorure sont utilisés pour étudier l'écoulement liquide des eaux interstitielles. Les résultats indiquent que le mécanisme d'écoulement prépondérant est celui de la diffusion. Cependant il pourrait exister d'autres mécanismes de transfert à proximité des failles et des fractures. Alors que le modèle de transport par diffusion moléculaire apparaît valable pour une roche argileuse massive dépourvue de fractures, l'écoulement à proximité des fractures et des failles donne des résultats plus complexes et variés. Par conséquent, bien que l'on s'attende à un transport des traceurs surtout diffusif dans les argilites, un deuxième processus dans la zone perturbée pourrait renforcer la migration. L'important gradient thermique au sein et autour de la zone des colis de déchets pourrait engendrer un processus secondaire de cette nature.

On peut faire l'hypothèse que toute apparition d'humidité dans la matrice et les fractures de l'argilite causée par la charge thermique sera plus importante autour des alvéoles, là où le gradient thermique est le plus élevé. Cette zone coïncide avec la zone affectée et vraisemblablement endommagée par le creusement, dénommée Excavation Damaged Zone (EDZ). Il se peut que la désaturation ainsi que la ventilation de l'EDZ durant la

¹⁷⁹ ANDRA Modèles rhéologiques 1999 cité dans ANDRA Cahier des charges E-TER, Section 2.1.1 | Cuisiat & Besnus 1999

¹⁸⁰ Cuisiat et Besnus 1999, citing Giraud 1993

¹⁸¹ Patriarche 2001

phase de construction des ouvrages induisent des fissurations secondaires et une extension de l'EDZ. Le concept de réversibilité/flexibilité tient une grande place dans le programme français. Cependant il risque d'imposer de longues périodes de ventilation pour les galeries de mise en place. La description du concept d'exploitation d'un entreposage¹⁸² réversible ne répond pas à la question de la durée maximale de la ventilation des galeries ouvertes qui pourrait éventuellement être de plusieurs dizaines ou même centaines d'années. Jusqu'où la zone de désaturation pourrait-elle pénétrer durant 50 ou même 100 ans de ventilation? Les fissurations causées par les effets simultanés de la chaleur et de l'assèchement par l'air chaud pourraient-elles compromettre la partie de la couche du Callovo-Oxfordien située au-dessus et en dessous de l'horizon du site de stockage ? Une meilleure compréhension des effets de la ventilation pourrait s'avérer nécessaire pour répondre à ces questions, mais nous n'avons trouvé dans les documents aucun modèle ou données sur ce sujet. Il se pourrait que la redistribution des eaux souterraines dans l'EDZ durant la période thermique, et tout particulièrement après la resaturation, induise des changements dans la composition chimique. Par conséquent, les processus de couplage relatifs au mouvement des eaux souterraines dans l'EDZ sont importants pour la performance du système de barrières ouvragées. Le développement potentiel d'un mouvement secondaire d'eaux souterraines causé par une telle poussée hydrostatique dans l'EDZ pendant la période thermique ne peut pas être écarté d'emblée. Ce genre de phénomène peut, ou peut ne pas être significatif pour le fonctionnement et la performance de confinement du site de stockage proposé. Néanmoins, il n'est pas possible d'accepter ou de rejeter l'hypothèse utilisée dans le document E-TER¹⁸³ tant que les implications ne sont pas mieux comprises.

3.2.1.2 La question de la saturation

Concernant la teneur en eau de la roche à proximité immédiate de l'excavation, une interaction H→T est importante. Pendant plusieurs années, au minimum, et peut-être plusieurs décennies, la roche dans la zone endommagée ne sera peut-être pas entièrement saturée. Des investigations numériques ont établi les profils de désaturation attendus en supposant des conditions plausibles aux limites.¹⁸⁴ Une variation de la saturation causera certainement une variation de la conductivité thermique. L'EDZ est un domaine critique pour la modélisation puisque c'est dans cette zone que le gradient de la température, qui est inversement proportionnel au rayon, est le plus élevé. Cela se traduit par une élévation importante de la température près la paroi de l'alvéole. Par conséquent, l'évolution de la température critique et maximale est principalement affectée par la conductivité de la chaleur dans cette zone.

3.2.1.3 La question de la modélisation

Des analyses de sensibilité numériques pourraient éventuellement être utilisées pour étudier l'effet des variations de la perméabilité sur les champs de température et les champs de flux thermique ainsi que sur la circulation des eaux par thermosiphon dans la

¹⁸² ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.A

¹⁸³ ANDRA Cahier des charges E-TER 2001

¹⁸⁴ ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001

zone endommagée sous l'influence de la charge thermique. Il faut cependant souligner que le modèle thermique utilisé dans le document, un modèle analytique simple qui n'incorpore que la conduction de la chaleur, ne serait pas suffisant pour ce genre d'étude. Un modèle plus complexe de transport thermique, de conduction-convection, serait nécessaire pour étudier la conduction thermique dans des conditions de circulation de l'eau simultanément dans les pores et les fractures de la roche. Par conséquent, une faiblesse potentielle affecte ce modèle. Celui-ci ne pourra être utilisé que pour un cas simplifié, mais il ne peut pas être utilisé pour tester la sensibilité du modèle aux variations des hypothèses de la modélisation.

Le modèle thermique présenté n'est pas assez général, même pour la conduction thermique, pour intégrer la totalité de la variabilité potentielle de la conductivité thermique, et de la diffusivité qui lui est associée, pour la prévision de la température ainsi que les études de sensibilité. Des modèles numériques capables d'intégrer de telles variations peuvent être trouvés dans le commerce sans problèmes, et l'importance du programme de l'ANDRA justifie certainement leur application à l'avenir. Malgré cela nous n'avons trouvé aucune application de modèles numériques thermo-hydrauliques avancés dans notre revue documentaire.

Une question de modélisation toute aussi importante est l'analyse du développement potentiel d'un mécanisme de conduction-convection-migration de la vapeur-condensation dans le système de la barrière ouvragée et de la zone endommagée pendant la phase de saturation partielle de l'opération. La figure 3.1 présente le schéma conceptuel de la circulation eau-vapeur-eau condensée dans un système schématique, fermé, à température variable. Il est possible de concevoir un cycle continu de vapeur entre les zones centrales du site, relativement chaudes, et celles éloignées, relativement froides. Bien que le régime de températures, selon la conception de référence, se situe en dessous du point d'ébullition, une température au-dessus de celui-ci n'est pas impossible. Il est tout à fait possible qu'il pourrait se développer un système binaire dans lequel:

1. soit un régime de températures en dessous du point d'ébullition prévaut si le remblayage et la roche peuvent se resaturer (et les conductivités thermiques augmentent pour atteindre des valeurs élevées de saturation d'eau engendrant des températures basses) ;
2. soit un champ de températures au-dessus du point d'ébullition se développe si le remblayage et la roche ne peuvent pas se resaturer (et les conductivités thermiques restent celles du remblayage désaturé et de l'EDZ)

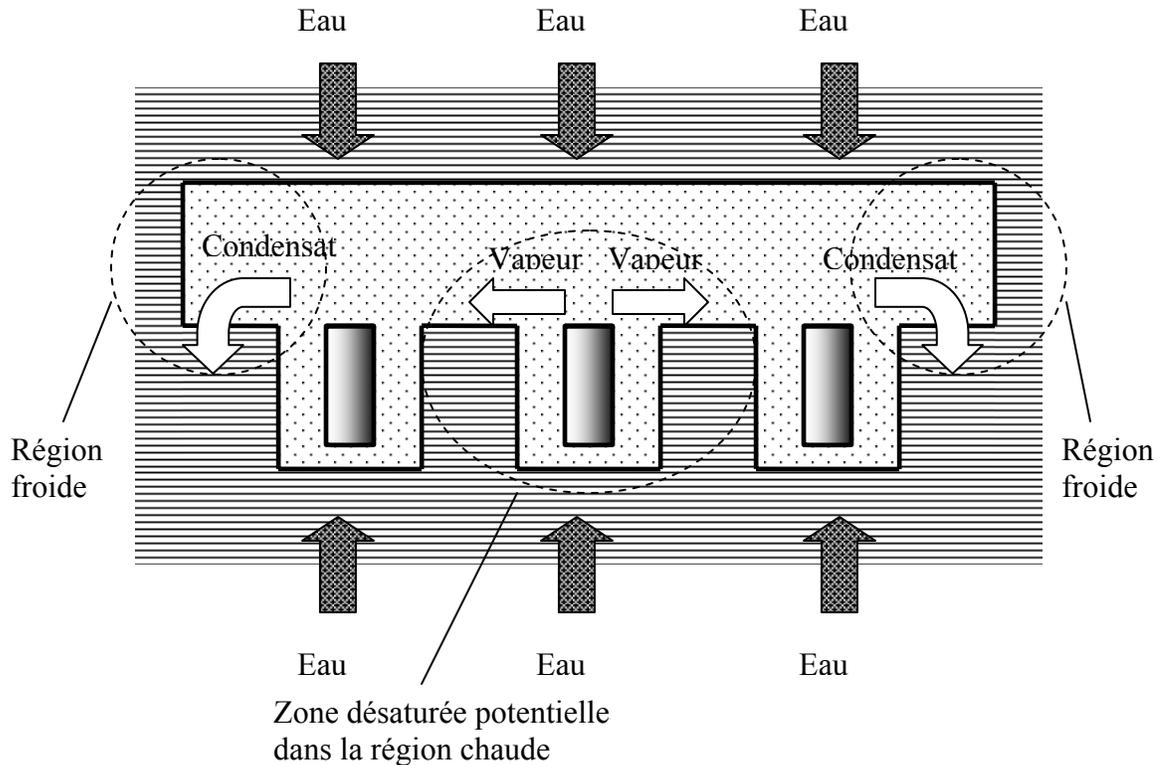


Figure 3-1. Schéma conceptuel des circulations des condensats eau-vapeur dans un système, fermé à température variable

La création d'un cycle de vapeur est par conséquent possible dans certaines conditions de charge thermique, à savoir, si le matériau de remblayage ne se sature pas et que la zone endommagée ne se re-sature pas en raison de la perte d'eau dans la phase de vapeur causée par les zones froides de condensation du site de stockage.

Il est envisagé que le programme de modélisation E-TER offre l'opportunité d'un calibrage de modèle. Dans les conditions de charge thermique critique, les modèles simples présentés dans l'E-TER ne suffiront pas pour analyser les conditions complexes, tridimensionnelles, des écoulements partiellement saturés qui peuvent dominer la période la plus critique du fonctionnement allant de quelques décennies à plusieurs centaines d'années. La question de la modélisation sera plus approfondie dans les sections 3.2.3.2 et 3.3 de cette analyse critique.

3.2.2 L'évaluation des interactions M→T

3.2.2.1 La question de la saturation

Le champ de contrainte dans une roche poreuse et fracturée peut directement affecter le flux thermique et le champ thermique tout au long des changements dans la résistance de contact entre les grains de la roche ainsi qu'à l'ouverture des fractures. La pression/sensibilité à la contrainte de la résistance de contact entre les surfaces rugueuses est un phénomène bien connu qui peut avoir des effets significatifs, particulièrement dans la zone endommagée du site de Bure. Un autre effet, peut-être encore plus pertinent, peut être postulé vu les interactions $M \rightarrow H \rightarrow T$ encore plus complexes et indirectes. L'ouverture capillaire change sous l'effet de la contrainte, influençant la saturation, et particulièrement la re-saturation de l'EDZ pendant la période la plus active thermiquement, de quelques centaines d'années. On peut se poser une question à propos de la stabilité : la rapide désaturation engendrée par la température peut-elle réduire la contrainte de compression et, ce faisant, accroître davantage l'ouverture des fractures, diminuer la rétention capillaire et réduire davantage la saturation et par conséquent diminuer la conductivité thermique et augmenter la température? La saturation a un effet majeur sur la conductivité thermique et sur le champ de températures qui en découle. Un mécanisme d'auto-aggravation avec une réaction positive, déstabilisante en retour est observé ici et sera traité dans le sujet de la stabilité. Par conséquent, il est important d'inclure les interactions indirectes $M \rightarrow T$ qui sont importants et ne peuvent pas être d'emblée négligées. La discussion dans le document E -TER n'aborde pas l'interaction $M \rightarrow H \rightarrow T$. Quelques réflexions supplémentaires dans ce domaine pourraient mériter davantage d'attention.

3.2.2.2 La question de la conductivité

A partir des informations fournies, il n'est pas évident si l'interaction directe $M \rightarrow T$ a été jugée négligeable en raison des difficultés rencontrées dans l'évaluation de cet effet en laboratoire sur de petits échantillons, ou pour une autre raison. La variation de la conductivité thermique sous l'effet d'une contrainte variable est un phénomène connu, mais néanmoins peu compris. Cet effet est probablement beaucoup moins important dans une formation rocheuse de faible perméabilité et de faible porosité, du type de l'argilite de Bure, que dans une roche poreuse et grenue. Cependant, les valeurs in situ de conductivité de la chaleur obtenues à partir de mesures faites directement sur le terrain sont presque toujours plus élevées, parfois de 100 %, que les conductivités mesurées en laboratoire sur de petits échantillons provenant du même endroit mais avec une saturation significativement moindre et sans pression de confinement pendant les mesures de laboratoire. Il est difficile de séparer les effets combinés de la saturation (c'est-à-dire la teneur en eau) et de la contrainte mécanique. Le document E -TER,¹⁸⁵ dans la section 2.1.2, reconnaît l'existence d'une éventuelle incertitude dans la conductivité thermique due à la variation de la seule saturation. Les mesures in situ proposées dans les diverses zones géomécaniques sont présentées dans le document comme une solution pour ajuster le modèle thermique de la couche hôte pour le site de Bure. Cette approche est satisfaisante pour vérifier les hypothèses des modèles ainsi que pour établir les facteurs d'échelle entre le laboratoire et les mesures sur le terrain.

¹⁸⁵ ANDRA Cahier des charges E-TER 2001

3.2.3 Le programme de mesure in situ sur le site de Bure

La nécessité de faire des mesures in situ est bien exposée et argumentée dans le document E -TER.¹⁸⁶ En plus des paramètres les plus pertinents pour la performance thermique, c'est-à-dire la conductivité et la diffusivité thermique, le document souligne l'importance de la vérification des coefficients de couplage dans le modèle THM dans l'équation (2) selon la théorie de Biot. Par exemple, le coefficient de dilatation et la compressibilité peuvent être ajustés, entre le modèle et les données de terrain, en se basant sur des mesures in situ. Une argumentation similaire est avancée pour l'identification du coefficient de Biot dans l'équation thermohydraulique de couplage pour la diffusion de la masse fluide dans l'équation (3), en utilisant une modélisation inverse basée sur des mesures in situ.

Il faut préciser que des modèles plus sophistiqués allant au-delà de la théorie de Biot ont été préconisés pour décrire les processus couplés. Par exemple, une formulation thermo-poro-élastique est décrite en utilisant le modèle numérique de type FLAC dans Berchenko, et al.¹⁸⁷

Dans la section 2.1.5 du document E -TER,¹⁸⁸ un argument convaincant est avancé à l'appui du programme in situ de mesures pour l'identification des propriétés et des coefficients de couplage particuliers au site de Bure dans les modèles thermiques, thermomécaniques et thermohydrauliques. Bien que des mesures in situ ne puissent pas identifier directement ces paramètres, l'interprétation des mesures sur le terrain est décrite comme étant le moyen pour leur identification. C'est un programme bien conçu, souvent appelé modélisation inverse dans la littérature. Par exemple, l'iTOUGH, un logiciel du Laboratoire national Lawrence Berkeley,¹⁸⁹ est spécifiquement développé pour une identification inverse de la chaleur, de la masse, des propriétés du transport des contaminants et des coefficients dans la roche poreuse et fracturée. Le concept décrit dans le document E -TER est donc compatible avec les normes et les pratiques internationales.

Le Tome 5 du Référentiel Géologique¹⁹⁰ présente des arguments supplémentaires en faveur des mesures in situ, notamment pour l'extrapolation des données acquises en laboratoire au massif rocheux. Les essais thermiques TER sont mis en référence et brièvement passés en revue dans la section III.2.3. Deux parties sont décrites, TER/A, consacrée à la caractérisation de l'argilite dans les zones endommagées et dans les zones saines, et TER/B, dédiée aux mesures liées au couplage THM. Le rapport entre les programmes TER/A et TER/B décrits dans le Tome 5 du Référentiel Géologique¹⁹¹ et le document E -TER n'est pas clair.¹⁹² La méthode décrit une série de mesures prises dans un seul forage vertical de mesure avec une sonde chauffante de 2 mètres de long pourvue

¹⁸⁶ ANDRA Cahier des charges E-TER 2001

¹⁸⁷ Berchenko et al. 1999

¹⁸⁸ ANDRA Cahier des charges E-TER 2001

¹⁸⁹ Finsterle 2000

¹⁹⁰ ANDRA Référentiel Géologique Tome 5, 2001

¹⁹¹ ANDRA Référentiel Géologique Tome 5, 2001

¹⁹² ANDRA Cahier des charges E-TER 2001

d'un capteur thermique. Le programme conceptuel de mesure comprend une période de chauffage d'un an suivie de deux années de refroidissement. Les résultats de la simulation en 1D, 2D et 3D sont donnés pour les mesures conceptuelles, en utilisant le calcul analytique et les modélisations numériques du programme CASTEM 2000, et sont représentés dans la figure 3.2-06 du Tome 5 du Référentiel Géologique.¹⁹³ Des observations sur la configuration du concept et les avantages attendus peuvent être faites concernant (a) le bien-fondé de l'organisation des mesures pour obtenir les propriétés thermo-physiques du site (examiné plus en détail dans la section 3.2.3.1) et (b) la question de la modélisation (examinée plus en détail dans la section 3.2.3.2). Ces observations sont basées sur l'information présentée dans le Tome 5 du Référentiel Géologique et le document E -TER,¹⁹⁴ des informations/documents complémentaires seraient utiles pour affiner l'analyse de cette revue critique.

Le document E -TER¹⁹⁵ décrit les modélisations prédictives de l'expérimentation dans la section 3.1, où sont décrites les étapes jusqu'en 2005. Dans un premier temps, les modèles mécaniques et hydromécaniques seront d'abord vérifiés et ensuite validés, et seront élargis pour inclure la zone endommagée. Deuxièmement, les modèles seront validés dans les galeries par des données acquises in situ, décrites dans le document SUG.¹⁹⁶ Alors que le programme insiste beaucoup sur les interactions entre les travaux de construction et les modèles mécaniques et hydromécaniques, on ne sait pas très bien si les effets sur les propriétés thermiques sont effectivement traités. On a l'impression que la modélisation thermique est considérée comme une question secondaire par rapport au processus de couplage des modèles mécaniques et hydromécaniques.

3.2.3.1 Le bien-fondé de l'organisation des mesures in situ

Il est important de répondre à la question suivante : le dispositif pour obtenir in situ les propriétés thermophysiques à partir d'une modélisation inverse est-il efficace ? Les mesures de température prises sur la paroi du forage pendant le cycle de chauffage doivent être considérées comme erronées du fait des incertitudes dans le couplage thermique entre l'élément chauffant et la roche. En se fondant sur la description donnée dans le Tome 5 du Référentiel Géologique,¹⁹⁷ il semblerait qu'un simple élément chauffant pour un seul forage soit envisagé dans le programme. Une analogie peut être faite avec la mesure de la résistance électrique, où il est préférable de mesurer le potentiel sans que le courant passe par le point de contact. La prise en compte de cet aspect a conduit à l'élaboration de la méthode de mesure dite à quatre fils de résistance. De même, il serait préférable de mesurer la température de la roche dans un endroit neutre du massif, plutôt que juste au point de contact sous l'influence de l'élément chauffant. D'après la description il n'apparaît pas clairement que l'utilisation de sondes thermiques est prévue dans d'autres zones, par exemple, dans des forages parallèles à une certaine distance du forage chauffant

¹⁹³ ANDRA Référentiel Géologique Tome 5, 2001

¹⁹⁴ ANDRA Référentiel Géologique Tome 5, 2001 ; ANDRA Cahier des charges E-TER 2001

¹⁹⁵ ANDRA Cahier des charges E-TER 2001

¹⁹⁶ ANDRA Cahier des charges SUG 2001

¹⁹⁷ ANDRA Référentiel Géologique Tome 5, 2001

Pendant la phase de refroidissement, quand la puissance de l'élément chauffant est zéro, les mesures prises sur la paroi du forage peuvent être considérées exactes ; par conséquent, la courbe de refroidissement peut servir de réponse thermique à l'identification indirecte de la diffusivité thermique. Cependant, aucune autre information ne peut être extraite de cette mesure. Afin d'obtenir la conductivité et la diffusivité thermique, ou la chaleur spécifique, une autre information distincte est nécessaire. Cette information est présente sous la forme de la puissance thermique pendant la phase de chauffage; cependant le dispositif souffre d'un handicap pendant ce cycle, comme décrit plus haut, à cause du problème inhérent à la mesure de la température sous un flux thermique.

En conclusion, le dispositif présenté dans le Tome 5 du Référentiel Géologique¹⁹⁸ ne paraît pas être un programme efficace ou assez précis pour la caractérisation in situ des propriétés thermophysiques. Une approche plus sophistiquée est présentée dans le document E -TER,¹⁹⁹ notamment dans la figure 2 qui représente des forages parallèles autour d'un élément chauffant. Cependant, on ne sait pas clairement si une évaluation des propriétés thermiques, comme par exemple des mesures in situ de conductivité et de diffusivité, sera faite. Le document SUG²⁰⁰ décrit un programme détaillé d'évaluation des caractéristiques géologiques, géochimiques et géomécaniques, mais il ne porte pas sur les propriétés thermiques et leurs caractéristiques.

3.2.3.2 La question de la modélisation inverse

La raison pour laquelle les résultats du modèle unidimensionnel sont inclus dans la fig. 3.2-06 du Tome 5 du Référentiel Géologique²⁰¹ n'apparaît pas clairement ; le problème n'a rien à voir avec un flux thermique unidimensionnel. L'hypothèse est faite que le résultat du modèle analytique 2D est la solution de l'équation du flux thermique cylindrique pour une longueur infinie de l'élément chauffant. Ce type de modèle est néanmoins très insuffisant pour un dispositif avec un élément chauffant de 2 mètres de long. La différence importante entre les modèles analytiques 2D, et les modèles numériques 3D élimine les autres modèles. La question se pose même de savoir si les conditions d'un modèle 3D du volume de la roche qui suppose des propriétés homogènes et isotropes des matériaux sont pertinentes. La stratigraphie du site de Bure se présente en couches avec des propriétés différentes selon les directions. Une préparation doit être faite pour tenir compte des anisotropies dans le modèle, par exemple, pour des différences dans les conductivités de la chaleur dans les directions verticales et horizontales. Si la mesure est faite dans la zone endommagée, on peut s'attendre à une variation de la conductivité thermique causée par les variations des contraintes et par la fracturation. Une variation spatiale plus importante peut même être présente, causée par la désaturation partielle dans la zone d'essais pendant la construction et la préparation de l'essai. Un tel scénario peut être pronostiqué en raison des courbes de la conductivité en fonction de la teneur en eau pour l'argilite décrite dans le Référentiel Matériaux Tome

¹⁹⁸ ANDRA Référentiel Géologique Tome 5, 2001

¹⁹⁹ ANDRA Cahier des charges E-TER 2001

²⁰⁰ ANDRA Cahier des charges SUG 2001

²⁰¹ ANDRA Référentiel Géologique Tome 5, 2001

2,²⁰² Section IV.3.2.2, par exemple, dans la figure IV.3. 17 où sont décrites des variations de 300% à de 400% dans la conductivité pour une variation de teneur en eau allant de 0 à 30%. De façon similaire, une grande dépendance vis-à-vis de la saturation en eau est prévue pour la roche hôte du Callovo-Oxfordien, bien qu'aucune donnée explicite ne soit fournie dans le Référentiel Géologique Tome 4, dans le chapitre IV.8.²⁰³

3.2.4 Les mesures des propriétés thermophysiques sur échantillons de laboratoire

Cette évaluation est basée sur le résumé des résultats de laboratoire présentés dans le Tome 4 du Référentiel Géologique, chapitre IV.8.²⁰⁴ Les propriétés thermiques de l'argilite de la formation callovo-oxfordienne ont été mesurées sur des échantillons prélevés à partir des forages HTM 102 et EST 104 pendant la campagne de reconnaissance géologique 1994-1996. Des efforts ont été faits pour identifier l'influence de la température et de la teneur en eau des échantillons sur les propriétés thermiques, ainsi que l'anisotropie potentielle de ces propriétés. Selon le concept des mesures de laboratoire, la chaleur spécifique (c), la densité (rho), et les diffusivités thermiques (a) ont été directement mesurées et évaluées, quant aux conductivités thermiques (k), elles ont été dérivées de la relation $k = \rho \cdot c \cdot a$. Des mesures complémentaires ont été également effectuées sur six échantillons prélevés pendant une nouvelle campagne de reconnaissance en 2000 sur le forage EST 205. Un nouveau concept d'évaluation a été utilisé pour la mesure directe de la conductivité sur les échantillons du forage EST 205. En raison de la nouvelle méthode employée, il n'a pas été possible d'évaluer l'effet de la température sur les propriétés thermiques pour les échantillons du forage EST205 ; cependant, il a été possible d'étudier l'effet de la contrainte axiale sur la conductivité thermique entre 5 MPa et 20 MPa.

3.2.4.1 La chaleur spécifique

Les résultats des mesures de laboratoire pour les valeurs de (rho), (c), et (a) se situent dans le domaine des valeurs attendues. Une variation relativement importante est observée pour les valeurs de la chaleur spécifique liée à l'emplacement de prélèvement situé le long du forage EST 104 : la variabilité atteint environ 100%. La différence entre les échantillons le long du forage HTM 102 est beaucoup plus faible, environ 30 %, à des températures plus basses. Néanmoins, la variabilité spatiale justifie plus d'études, particulièrement si l'on prend en compte que seuls deux forages ont été utilisés pour la caractérisation de cette importante propriété de la roche.

La valeur (moyenne) de la chaleur spécifique à température ambiante ne change pas de manière significative d'un forage à un autre, mais cela n'évite pas nécessairement de recourir à une caractérisation plus approfondie du site. Deux questions peuvent être soulevées :

²⁰² ANDRA Référentiel Matériaux Tome 2, 2001

²⁰³ ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001

²⁰⁴ ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001

- la cohérence entre les moyennes des deux forages est-elle statistiquement significative si l'on tient compte de la grande variabilité spatiale ? Afin de répondre à cette question, des analyses complémentaires pourraient être nécessaires.
- les variations spatiales des propriétés thermo-physiques permettront-elles de faire la moyenne des températures produites par la décroissance radioactive pendant la période thermique? Afin de répondre à cette question, une étude de sensibilité, avec un modèle numérique utilisant des propriétés thermo-physiques variables, pourrait être nécessaire.

3.2.4.2 La diffusivité thermique

Les diffusivités thermiques des forages EST 104 et HTM 102 ont été évaluées à différentes températures (20 °C, 40 °C, 60 °C, 80 °C) sur des échantillons prélevés perpendiculairement à la stratification, et à température ambiante, mais à différents degrés de saturation (saturé et 6 degrés de désaturation), et trois directions d'anisotropie.

En outre, les diffusivités thermiques pour les échantillons provenant du forage EST 205 ont été évaluées à partir des mesures directes sur la conductivité (la densité et la chaleur spécifique étant connues) perpendiculairement et parallèlement à la stratification.

Les résultats d'ensemble de la diffusivité, rassemblés dans la figure 4.8-04 du Tome 4 du Référentiel Géologique,²⁰⁵ indiquent une variabilité spatiale encore plus grande que celle obtenue pour la chaleur spécifique. Par conséquent, les questions soulevées à propos de la chaleur spécifique sont également applicables à la diffusivité thermique. L'analyse des facteurs de dépendance vis-à-vis de la température ainsi que de la saturation et de l'orientation ne diminue pas, mais, au contraire, renforce le besoin de répondre à ces questions.

L'anisotropie de la diffusivité thermique découverte dans tous les forages suggère une dépendance vis-à-vis de l'orientation d'environ 30 %. Cette valeur est assez importante pour considérer l'abandon de tous les modèles thermiques postulant un caractère isotrope de la roche.

3.2.4.3 La conductivité thermique

La conductivité thermique a été calculée à partir des mesures de (a), (rho), et (c) pour les forages EST 104 et HTM 102. La fourchette des valeurs obtenues pour ce type de roche, comparée aux valeurs de tableaux comparables trouvés dans les revues scientifiques, est acceptable. La variabilité des valeurs de conductivité reflète les variations spatiales des diffusivités, soulevant une fois encore le doute pour des applications dans la conception

²⁰⁵ ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001

thermique. L'incertitude dans la conductivité peut venir s'ajouter aux incertitudes des autres propriétés déjà abordées.

La conductivité a été directement mesurée sur des échantillons provenant du forage EST 205, soumis à des contraintes axiales situées entre 5 et 20 MPa. L'ANDRA doit être félicitée pour avoir fait état de la variation des contraintes axiales dans les mesures de conductivité. Les résultats de la dépendance de la conductivité vis-à-vis de la contrainte axiale n'ont pas été inclus dans le Tome 4, une omission qui enlève au lecteur la possibilité d'acquérir une compréhension plus complète du comportement de l'argilite. Les valeurs d'ensemble de la conductivité sont environ 30 % supérieures à celles obtenues à partir des mesures de la diffusivité et de la chaleur spécifique. Puisque ces mesures sont directes, on est tenté de les accepter et de rejeter les valeurs dérivées. Une déviation systématique de 30 % dans le résultat final est assez importante pour pouvoir compromettre la conception thermique des ouvrages et par conséquent l'utilisation économique de l'emprise disponible du site de stockage vis-à-vis de la limite de la charge thermique.

3.2.5 L'extrapolation des résultats de laboratoire au massif

Plusieurs effets ou perturbations doivent être pris en compte lors de la transposition des résultats du laboratoire au massif. Le chapitre IV du Tome 4 du Référentiel Géologique ²⁰⁶ décrit les trois perturbations les plus importantes:

- « mécaniques, essentiellement fissuration en paroi des ouvrages souterrains, induites par le déconfinement mécanique de la roche (on parle alors d'endommagement),
- hydriques, essentiellement désaturation de la roche en paroi, induites par l'aéragé des ouvrages souterrains, qui peuvent provoquer une fissuration complémentaire,
- mécaniques et hydriques induites par la dissipation thermique des colis stockés.»

Il y a d'autres effets d'échelle supposés entre le laboratoire et les caractéristiques du site:

- La présence de grandes fractures et discontinuités qu'il ne serait pas possible d'avoir dans un petit échantillon. Autrement dit, il n'est pas possible de caractériser dans le laboratoire des échantillons brisés, traversés par des fractures.
- La complexité des conditions sur le site comparées aux conditions simples et contrôlées dans le laboratoire;
- Les variations simultanées de toutes les variables potentielles par rapport à quelques variables choisies dans les conditions de laboratoire.

Un essai thermique souterrain de grande échelle semble plus réaliste et plus fiable que d'essayer de modéliser numériquement la complexité du site. Nous recommandons fortement qu'une vérification expérimentale de la sorte soit prévue pour l'acceptation

²⁰⁶ ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001

finale des propriétés thermophysiques et autres obtenues dans le laboratoire pour le site de Bure.

Le programme stratégique²⁰⁷ présente l'utilisation des expériences in situ au site de Mont Terri en Suisse comme le moyen de valider le passage à une plus grande échelle et pour valider les modèles. Les résultats de ces expériences devraient être utilisés en 2005 pour la conception du site de stockage et de l'architecture des alvéoles/galeries. Il sera important d'employer des données et des modèles vérifiés pour le site de Bure lui-même. Les incertitudes rendront problématique la portabilité des données de Mont Terri à Bure. Le programme stratégique²⁰⁸ demande que ces incertitudes soient réduites à l'aide d'analyses numériques et d'études de sensibilité, ainsi que de permettre une certaine souplesse dans les dispositions portant sur de futurs projets. La tâche visant à déterminer directement les propriétés thermophysiques du site de Bure semble être évitée et/ou retardée. Cependant, il est prévu que l'importance primordiale des propriétés thermophysiques du site sera identifiée pendant les exercices de conception. Des études de variations, d'optimisations et de sensibilité dans des travaux futurs peuvent dévoiler la nécessité d'un programme in situ complet pour caractériser le site pour répondre aux exigences thermiques pour la conception thermique des ouvrages. Il reste à savoir quand, où et comment ce problème sera planifié et exécuté.

3.2.6 L'applicabilité des résultats obtenus sur d'autres sites

Beaucoup de questions peuvent être soulevées après avoir examiné les quelques documents communiqués. Le projet de Bure peut sous-estimer l'éventuelle différence entre les propriétés thermophysiques en laboratoire et in situ, particulièrement en raison des grandes variations. Les mesures du forage chauffant (avec peut-être un seul ou quelques forages) sur le site de Bure ne semblent pas être suffisantes pour vérifier les caractéristiques des matériaux analysés dans le laboratoire pour émettre un avis sur la sélection du site. Les lois d'extrapolation pour le passage du laboratoire au massif rocheux à partir d'une mesure in situ de petite taille seront-elles valables ? Des variations significatives des propriétés thermophysiques in situ ont été observées dans d'autres projets, par exemple celui de Yucca Mountain, aux Etats-Unis, pendant la période thermique.²⁰⁹ Les différences entre les propriétés en laboratoire et in situ peuvent être bien plus significatives, particulièrement quand des variations de contraintes et de degré de saturation sont prises en compte.²¹⁰

3.3. Modèles de conception/d'analyse thermique pour le site et la barrière ouvragée

²⁰⁷ Direction de la Technologie 2003

²⁰⁸ Direction de la Technologie 2003

²⁰⁹ Bahrami et Danko 2003

²¹⁰ Danko et Mousset-Jones 1989

La conception thermique d'un site de stockage pour des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue n'est pas une tâche banale pour quatre raisons principales:

- La géométrie est complexe, et les propriétés thermophysiques sont variables dans une roche hôte anisotrope et hétérogène
- Les processus de couplage THM seront présents dans tout le volume chauffé, mais particulièrement dans la zone à proximité des galeries et de la zone endommagée
- Les interactions entre les barrières naturelles et ouvragées et le couplage pourraient faire appel à des modèles analytiques spéciaux pendant la période thermique, différents de ceux qui sont utiles pour de longues périodes de temps et des températures faibles.
- La ventilation est présente pendant plusieurs dizaines d'années et peut-être même plus longtemps. Elle évacuera, par convection, une part importante de la chaleur issue de la décroissance nucléaire ainsi que l'humidité provenant de la roche hôte. Elle représente un problème couplé, multi-physique.

La géométrie complexe à laquelle est associée la variabilité des propriétés des matériaux nécessite un modèle numérique. Les défis qui se posent pour la sélection d'un modèle et la résolution du problème de la température et du champ thermique en 3D dans tout le site de stockage sont: le temps de simulation, la capacité informatique et les ressources. Alors qu'un modèle analytique peut d'une manière élégante permettre la résolution d'un milieu infini, un modèle numérique a besoin d'un ordinateur d'une importante capacité et/ou de temps informatique. Il n'est donc pas étonnant que les modèles employés par le programme présenté sont analytiques, quand une zone importante est étudiée, et numériques, quand seule une géométrie réduite et simplifiée est définie autour de la zone de mise en place.

3.3.1 La question des hypothèses et des erreurs dans la modélisation

La démarche de modélisation présentée, bien que justifiable pour des raisons de simplicité, présente de multiples problèmes, et peut, à l'avenir, entraîner plus de complications que de simplifications. Un de ces problèmes est que les résultats obtenus d'un modèle simplifié seront erronés, sans rapport avec la réalité. Une erreur de prédiction peut, à son tour, affecter la sûreté, la performance à long terme, et le coût de l'installation. La température admissible de sûreté maximale peut par exemple dépendre de la densité retenue pour la mise en place des colis de déchets et dicter ainsi la capacité d'entreposage de l'installation. Il y a donc un lien direct, entre le coût de construction et la qualité de la conception thermique. La sûreté et la conception thermique sont également reliées. Les températures maximales sûres ne peuvent être garanties avec une marge d'erreur minimale que si les erreurs et les hypothèses de simplification des modèles sont minutieusement contrôlées. Par conséquent, la qualité du modèle thermique est d'une importance primordiale dans la conception d'un site de stockage de déchets nucléaires à haute activité.

Il n'y a pas dans les documents de description de solutions stratégiques pour ce problème complexe. Les modèles simplifiés, autonomes ou couplés, principalement analytiques, sont très valables pour les valeurs limites et les résultats explicatifs et préliminaires. De tels modèles et études sont présentés, dans les documents *E-TER, Référentiel Géologique Tomes 4 et 5. et Référentiel Matériaux Tome 2*²¹¹ De même, des modèles simplifiés ont été employés avec compétence pour une évaluation préliminaire des réponses thermo-hydro-mécaniques dans le document *Evaluation préliminaire de la réponse Thermo-hydro-mécanique de l'essai E-TER*.²¹² Ils sont très pertinents pour les calculs visant à estimer l'étendue du problème et aussi pour vérifier les sensibilités des paramètres d'influence. Cependant, les modèles figurant dans les documents ne peuvent pas être considérés comme satisfaisants pour servir de modèles de conception de base. Ce travail pourra demander plus d'attention à l'avenir, notamment pour les travaux de conception prévus pour 2005.

Les modèles d'analyse utilisés pour évaluer la réponse thermohydrologique de la barrière ouvragée pendant la période de temps critique de l'évolution de la température maximale ne peuvent aboutir à des conclusions que si des domaines 3D sont utilisés avec une hétérogénéité spatiale et une anisotropie. La sensibilité aux hypothèses des modèles et aux variations des propriétés du site pourra alors être évaluée numériquement, et être incluse dans le programme de vérification et de validation. Il faudra un autre modèle spécial pour le refroidissement convectif et les effets d'assèchement de la ventilation. Ce modèle de simulation devra inclure la simulation thermohydrologique dans le massif rocheux couplée au modèle de rayonnement (thermique) et de convection dans les galeries de mise en place des déchets.

Les hypothèses de simplification doivent être évaluées de façon critique dans les étapes suivantes qui porteront sur le domaine du modèle et la discrétisation spatiale nécessaire pour des simulations thermiques et couplées hydrologiques à différentes échelles, dans les champs proches et lointains. Deux questions principales doivent être soulevées (a) les hypothèses des modèles sont-elles pénalisantes pour déterminer les valeurs limites des températures maximales ? (b) Le modèle est-il trop conservateur en raison d'approximations/simplifications pour être acceptable, et, par conséquent, pour permettre « l'utilisation optimale des propriétés de confinement de la couche hôte » comme le demandent les principes de conception présentés dans le rapport Dossier 2001 Argile²¹³ On fera l'hypothèse qu'un équilibre sûreté/économie entre les deux questions est une démarche de modélisation sophistiquée, validée et vérifiée, approfondie sur le travail numérique et la validation du site, afin d'être le moins restrictif possible dans la conception et la réalisation des travaux.

²¹¹ ANDRA Cahier des charges E-TER 2001, ANDRA Référentiel Géologique Tome 5, 2001, ANDRA Référentiel Matériaux Tome 2, 2001, ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001

²¹² ANDRA E-TER 2001

²¹³ ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.A, p.26.

3.3.2 La question de la compréhension des processus thermiquement induits

Les modèles sont des bancs d'essai expérimentaux peu coûteux pour étudier les processus dont l'étude expérimentale pourrait être difficile et coûteuse. Des scénarios plausibles, tels ceux de la figure 3.1, peuvent être expérimentés à l'aide de modèles numériques. Cependant, les modèles simplifiés présentés dans les documents passés en examens ne peuvent pas être directement employés pour ces études. Il semble que le champ d'application des modèles présentés dans les documents examinés se limite à des cas simples, et exclue la possibilité d'applications plus élaborées.

Le scénario pris en exemple est décrit dans la section 3.1.1.3 pour une géométrie de mise en place schématique indiquée sur la fig.3.1. L'éventualité du développement d'un cycle de vapeur peut être critique ou non pour la sûreté du stockage des déchets, mais elle est certainement plausible, bien que différente des processus décrits dans le document de programmation. Comme nous en ferons plus loin l'analyse, le développement de tels cycles autour de colis de déchets avec une dissipation thermique élevée, comme ceux qui contiennent du combustible usé, ne peut pas être rejeté d'emblée. Une conduction, ainsi qu'une convection-advection, peuvent être présentes pendant de très longues périodes dans les matériaux de remblayage et une partie de la zone endommagée. Les matériaux de remblayage ne pourront peut-être pas se saturer et la zone endommagée ne pourra peut-être pas se re-saturer en raison de la perte d'eau de la phase vapeur dans les zones froides de condensation du site de stockage. Les matériaux de remblayage secs, qui servent d'isolant thermique avec une valeur de conductivité peut-être deux fois inférieure à ce qu'elle est dans le cas d'une saturation totale, pourraient surchauffer pendant des dizaines d'années, suivant la dissipation thermique du conteneur des déchets. Des températures élevées, bien supérieures au point d'ébullition, sont observées dans la simulation numérique quand la conductivité thermique du matériau tampon est abaissée.²¹⁴ En même temps, une circulation plus importante engendrée par une pression interstitielle peut se produire dans la section éloignée du condensateur, c'est-à-dire, dans la zone autour de l'alvéole. Les conditions de ce type de scénario peuvent et devraient être étudiées avec une modélisation numérique.

Il est possible de déterminer la charge thermique critique (CTC) pour chaque colis de déchets en utilisant des calculs de modèle numérique. Le modèle doit être en trois dimensions puisque c'est essentiellement un point chaud ponctuel qui est analysé, et il doit comporter la variation de la saturation avec son effet sur la variation de la conductivité thermique. Il s'agit donc essentiellement d'un modèle non saturé d'écoulement de la chaleur. Un tel modèle peut être configuré en utilisant les codes NUFT²¹⁵ et TOUGH,²¹⁶ tous les deux bien développés et testés pour le projet de Yucca Mountain aux Etats-Unis, dans le Nevada. Au-dessous de la CTC, aucun cycle de vapeur ne peut se former en raison de la conduction du refroidissement au-dessous de la température d'ébullition. Si la dissipation thermique d'un colis de déchets est plus élevée

²¹⁴ Cuisiat & Besnus 1999

²¹⁵ Nitao 2000

²¹⁶ Pruess 1987

que celle de la CTC, un cycle de vapeur se développera, et un modèle plus complexe sera nécessaire pour décrire les processus de couplage qui comprennent, en trois dimensions, l'échelle du massif rocheux, ainsi que le champ thermique à l'échelle des colis de déchets et un modèle hydrologique pour expliquer l'apport de l'eau. L'évaporation dans la zone à proximité des colis de déchets, le transport de vapeur dans les matériaux de remblayage partiellement saturés et la condensation devront être modélisés entre des colis de déchets, ou à un endroit plus éloigné en bordure de zone avec un modèle thermohydrologique couplé comme celui appliqué dans Bahrami et al.²¹⁷ Il faut préciser que la limite de la CTC doit être connue avec un niveau de confiance élevée, ce qui impose une haute qualité par rapport au modèle d'analyse.

La pertinence de tels modèles demande à être examinée. En un sens, la stratégie de la conception consiste à rester en dessous de la CTC, c'est-à-dire, en dessous de la température d'ébullition. C'est une position très satisfaisante puisque le problème, notamment celui de la modélisation, est ainsi grandement simplifié et mieux compris. Mais par ailleurs, la charge thermique maximale dans les colis de déchets n'a été indiquée que de façon approximative dans le Dossier 2001 Argile²¹⁸ et la conductivité thermique des matériaux tampon autour des colis de déchets enregistre une forte variation suivant la densité, le compactage, et la teneur en eau. Pour ces raisons, nous avons le sentiment que l'objectif de maintenir la température en dessous de la CTC n'a pas encore été traduit en conditions scientifiques qui doivent être satisfaites pour transformer cet objectif en réalité à Bure.

3.3.3 La question des priorités

Alors que les priorités du programme de caractérisation du site portent plus sur les interactions entre les travaux de construction et les modèles mécaniques et hydromécaniques, on ne sait pas très bien si le modèle thermique et ses propriétés thermiques sont correctement abordés, en fonction de leur importance. Il semble que la modélisation thermique est considérée comme une question secondaire comparée au processus de couplage dans les modèles mécaniques et hydromécaniques. Ceci pourrait s'avérer être une erreur puisque le processus moteur sera en premier lieu la dispersion de la chaleur, et en second lieu les processus induits. Sans établir une base de connaissance sur le développement du champ thermique, les autres modèles risquent de manquer de bases solides. La question de l'importance des divers modèles doit être posée et examinée. On peut émettre l'hypothèse que, par exemple, une erreur de 30 % dans la température maximale peut changer radicalement les processus d'une situation en dessous du point d'ébullition à une situation d'ébullition, tandis qu'une erreur de peut-être 100 % dans le champ de contraintes pourrait n'avoir aucun effet dans le fonctionnement du site de stockage remblayé. Les modes de défaillance et les scénarios de contrainte/déformation critique doivent être analysés à l'avenir afin de comprendre la pertinence d'une contrainte et d'un fluage induits par la chaleur dans le site de stockage pendant la période thermique.

²¹⁷ Bahrami et al. 2004

²¹⁸ ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B

Une attention spéciale devrait être apportée à (a) la période d'évolution de la température particulièrement longue des températures maximales ainsi que (b) la finalité de la situation. La question de la flexibilité peut être liée à une future correction et une action réparatrice dans l'éventualité de résultats inattendus, mais l'irréversibilité de la charge thermique rendra difficile les mesures palliatives pour corriger les erreurs de la conception thermique. Quelles sont les actions envisagées dans l'éventualité où la température excéderait, par exemple, le point d'ébullition, ou semblerait augmenter trop rapidement, augurant la violation de la limite d'ébullition ? Une telle observation durant la phase de surveillance ne pourrait que susciter des inquiétudes sans qu'aucune mesure corrective ou d'intervention ne soit disponible.

3.3.4 Les questions de la charge thermique et du dimensionnement

En dernière analyse, l'application des concepts thermiques/modèles d'analyse pour un site de stockage de déchets à haute activité sert à identifier les solutions à trouver pour résoudre les questions de la charge thermique et du dimensionnement. Nous supposons que, pour le site de Bure, des calculs numériques ont été faits pour les exercices de dimensionnement thermique, bien que nous n'ayons trouvé aucun document sur ce sujet au cours de notre revue critique. Le Dossier 2001 Argile Partie B²¹⁹ contient des concepts d'ingénierie et des résultats sur le dimensionnement thermique. Le module du combustible utilisé est le plus important pour les calculs du dimensionnement thermique, comme le montre la section II.5.4.1 dans le Dossier 2001 Argile Partie B²²⁰ puisque la puissance à la mise en stockage de l'UOX (CU1) est de 2200 W et celle du MOX (CU2) est de 1500 W. La configuration du concept d'ingénierie pour le module de stockage est présentée dans la figure II.5-13. La disposition longitudinale du combustible utilisé dans un caveau de stockage est présentée dans la figure II 5-14. Le calcul que nous avons fait en utilisant un espacement de 28,33 m entre les galeries et de 7.5 m entre les colis, présentées dans les figures II.5-13 et -14, donne une surface moyenne de stockage par conteneur de 212,5 m²/colis. Cette valeur ne correspond que grossièrement à la densité de mise en place présentée dans le tableau de la page 149. Le tableau indique une densité de 25 colis/ha pour le combustible CU1, ce qui correspond à une surface de stockage par conteneur de 400m²/colis. Cette différence est significative. Il est possible que la densité de 25 colis/ha soit une moyenne générale dans laquelle la surface entre les modules, qui n'est pas utilisée pour stocker les conteneurs, soit aussi incluse. Par conséquent, la valeur la plus faible de surface de stockage par conteneur de 212,5 m²/colis est utilisée pour traduire une densité de charge thermique de 10,35 W/m² pour le combustible CU1 pour l'évaluation du dimensionnement thermique.

Puisque nous n'avons pas de calcul de référence à l'appui, nous avons fait une simple comparaison avec des résultats connus pour le site de stockage proposé de Yucca Mountain en guise de vérification. La densité de mise en place à Yucca Mountain (YM) avec des espacements de 5,6 m entre les colis et de 81 m entre les galeries est de 453,6 m²/colis. La ligne moyenne de charge thermique est de 1450 W/m, ce qui donne 7975 W par colis de 5,5 m de longueur. À partir de ces chiffres la densité moyenne de charge

²¹⁹ ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B

²²⁰ ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B

thermique est calculée comme étant de 17,58 W/m² pour le site de stockage proposé à YM pour lequel la température maximum de la paroi de galerie de stockage de 155 °C est obtenue par calcul numérique.²²¹ L'extrapolation de la température maximale de la paroi de galerie de YM au module de Bure peut être faite linéairement avec le rapport des densités de charge thermique correspondantes et réciproquement avec la moyenne, des conductivités thermiques correspondantes (en choisissant 2,1 W/(m °C) pour YM, et 1,65 W/(m °C) pour Bure) :

$$T_{\max} = 10,35/17,58 * 2,1/1,65 * 155 = 116,14^{\circ} \text{C}$$

Ce résultat correspond très bien à l'objectif de conception des ouvrages pour une température de fonctionnement maximum d'environ 90 °C pour Bure. Cependant, il faut préciser que des températures dépassant de beaucoup 90 °C sont attendues dans le radier en béton et à l'intérieur de la galerie avec des matériaux de remblayage faisant apparaître à cet endroit une température d'exploitation à un régime supérieur au point d'ébullition. Beaucoup de facteurs peuvent encore affecter le champ thermique et les dimensions nécessaires pour un fonctionnement thermique correct. Des valeurs de conductivité thermique inférieures à la conductivité thermique de référence de 1,65 W/(m °C) augmenteront la température maximale attendue de la roche. Un autre facteur est celui du refroidissement par aérage qui fait partie du résultat de la température de 155 °C importé de l'exemple de YM. On ne sait pas très bien comment le refroidissement par aérage pendant la période précédant la fermeture sera intégré à l'exploitation du site de Bure, et quand les matériaux de remblayage seront introduits. Ces facteurs devront être définis afin de les modéliser correctement et pour évaluer l'évolution du champ thermique. En attendant, on peut conclure que le calcul de dimensionnement thermique présenté dans le Dossier 2001 Argile Partie B²²² semble atteindre l'objectif thermique seulement pour une exploitation restant généralement en dessous du point d'ébullition dans les strates de la roche du site de Bure, avec probablement des zones au sein même des galeries de stockage au dessus du point d'ébullition.

Une brève description de la sélection des ouvrages est présentée dans le rapport Synthesis, Report on Studies and Activities 2002.²²³ La conception théorique des ouvrages dans ce rapport postule des températures maximales de 100 °C pour le combustible usé et de 90 °C pour les déchets de type C à l'interface de la roche hôte avec la paroi horizontale du forage des alvéoles de stockage. L'augmentation des températures aux interfaces par rapport aux précédents objectifs thermiques inférieurs dans le Dossier 2001 Argile Partie B²²⁴ aura certainement comme conséquence de créer des conditions au-dessus du point d'ébullition dans les alvéoles, particulièrement quand un remblayage artificiel d'argile gonflante sera mis en place. Le rapport Synthesis, Report on Studies and Activities 2002²²⁵ indique qu'"il est aujourd'hui difficile de démontrer l'absence de condensats dans l'alvéole..." pendant l'étape thermique qui est prévue de durer plusieurs

²²¹ Danko et Bahrami 2004, pp. 10-13

²²² ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B

²²³ ANDRA BET 2002 Synthesis

²²⁴ ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B

²²⁵ ANDRA BET 2002 Synthesis, p. 36

siècles pour les déchets de type C. Le mode thermique probable de fonctionnement multi-phases sera évidemment plus long dans les modules de stockage de combustible usé. Cependant, aucun calcul de modèle justificatif n'est présenté pour examen, et il est difficile de comprendre comment les effets de convections associés à la migration de la phase de vapeur peuvent affecter la performance.

3.4 Eléments du système des barrières ouvragées

On suppose que les éléments du système de barrières ouvragées seront examinés en surface et dans les laboratoires souterrains. La description de la caractérisation du laboratoire dans tous les documents²²⁶ est complète, satisfaisante, et convaincante, en supposant que la température de chaque colis de déchets individuel est en dessous de la CTC. Puisque la nature des matériaux de remblayage est beaucoup plus simple que celle de la roche hôte avec des propriétés presque homogènes et isotropes, les méthodes décrites plus haut pour la mesure thermophysique de propriétés seront applicables.

Les méthodes d'évaluation/de mesures dont il faut se servir pour la détermination des propriétés thermo-hydrologiques des éléments du système de barrières ouvragées, dont les scellements et les matériaux de remblayage, font partie d'un programme bien conçu. L'examen des résultats acquis sur d'autres sites de stockage procure un haut niveau de confiance dans le programme français pour ce sujet.

Le processus de mouillage des matériaux de remblayage pourrait être une période d'opération critique notamment quand la charge thermique des colis de déchets est près de, ou au dessus de la limite de la CTC dans un endroit particulier. Les essais à haute pression et à haute température (au dessus du point d'ébullition) pourraient être nécessaires pour caractériser le gonflement et les autres propriétés du matériau tampon en présence de vapeur surchauffée.

Le système des barrières ouvragées comprend un réseau de "fractures" de construction, c'est-à-dire les vides entre les blocs tampons préfabriqués ainsi qu'entre les blocs et les parois des tunnels et des galeries, illustrés dans la figure 3.2. La caractérisation de la perméabilité au gaz de ces fractures pourrait être utile pour la modélisation la circulation de l'air/la vapeur dans le matériau tampon de remblayage pendant le cycle sec/partiellement saturé de l'opération au-dessus de la limite de la CTC.

²²⁶ ANDRA Référentiel Géologique Tome 5, 2001, ANDRA Référentiel Matériaux Tome 2, 2001, ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001

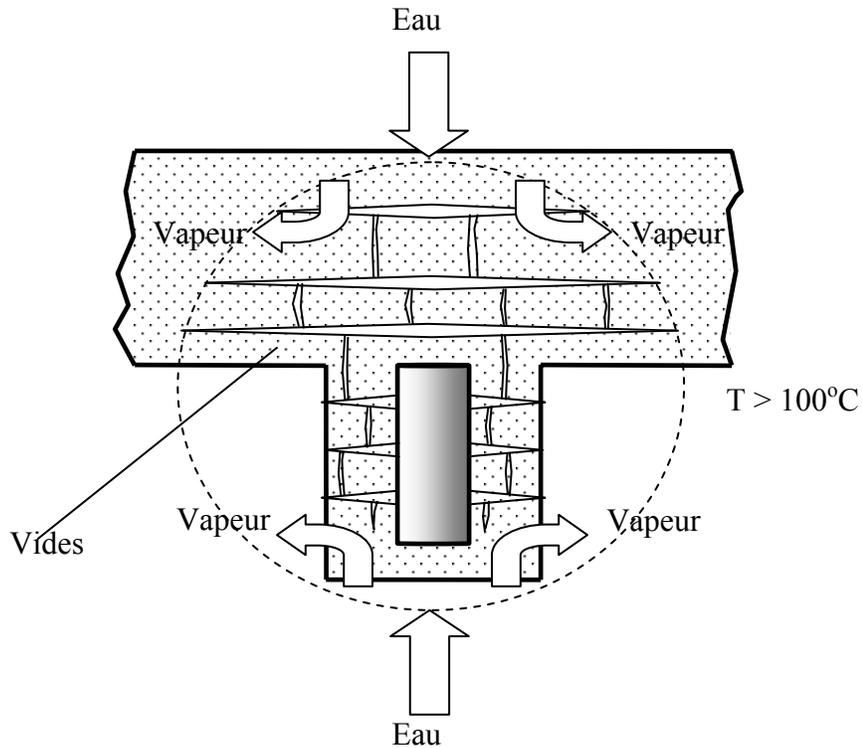


Figure 2. Vides de construction dans le remblayage sec

Les questions de corrosion peuvent apparaître en conditions partiellement saturées avec des températures potentiellement élevées autour et particulièrement au-dessus de la limite de la CTC

Il est intéressant de faire l'hypothèse que le processus de remouillage sera d'autant plus critique que les caractéristiques géologiques du site sont bonnes. Une perméabilité très basse peut retarder le retour de l'eau et permettre une longue période de phase intermittente de se développer pendant laquelle des altérations et minéralisations chimiques pourraient modifier de manière permanente les propriétés du matériau de remblayage. Une autre question qui se pose est de savoir comment la flexibilité durant l'exploitation pourra affecter la performance du site de stockage. Existe-t-il une limite technique pour la durée de l'aérage des galeries ouvertes pour empêcher la déstabilisation de la roche causée par la désaturation et les fissures secondaires? Sur quelle distance l'EDZ peut-elle se propager dans la couche callovo-oxfordienne durant une période prolongée d'aérage? Quelles limitations faudrait-il placer sur les éléments de la barrière ouvragée, tels que l'aérage, et quels programmes de surveillance et de confirmation pourraient être utilisés pour vérifier ces limitations? Il faudra répondre à ces questions dans les phases futures du projet de Bure.

3.5 Caractérisation de la charge thermique

Le plan de gestion pour caractériser l'inventaire des déchets est décrit dans le document *Stratégie et programme des recherches*.²²⁷ Le mélange de différents lots de déchets dans un module de stockage ne semble pas être envisagé. Le programme stratégique suppose la séparation des différents types de déchets pour leur mise en place dans différentes alcôves. Cette solution devrait s'avérer excellente tant pour permettre une flexibilité dans l'exploitation que pour optimiser les méthodes de stockage, spécifiques aux différents types de déchets: B, C, UOX, ou MOX, et pour pallier les variations à l'intérieur de chaque alcôve.

Les questions thermiques ne sont pertinentes que pour le combustible usé, UOX et MOX. On ne sait pas très bien si le mélange de combustibles usés avec des taux de combustion et de dissipation thermique initiale différents est envisagé. Une installation extérieure pourrait être nécessaire pour la réduction de la dissipation thermique, des combustibles usés avant leur mise en place dans le site de stockage.

Il est trop tôt pour dire si la limite de la CTC sera d'une importance primordiale puisqu'aucune étude sur cette question n'a été évaluée. Il est également trop tôt pour déterminer si l'espace de stockage disponible à Bure peut être utilisé de façon optimale et efficacement sans pré-conditionnement et mélange des déchets, puisqu'il reste à répondre à la question de la limite de la CTC ainsi qu'à celles de l'architecture du site de stockage et du système à développer.

Ces questions doivent être traitées. On peut formuler l'hypothèse que le site de Bure aura une installation de surface dotée d'une capacité de préconditionnement et de mélange suffisamment importante pour éviter des grandes variations de charge thermique entre les colis de déchets, et pour équilibrer les charges individuelles en dessous de la limite de la CTC.

3.6 Relevé de conclusions

1. Alors que les objectifs thermiques de l'ANDRA ont évolué au cours des années pour l'entreposage à long terme des matériaux nucléaires exothermiques (type déchets C et combustible usé), les méthodes pour réaliser ces objectifs n'ont pas été établies/documentées. La conception théorique des ouvrages ne s'appuie pas sur un modèle numérique crédible permettant une évaluation, démontrant l'adhésion objectifs thermiques.
2. L'ANDRA n'a pas démontré dans ses travaux la corrélation entre (a) la conception théorique des ouvrages, (b) la caractérisation du site, et (c) la modélisation. L'absence de description des modèles et de leur utilisation pour l'évaluation du site ainsi que de conception théorique des ouvrages représentent deux lacunes dans les travaux présentés.
3. Lors de notre examen critique du concept théorique des travaux et de l'évaluation du site, nous n'avons trouvé aucun élément confirmant l'existence d'une évolution des modèles allant de modèles simples, puis de modèles d'ensemble, ou de modèles conceptuels pour aboutir à des modèles

²²⁷ Direction de la Technologie 2003

de conception des ouvrages et à une évaluation du site. Les possibilités d'évaluer les modèles en les comparant aux résultats expérimentaux directs ont été omises. Les expérimentations décrites dans E-TER n'ont pas répondu aux attentes puisque les modèles simplifiés décrits dans les documents ne semblent pas être satisfaisants pour l'évaluation/la vérification des propriétés thermophysiques du site. La raison pour laquelle les résultats de modèles unidimensionnels sont incorporés dans la modélisation inverse des expérimentations in situ n'est pas claire ; l'écoulement de la chaleur est loin d'être un problème linéaire et unidimensionnel. Même le modèle analytique bidimensionnel pour un appareil chauffant d'une longueur infinie s'avère être un modèle très médiocre pour un dispositif utilisant un élément chauffant de seulement 2 m de long. La grande différence entre les modèles bidimensionnels analytiques et les modèles tridimensionnels numériques disqualifie les autres modèles. Il est même contestable d'affirmer que les conditions d'un modèle pour un domaine tridimensionnel qui postule des propriétés physiques homogènes et isotropes soient satisfaisantes, puisque la stratigraphie du site de Bure révèle des séquences dont les propriétés diffèrent selon les différentes directions.

4. La conductivité thermique, une des caractéristiques thermophysiques les plus importantes du site, n'a pas été proprement établie. L'écart-type de ce paramètre est exceptionnellement élevé. Il laisse donc une grande marge d'incertitude dans la capacité du site à dissiper la chaleur.
5. Le nombre d'échantillons utilisés pour établir les propriétés thermophysiques du site à partir d'échantillons de laboratoire semble être trop petit, tout particulièrement au vu de la variabilité spatiale de ces propriétés dans la zone de stockage prévue.
6. Le rôle que la zone d'EDZ joue dans la performance couplée thermique-hydrologique dans des conditions de charge thermique n'a pas été assez bien étudié pour être efficacement intégré à l'évaluation. Aucun résultat concernant le site ou des modèles de cette zone n'a été trouvé pour cette revue critique.
7. Bien que l'objectif pour le régime des températures selon le scénario de référence se situe en dessous du point d'ébullition, il n'est pas impossible d'avoir une situation où la température dépasse le point d'ébullition. Le développement d'un système binaire est tout à fait possible dans lequel: soit (1) un régime de températures en dessous du point d'ébullition prévaut si le remblayage et la roche peuvent se re-saturer (et les conductivités thermiques augmentent pour atteindre des valeurs de saturation de l'eau élevées engendrant des températures basses) ; soit (2) un champ de températures au-dessus du point d'ébullition se développe si le remblayage et la roche ne peuvent pas se resaturer (et les conductivités thermiques restent celles du remblayage désaturé et de l'EDZ). La création d'un cycle de vapeur est par conséquent possible dans certaines conditions de charge thermique, à savoir, si le matériau de remblayage ne se sature pas et que la zone endommagée ne se re-sature pas en raison de la perte d'eau dans la phase de vapeur causée par les zones froides de condensation du site de stockage.

8. La conception théorique des ouvrages présentée dans le rapport Bilan des études et travaux 2002²²⁸ postule des températures maximales de 100°C pour le combustible usé et de 90°C pour les déchets de type C à l'interface de la roche hôte avec la paroi horizontale du forage des alvéoles de stockage. L'augmentation des températures aux interfaces par rapport aux précédents objectifs thermiques inférieurs dans le Dossier 2001 Argile²²⁹ aura certainement comme conséquence de créer des conditions en dessous du point d'ébullition dans les alvéoles, particulièrement quand des matériaux de remblayage argileux ouvrés seront mis en place. Le rapport ANDRA²³⁰ déclare qu' "il est aujourd'hui difficile de démontrer l'absence de condensats dans l'alvéole..." pendant l'étape thermique qui est prévue de durer plusieurs siècles pour les déchets de type C. Le mode de fonctionnement thermique à étapes multiples/multiphase sera évidemment plus long dans les modules de stockage de combustible usé que dans ceux des déchets de type C. Cependant, aucun calcul de modèle justificatif n'est présenté pour examen, et il n'est pas évident comment les effets de convections associés à la migration de la phase de vapeur peuvent affecter la performance.
9. Puisque l'on peut s'attendre à des températures supérieures au point d'ébullition dans les modules de déchets de type C et de combustible usé pendant de longues périodes dans la conception des ouvrages privilégiée selon le Synthesis rapport Bilan des études et travaux 2002,²³¹ ces modules peuvent développer des cycles de vapeur continus dans la zone de stockage et cela pendant des siècles. Cependant, aucun effort de réévaluation n'a pu être trouvé dans la documentation traitant de la détermination "d'une charge thermique critique" (CTC) pour chaque colis de déchets dans son aire de stockage. La conception et l'exploitation d'une installation nucléaire de stockage dépassant la limite CTC au site de Bure semble être en contradiction avec le concept de prévisibilité.
10. Il n'existe dans les documents aucune discussion et aucune étude justificative de modèle sur l'effet de la ventilation sur la désaturation de roche, la fissuration secondaire potentielle pendant la ventilation, et l'extension de l'EDZ qui s'ensuit. L'exploitation souple, de type « entrepôt » est un vœu indiqué, mais si l'objectif déclaré est une exploitation souple de type « entrepôt », les conséquences d'une telle souplesse en termes d'effets d'altération du site n'ont pas été établies.

3.7 Sommaire des recommandations principales

1. Procéder à une caractérisation plus détaillée du site de Bure concernant les propriétés thermophysiques, particulièrement celles des alvéoles dédiées au combustible usé.

²²⁸ ANDRA BET 2002 Synthesis

²²⁹ ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B

²³⁰ ANDRA BET 2002 Synthesis

²³¹ ANDRA BET 2002 Synthesis

2. Inclure les propriétés thermophysiques et la vérification du modèle thermique dans les essais de chauffage in situ à grande échelle sur le site de Bure.
3. Employer des techniques numériques-informatiques de modélisation inverse plus sophistiquées pour l'évaluation des essais thermiques in situ sur le site de Bure.
4. Développer/adopter et vérifier des modèles numériques de base de conception pour les processus thermiques qui comprennent les domaines relatifs à l'échelle proche du colis de déchet, aussi bien qu'à l'échelle du massif. Coupler ces modèles aux effets thermo-hydrologiques et géomécaniques pertinents.
5. Établir les limites de la CTC pour les alvéoles dédiées à recevoir le combustible utilisé en utilisant les propriétés du site et les modèles couplés thermo-hydrologiques-vapeur/air pertinents.
6. Étudier les effets éventuels (changements chimiques, minéralisation) de la migration à hautes températures de vapeur dans le matériau de remblayage comme dans les fractures de la zone endommagée dans l'argilite.
7. Evaluer d'une façon critique les effets de la ventilation sur la désaturation de la roche, la fissuration secondaire qui en résulte et l'extension de l'EDZ tout particulièrement dans le contexte d'une stratégie d'exploitation d'une installation d'entreposage/de type « entrepôt » dans laquelle les galeries pourraient être maintenues ouvertes et aérées pendant des durées prolongées.
8. Utiliser un modèle de simulation thermique-hydraulique-de ventilation couplée pour l'analyse de la température et des champs de désaturation dans et autour des galeries de stockage dans l'EDZ, ceci pendant la période précédant la fermeture.

3.8 References

ANDRA BET 2002 Synthesis	Andra – 2002 Synthesis report on studies and activities, Research on the disposal of high level long-lived radioactive waste. January 2004. Based on the Recherches pour le stockage des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue. Bilan des études et travaux 2002.
ANDRA Cahier des charges E-TER 2001	Andra – Rapport no C CC AGEM 00-063/B – Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne. Cahier des charges de réalisation E-TER, Réponse de l'argilite a des sollicitations thermiques, Objectifs scientifiques et résultats attendus. Émetteur: DS/GM Date d'origine 30/07/2000. Rév. B, 08/06/2001.
ANDRA Cahier des charges SUG 2001	Andra – Cahier des charges de réalisation du suivi scientifique du creusement des galeries du laboratoire souterrain : SUG, Objectifs scientifiques et résultats attendus. Identification: C CC ADS 00-001, Émetteur: DS, [Bure] : ANDRA, Date d'origine. 17/12/99. Rév. B: 12/11/2001.
ANDRA Dossier 2001	Andra – Dossier 2001 Argile sur l'avancement des études & recherches relatives a la faisabilité d'un stockage de dechets a haute activité et a vie longue en formation

Argile, Pt.A	géologique profonde - Rapport de synthèse. [Partie A] Décembre 2001. Running title: Dossier de synthese 2001 – Partie A.Dossier 2001 Argile.
ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B	Andra – Dossier 2001 Argile sur l'avancement des etudes & recherches relatives a la faisabilité d'un stockage de dechets a haute activité et a vie longue en formation géologique profonde - Rapport de synthèse Partie B. Compléments scientifiques et techniques. [Châtenay-Malabry?]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, Décembre, 2001.
ANDRA E-TER 2001	Andra – Rapport no D RP 0G.3S 00-12/B – Evaluation préliminaire de la réponse Therm hydro-mécanique de l’essai E-TER, date of origin 17/03/2000. Rév. B, 30/30/2001.
ANDRA Modélisation numérique 2002	Andra – Rapport D RP 0 LML 02.001/B – Modélisation numérique du couplage thermohydromécanique du site de l’Est. Etude de la désaturations et de la resaturation avec prise en compte de l’endommagement induit et des déformations plastiques. Influence des interactions avec la barrière ouvragée. Rapport final. Date d’origine 04/02/2002. Rév. B, Mars 2002
ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001	Andra – Rapport no A RP ADS 99-005 – Référentiel Géologique du site de Meuse/Haute-Marne. Tome 4. Le Callovo-Oxfordien. Émetteur: Direction Scientifique Date d’origine Janvier 1999. Rév. B, 16/07/2001.
ANDRA Référentiel Géologique Tome 5, 2001	Andra – Rapport A RP ADS 99-005 – Référentiel Géologique du site de Meuse/Haute-Marne, Tome 5, Etat d’avancement de la modélisation. Émetteur: Direction Scientifique Date d’origine Janvier 1999. Rév. B, 03/09/2001.
ANDRA Référentiel Matériaux Tome 2, 2001	Andra – Rapport C.RP.AMAT.01.060 – Référentiel Matériaux, Tome 2. Les Matériaux argileux. Émetteur: Direction Scientifique, Service Matériaux. Date d’origine Novembre 2001.
Bahrami et Danko 2003	Bahrami, D., and Danko, G., 2003 – “In Situ Thermophysical Properties Variation at Dr Scale Test, Yucca Mountain,” Proceedings of 10th International High-Level Radioactive Waste Management Conference (IHLRWM), March 30-April 2, 2003, Las Vegas, Nevada. pp. 1251-1258. La Grange Park, IL: American Nuclear Society, 2003.
Bahrami et al. 2004	Bahrami, D., Danko, G., Croisé, J., Leister, P. and Poppei, J., 2004, “Underground, long term storage of spent fuel using the Twin-Tunnel Concept with natural ventilation.” Proceedings of DisTec 2004, International Conference on Radioactive Waste Disposal, Berlin, April 26.--28.4., 2004,organized by Federal Office for Radiation Protection, Salzgitter, Germany,(2004) pp. 526-539
Berchenko et al. 1999	Berchenko, I., Detournay-Piette, C., and Detournay, E., 1999 – “Solution of thermoporoeastic problems using FLAC.” In FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics (Proceedings of the International FLAC Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics, Minneapolis, 1999). C. Detournay and R. Hart, Eds. Rotterdam: A. A. Balkema, 1999, pp. 133-145.
Cuisiat et Besnus 1999	Cuisiat, F.D.E., Besnus, F., 1999 – “Near and far field thermal calculations for nuclear spent fuel disposal in deep geological formations.” In FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics, (Proceedings of the International FLAC Symposium on Numerical

	Modeling in Geomechanics, Minneapolis, 1999). C. Detournay and R. Hart, Eds. Rotterdam. Balkema, 1999. pp. 317-324.
Danko et Bahrami 2004[Danko, G., and Bahrami, D., 2004, "Coupled, Multi-Scale Thermohydrologic-Ventilation Modeling with MULTIFLUX." In Society for Mining, Metallurgy, and Exploration . 2004 SME Annual Meeting, February 23 – 25, 2004, Denver, Colorado. Preprints. Preprint 04-144.Proceedings,
Danko et Mousset-Jones 1989	Danko, G. and Mousset-Jones, P., 1989, "A Simultaneous Measurement of In-Situ Measurement of the Heat Conductivity and Thermal Conductivity and Diffusivity at the Waldo Mine," in Proceedings of the 4th U. S. Mine Ventilation Symposium. Malcolm J McPherson, ed. Littleton, CO: Society for Mining, Metallurgy & Exploration. pp. 287-296.
Direction de la Technologie 2003	Direction de la Technologie, 2003 – Stratégie et programmes des recherches sur la gestion des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue (au titre de l'article L542 du code de l'environnement, issu de loi du 30 décembre 1991) - Edition 2003. On the Web at http://www.recherche.gouv.fr/technologie/energie/spr2003.pdf .
Finsterle 2000	Finsterle, S., iTOUGH2 User's Guide . Report LBNL-40040. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory, May 2000. On the Web at http://www-esd.lbl.gov/ITOUGH2/Bibliography/PostScript/LBL_UseGui.pdf .
Giraud 1993	Giraud, A. 1993 –Couplages thermo-hydro-mécaniques dans les milieux poreux peu perméables : application aux argiles profondes. Thèse de Doctorat de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. As cited by Cuisiat and Besnus 1999.
Nitao 2000	Nitao, J., 2000. "NUFT, Flow and Transport code V3.0s." Software Configuration Management, Yucca mountain project- STN:10088-3.0S-00. Prepared at Lawrence Livermore National Laboratory.
Patriarche 2001	Patriarche, D., 2001. Caractérisation et modélisation des transferts de traceurs naturels dans les argilites de Tournemire. Thèse. - Docteur de l’Ecole des Mines de Paris. 13 septembre 2001. On the Web at http://tel.ccsd.cnrs.fr/documents/archives0/00/00/53/52/tel-00005352-00/tel-00005352.pdf .
Pruess 1987	Pruess, K., TOUGH Users Guide, Report Nureg/CR-4645, Nuclear Regulatory Commission (also report LBL-20700, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, Calif.), 1987.
Règle N° III.2.f	Règle N° III.2.f (10 juin 1991) Règles fondamentales de sûreté relatives aux installations nucléaires de base autres que réacteurs. Tome III: production, contrôle et traitement des effluents et déchets. Chapitre 2: Déchets solides...

Chapitre 4. Terme source et champ proche

R.C.Ewing

Conclusions principales

L'ANDRA a développé une stratégie d'ensemble pour modéliser le relâchement et le transport des radionucléides du terme source et leur transport dans le champ proche d'un stockage géologique dans l'argile. D'une façon générale ce programme a identifié les processus critiques, les radionucléides dont on attend l'impact le plus important sur les calculs de doses, et les données qui seront indispensables pour étayer les modèles qui seront utilisés pour l'évaluation de sûreté. Dans beaucoup de cas, c'est-à-dire pour le verre borosilicaté et le combustible usé, les données et les modèles se fondent sur l'état des connaissances de la recherche par les chercheurs français.

En dépit du caractère complet et de l'organisation du programme de recherche de l'ANDRA tous les deux louables, nombre d'analyses qui apparaissent dans les documents de l'ANDRA ne portent pas sur des mécanismes spécifiques ou sur les conditions environnementales qui seront rencontrées dans le site de stockage. Une grande partie du travail n'est qu'une compilation des données bibliographiques à laquelle il manque une synthèse qui situerait ces données dans la perspective d'un site de stockage spécifique, comme celui de Meuse/Haute-Marne.

Bien que les divers volets du programme de recherche de l'ANDRA fassent souvent référence aux changements de la géométrie physique ou de la chimie de l'horizon du site de stockage en fonction du temps, il n'existe pas encore de représentation entièrement intégrée de l'évolution du site de stockage en fonction du temps. De nombreux processus importants dans le champ proche sont étroitement couplés, cependant il n'existe pas dans les documents de l'ANDRA d'analyse explicite qui indique que ces processus seront modélisés.

Même si les incertitudes dans les données et les modèles sont reconnues par l'ANDRA dans toutes les discussions, il n'existe aucune analyse abordant la façon dont celles-ci seront caractérisées et quantifiées.

Nous considérons que l'état actuel du programme scientifique n'a pas permis de recueillir suffisamment de données indispensables pour les modèles de l'ANDRA. Des données supplémentaires seront nécessaires, principalement des données expérimentales à long terme et des essais in situ dans le laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne. Du fait que beaucoup de données sont nécessairement spécifiques au site, il n'est pas possible de s'appuyer totalement sur des études effectuées sur d'autres sites (Mont Terri par exemple)

Le fait que de grandes quantités d'informations soient dispersées dans différents documents a constitué une autre difficulté pour mener à bien cette revue. Les analyses

résumées contiennent peu de détails et il n'existe toujours pas de synthèse de l'état des connaissances à l'appui du concept de stockage des combustibles usés et des déchets hautement radioactifs dans un site de stockage géologique situé dans le site Meuse/Haute-Marne. Idéalement une synthèse de cette nature devrait se trouver dans un document unique, référencé avec soin avec des données justificatives et spécifiques au site Meuse/Haute-Marne. Le rapport « Safety Report for the project Opalinus Clay » peut servir de modèle idéal pour l'analyse et la rédaction d'un document de ce type (NAGRA, 2002). Ce rapport expose de façon très claire la stratégie de stockage. Il analyse les données scientifiques justificatives, examine les "écarts possibles" par rapport au comportement prévu, décrit l'évolution du système de stockage en fonction du temps et finalement développe les éléments et principes essentiels du dossier d'options de sûreté.

Recommandations

1. Conditions du site de stockage à divers intervalles de temps :

L'ANDRA devrait donner la priorité au développement d'une vision claire des conditions du site de stockage à divers intervalles de temps. Une connaissance claire de ces conditions est essentielle pour correctement modéliser le relâchement du terme source et du transport des radionucléides dans le champ proche.

L'ANDRA devrait produire sans délai un document comparable à celui du rapport de sûreté de NAGRA 2002 comme référence pour le concept de programme de recherche qui sous-tendra le scénario de sûreté du site Meuse/Haute.

Le programme scientifique de l'ANDRA est complet en ce sens qu'il aborde presque tous les aspects qui peuvent s'avérer pertinents pour la sélection d'un site et l'évaluation de sûreté de ce site. Cependant, la réflexion sur les types d'éléments qui seront nécessaires pour étayer les extrapolations sur le long terme du comportement modélisé du site n'a reçu qu'une attention très limitée. C'est un problème commun à tous les travaux visant à développer un stockage géologique pour les déchets nucléaires; malgré cela, *l'ANDRA doit s'efforcer de développer une stratégie spécifique sur la manière dont elle apportera les justifications pour l'efficacité et la validité des modèles dont elle se sert dans le cadre de son évaluation de sûreté.* La stratégie sera jusqu'à un certain point spécifique au site. Il est possible que les propriétés géologiques du site fournissent des données sur son comportement à long terme. Pour les modèles du terme source et du champ proche, les analogues naturels pourraient s'avérer très utiles. Pour d'autres paramètres (comme par exemple la surface d'un bloc de verre fracturé), des valeurs pénalisantes et limites pourraient être pertinentes. Quelle que soit l'approche, il est impératif que chaque composante de l'analyse traite clairement de la question de l'extrapolation des données sur le long terme ou leur interpolation sur le court terme. Un travail de cette nature n'apparaît pas clairement dans la série de documents actuels de l'ANDRA.

Il existe deux raisons importantes pour le laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne : 1) Approfondir les connaissances sur le site ; 2) Pouvoir mener dans la roche concernée des essais dont les dimensions puissent rendre compte de l'hétérogénéité et de la complexité du site actuel. L'ANDRA a décrit les types d'essais qu'elle espère mener

dans le laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne. Cependant, les détails techniques et les raisons de ces essais sont généralement absents des analyses présentes dans les documents que j'ai eu l'occasion de consulter. *L'ANDRA devrait se donner pour objectif de produire un document unique présentant les essais in situ qu'elle mènera à bien dans le laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne. Un tel document devrait être régulièrement remis à jour pour rendre compte des nouvelles connaissances et des changements dans des priorités de recherche.*

Dans toute analyse de sûreté des incertitudes demeureront, même pour un site géologique favorable soutenu par un excellent programme scientifique. La nature et l'origine de ces incertitudes dépendent en partie du site en question. L'ANDRA n'a pas encore traité directement de la question des incertitudes dans son analyse de sûreté. *Une des priorités de l'ANDRA devrait être la préparation d'une analyse sur les principales sources d'incertitudes dans son analyse de la performance du stockage sur le site de Bure. Une telle analyse peut jouer un rôle important pour orienter le programme de recherche vers les questions essentielles. La question des incertitudes sera au cœur de toute analyse scientifique pour justifier une demande d'autorisation et l'accord du public pour l'implantation d'un site. Une priorité absolue devrait être donnée au développement d'une méthode de caractérisation et de quantification des incertitudes des résultats expérimentaux et des modélisations justifiant l'analyse de sûreté.*

4.1 Introduction

Il existe une abondante littérature scientifique sur le comportement à long terme des matériaux du terme source et sur leurs interactions dans le champ proche en conditions de stockage. Une grande partie de ces travaux, publiés dans des revues scientifiques, a été accomplie par des scientifiques français. Il est clair qu'une grande partie du travail français se trouve au premier rang de ces investigations scientifiques. Cependant, notre travail de revue s'est trouvé limité par un manque d'information. En effet, il reste à savoir exactement comment ces connaissances et information doivent être incorporées à une évaluation de sûreté du site de stockage proposé sur le site de Meuse/Haute-Marne. Bien que l'ANDRA ait fourni à l'équipe de revue un certain nombre de documents, principalement des résumés de la documentation, elle ne nous a pas, par contre, communiqué de document de synthèse détaillé décrivant explicitement la démarche adoptée par l'ANDRA pour la modélisation du comportement à long terme des diverses formes de déchets dans le champ proche. Sur ces questions, nous n'avons pas bénéficié de présentations ou de discussions avec des scientifiques de l'ANDRA. Pour les besoins de cette revue nous avons principalement étudié les documents suivants : Projet HAVL Argile Programme Scientifique 2002-2005, le Dossier 2001 Argile HAVL, Partie B (2001e), le Bilan des Études et Travaux 2002 et le 2002 Synthesis : Report on Studies and Activities.²³² Ces documents fournissent une description utile de la démarche de l'ANDRA ainsi que des données qui existent ou seront obtenues pour étayer son

²³² ANDRA 2002-2005; ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B ; ANDRA BET 2002, et ANDRA BET 2002 Synthesis

approche. Ces documents, ainsi que les autres cités dans ce chapitre, ont servi de base à cette revue. Cette revue apporte donc principalement des commentaires sur les grandes lignes du programme global de l'ANDRA plutôt qu'un examen scientifique détaillé des données et de leur utilisation dans les modèles actuels qui doivent être utilisés pour la détermination de la performance et de la sûreté du site.

4.2 Matériaux du terme source

Les modèles régissant le terme source décrivent tous les processus qui conduisent à la corrosion, à l'altération et finalement au relâchement des matériaux contenant des radionucléides. En France, le site de stockage géologique pour déchets nucléaires à haute activité renfermera deux matériaux très radioactifs, essentiels pour le terme source : un verre borosilicaté (les déchets C) contenant les déchets de haute activité issus du retraitement du combustible usé et le combustible usé en l'état. Ces deux matériaux représentent l'essentiel de l'inventaire radiologique envisagé. Dans la perspective de la science des matériaux, les propriétés du verre et du combustible usé sont très différentes.²³³ De plus le site recevra aussi des déchets B de faible et de moyenne activité mais dont les teneurs en radionucléides à vie longue sont importantes. Les déchets B correspondent principalement aux déchets bitumés issus du retraitement du combustible usé, aux déchets technologiques cimentés (par exemple, les effluents, les outils métalliques et les déchets organiques), et aux déchets cimentés et conditionnés des matériaux irradiés (les coques et les matériaux de structure en zircaloy).

4.2.1 Caractéristiques générales des déchets vitrifiés (déchets C)

A l'échelle atomique la structure du verre manque d'ordre. C'est un solide métastable, avec une liaison chimique entre les atomes de type mixte covalente/ionique. Il peut se présenter sous forme d'une phase unique pour une gamme de compositions relativement grande. Tous les verres contiennent une fraction limitée de phases cristallines, comme par exemple les produits de fission appartenant à la famille des métaux nobles, qui ne sont pas facilement incorporés à la structure de verre. La majeure partie de la radioactivité dans le verre provient des produits de fission à vie courte (par exemple, le césium 137 et le strontium 90), bien que les produits de fission à vie longue (par exemple, le technétium 99 et l'iode 129) restent un problème important pendant de très longues périodes. Le processus de contrôle des températures de fusion et de refroidissement a un effet profond sur sa composition, sa structure et son degré de fracturation. La cinétique de l'altération du verre des déchets nucléaires en présence de l'eau est contrôlée par deux réactions simultanées :

- i) la diffusion de l'eau dans le verre et l'hydratation du réseau vitreux ;
- ii) la dissolution du réseau vitreux

²³³ Oversby 1994

Le premier processus est très rapide ; par conséquent, le deuxième processus devient l'étape cinétique de contrôle.²³⁴

4.2.2 Caractéristiques générales du combustible utilisé

En revanche, le combustible utilisé se présente principalement sous une seule phase polycristalline et semi-conductrice de dioxyde d'uranium (UO_2), avec une fraction relativement faible de produits de fission (par exemple, le césium 137 et le strontium 90) et d'éléments transuraniens (par exemple, le plutonium 239 et le neptunium 237). La composition et la microstructure exactes du combustible dépendent du taux de combustion (les valeurs typiques des combustibles anciens sont de 35 MWj/kg, celles des combustibles actuels sont situées entre 42 et 55, ceux à venir pourraient atteindre environ 60 MWj/kg). Pour un taux de combustion typique, le combustible contiendra approximativement 3 pour cent de produits de fission et un pour cent de transuraniens. Pour des taux de combustion plus élevés, la teneur en produits de fission augmente, en même temps leur distribution change du fait qu'une proportion plus grande du rendement provient de la fission du plutonium 239. Le rendement de fission des neutrons thermiques (fission de l'uranium 235) est différent de celui des neutrons rapides (fission du plutonium 239). Par ailleurs, il peut y avoir différents types de combustible, comme du combustible à oxydes mixtes (MOX) qui contient des teneurs en plutonium plus élevées. La plupart des combustibles sont protégés par une mince gaine de métal, habituellement un alliage de zirconium. Les produits de fission et les éléments transuraniens peuvent exister sous des formes physiques et chimiques variées dans le combustible utilisé (par exemple, les produits de fission gazeux forment de petites bulles dans le combustible, de nouvelles phases d'oxyde se forment à la surface des grains, les actinides et lanthanides sont incorporés dans la structure de l' UO_2 , et une forte concentration d'éléments volatils migrent dans les petits vides entre la surface du combustible et la gaine de métal). Surtout, du point de vue du stockage géologique à long terme, la composition du combustible utilisé change rapidement avec la décroissance radioactive. Pendant les 100 premières années, la majeure partie de la radioactivité est générée par les produits de fission à courte vie, mais par la suite, entre 1 000 et 100 000 ans, ce sont les actinides et leurs produits de décroissance qui apportent la plus grande contribution.²³⁵ Le combustible utilisé est un semi-conducteur sensible aux réactions d'oxydoréduction dont le comportement de dissolution est contrôlé par des réactions électrochimiques de surface.²³⁶

4.2.3 Caractéristiques générales des déchets B

Les déchets B rassemblent surtout des déchets de faible et moyenne activité. Ils sont issus d'activités variées du retraitement du combustible nucléaire ainsi que d'autres activités

²³⁴ Voir Grambow, 1998, pour une discussion plus détaillée du processus de corrosion

²³⁵ Hedin, 1997

²³⁶ Shoesmith et autres, 2003

donnant lieu à une irradiation et à la manutention des matériaux radioactifs. Les principaux types de déchets sont :

1. les déchets bitumés (B2) ;
2. les déchets incorporés dans du ciment ou du mortier (B3) ; et
3. des déchets irradiés variés dont font partie les coques et embouts des assemblages combustibles.

La caractéristique la plus importante de ces types de déchets réside dans le fait qu'ils sont très hétérogènes.

4.2.4 Commentaires généraux sur les matériaux du terme source

1. Le point de départ de toute analyse de sûreté doit se fonder sur une connaissance très précise de la composition et de l'état de la forme des déchets. Pour le verre, cela dépendra étroitement du type de combustible retraité, de la technologie de retraitement et du soin avec lequel le produit final a été fabriqué et caractérisé. Pour le combustible nucléaire usé cela dépendra du type de combustible, de son taux de combustion et de la période d'entreposage avant le stockage. Pour les déchets B, l'hétérogénéité des différents types de déchets présente un défi tout particulier pour la caractérisation. La caractérisation peut être basée sur la connaissance des processus d'exploitation (par exemple, la traçabilité du matériau qui est mélangé avec du bitume ou du béton) ou sur des protocoles ultérieurs de prélèvement et de caractérisation.
2. Les principales formes de déchets à haute activité, verre et combustible usé, diffèrent entièrement de par leurs propriétés en tant que matériaux, et elles seront vulnérables à des paramètres environnementaux différents. Pour le verre, il faudra prendre sérieusement en considération la période thermique après mise en place dans une installation d'entreposage et la composition des eaux souterraines. Pour le combustible usé, les conditions redox et l'effet de la radiolyse sur des réactions redox de surface joueront un rôle important. Il n'existe pas de modèle de performance des matériaux qui puisse s'appliquer à ces deux matériaux à la fois. Néanmoins, quelques processus importants seront communs aux deux matériaux : la formation des produits d'altération et l'incorporation de radionucléides par précipitation, co-précipitation et/ou sorption.
3. Les questions scientifiques à traiter pour la modélisation du comportement du verre et du combustible usé changeront en fonction du temps. Pour la période la plus courte (< 100 ans), les comportements du césium 137 et du strontium 90 peuvent être considérés comme dominants. Pour la période intermédiaire (de 1 000 à 100 000 ans) le comportement des espèces chimiques négativement chargées du technétium 99 et de l'iode 129 sera

important. A long terme (> 10 000 ans) les éléments transuraniens (par exemple, le plutonium 239 et le neptunium 237) et les produits de fission à vie longue (par exemple, le technétium 99 et l'iode 129) sont dominants. L'impact de chaque radionucléide sur l'évaluation finale de sûreté sera une combinaison d'une évaluation de la radiotoxicité propre à cet élément et de sa mobilité dans la géologie spécifique de l'environnement du site de stockage.

Par conséquent, tout programme de recherche doit s'efforcer de comprendre le comportement à long terme, aux échelles de temps pertinentes et dans les conditions géochimiques et hydrologiques qui prévalent durant ces périodes. Les premières évaluations sur l'importance relative ou l'impact de certains radionucléides seront une aide précieuse pour établir les priorités pour le programme scientifique, mais elles sont nécessairement limitées par la pertinence et l'état d'avancement des modèles qui sont employés dans l'évaluation de sûreté.

4.3 Environnement du champ proche

L'environnement du champ proche est défini par les matériaux du terme source, le conteneur métallique de déchets, les matériaux de structure mis en place autour du conteneur (par exemple, l'argile Montmorillonite, le béton, ou le bitume), les matériaux de structure employés dans la construction (le béton, par exemple) et la roche immédiatement en contact avec la galerie de mise en place. Chaque matériau aura une durée de vie effective moyenne, et en principe, permettra d'assurer une combinaison des trois objectifs suivant : 1.) empêcher ou retarder l'arrivée de l'eau jusqu'aux déchets ou aux conteneurs de déchets ; 2.) empêcher ou retarder le relâchement des radionucléides dans l'environnement du champ proche 3.) modifier les conditions hydrologiques et géochimiques du champ proche afin de retarder le relâchement et le transport des radionucléides. Les défis scientifiques et techniques sont nombreux :

1. Il n'existe pas d'ensemble unique de conditions environnementales qui soient les meilleures pour tous les matériaux dans le champ proche (par exemple, le verre, le combustible usé, le conteneur en métal et le béton). Par exemple, la présence du béton peut amener des augmentations de pH (par ex. un panache de contamination alcaline) entraînant ainsi une augmentation du taux d'altération du verre.
2. Les réactions chimiques qui décrivent l'évolution de chaque élément du champ proche sont fortement couplées. Les vitesses d'altération du verre sont très sensibles au pH et à la teneur en silice des eaux souterraines. Le type et l'ampleur de ces deux paramètres exerceront un effet tampon sur les interactions eau-roche. Les effets du couplage peuvent être négatifs, aussi bien que positifs. Par exemple, la corrosion du conteneur de déchets peut créer des composés d'oxyhydroxyde de fer (FeOOH) avec une capacité de sorption élevée pour certains radionucléides (les réactions de réduction oxydation de surface peuvent diminuer la mobilité du technétium 99).

3. Le champ proche est la partie la plus dynamique du site de stockage géologique. La construction des puits et des tunnels engendre une zone endommagée pour laquelle les propriétés hydrologiques du champ proche peuvent être différentes de celles du champ lointain. Le dégagement thermique engendré par la décroissance des produits de fission peut produire des températures élevées qui mettent des centaines d'années pour s'atténuer. Le champ de rayonnement, en particulier le champ des rayonnements ionisants issu des produits de fission, peut être intense pendant les 100 premières années. Plus tard, les effets des rayonnements ionisants liés à la décroissance des actinides peuvent entraîner la radiolyse et affecter les conditions redox de réactions chimiques importantes (telles que la corrosion du combustible usé). Ceci veut dire que pendant les premières 1000 années, l'environnement du champ proche est dynamique avec des effets potentiellement importants occasionnés par des phénomènes transitoires.

Ainsi, l'évolution et les conditions fortement couplées du milieu dans le champ proche (c'est-à-dire la température et le champ de rayonnement) peuvent avoir un effet profond sur le comportement des matériaux du terme source ainsi qu'un effet important sur le concept théorique du site de stockage. La caractérisation dans le temps des conditions environnementales prévues impose une connaissance détaillée du champ proche, une large série d'études expérimentales dans des conditions bien définies, mais idéalisées, et finalement la vérification des modèles par comparaison avec les expériences in situ dans les conditions réelles de site de stockage. Les phénomènes potentiellement importants sur des périodes de temps plus longues ne peuvent être évalués que par des expériences accélérées de laboratoire, l'extrapolation des modèles aux périodes d'intérêt, et la comparaison aux systèmes naturels pertinents (les études portant sur les «analogues naturel »).

4.4 Pourquoi l'environnement du champ proche et le terme source sont-ils importants ?

Vu la complexité des matériaux du terme source et de la dynamique de l'environnement du champ proche, il existe, sur la question de l'analyse de sûreté, une tendance facilement compréhensible à éviter de se baser sur la forme des déchets ou les processus dans l'environnement du champ proche. Les modèles de l'environnement du champ proche sont nécessairement complexes. Les expériences in situ seront compliquées, longues (jusqu'à des dizaines d'années) et onéreuses. Bien que les analyses de sûreté puissent démontrer que les propriétés des matériaux du terme source sont moins importantes que celles des propriétés géologiques du champ lointain d'un site particulier (par exemple, les temps de transport peuvent être longs et la sorption par la roche importante), il existe un certain nombre de raisons qui rendent la modélisation du champ proche d'une importance critique pour juger de la performance et de la sûreté du site de stockage.²³⁷

²³⁷ Ewing, 1992

1. Une stratégie de confinement des radionucléides dans le champ proche est avantageuse. Elle est essentiellement liée à la forme physico-chimique des déchets ou à la tenue des conteneurs de déchets dans le champ proche. Juste à la mise en place dans un site de stockage, les radionucléides sont piégés dans les déchets. Dans la mesure où des radionucléides sont retenus dans le champ proche, toutes les barrières géologiques sont alors des barrières additionnelles et redondantes vis-à-vis du transport. Les formes des déchets sont les premières barrières dans le concept multi-barrière du stockage géologique. Les stratégies qui se fondent principalement sur des temps de migration longs, la dispersion ou la dilution, prévoient implicitement le relâchement et le retour des radionucléides dans la biosphère. Le concept français²³⁸ est basé sur une série de barrières naturelles et ouvragées : le conteneur de déchets, les barrières ouvragées dans le site de stockage, et la barrière géologique.
2. La prévision de la performance à long terme d'un site de stockage géologique sera inévitablement un problème difficile en soi étant données la complexité du système naturel et des longues périodes de temps pour lesquelles une analyse de sûreté doit être élaborée. Cependant, il est certainement plus facile de développer et de tester des modèles du comportement du champ proche, principalement fondés sur le comportement physique et chimique des matériaux du terme source (par exemple, par des expériences in situ) que des modèles de la migration des radionucléides dans le champ lointain d'un site particulier de stockage géologique, dans lequel les caractéristiques hydrologiques, géochimiques et géophysiques sont couplées.
3. En dernier lieu, pour le verre, et surtout pour l'UO₂ du combustible usé, il existe une documentation riche et directement applicable sur leur comportement à long terme dans divers environnements géologiques.²³⁹ Ainsi, les systèmes naturels, en particulier les gisements d'uranium qui contiennent principalement de l'UO₂, fournissent une base solide pour comprendre le comportement à long terme des phases du terme source dans les conditions spécifiques d'un site de stockage. L'applicabilité générale des modèles de performance des matériaux (synthétiques et naturels) permet de faire des prévisions à long terme qui sont beaucoup plus fiables que celles qui seraient obtenues par des études sur le transport des radionucléides sur un site particulier.

²³⁸ Raynal, 1996

²³⁹ Janeczek et autres, 1996 ; Crovisier et autres, 2003

4.5 Évaluation du terme source

4.5.1 Déchets vitrifiés

Depuis trente ans, il existe un programme de recherche, plus ou moins important suivant les pays, sur l'altération et la corrosion des déchets vitrifiés.²⁴⁰ Une grande partie de ces recherches a été menée par des chercheurs français grâce à une politique de soutien du Commissariat à l'énergie atomique (CEA). Le travail français a été récapitulé par Godon²⁴¹ et fait l'objet d'une revue externe internationale en cours. En outre, l'Union européenne a financé un travail de deux ans, GLAMOR (GLAss MOdeling under Repository Conditions), dont l'objectif est de comparer et évaluer les différents modèles traitant de l'altération des verres.²⁴²

Pour le concept français, la performance du verre borosilicaté est découpée en deux périodes: 1) une phase thermique initiale dans l'éventualité d'une défaillance du conteneur de déchets ou du surconteneur ; 2) une phase post thermique et allant au delà de la durée de vie du conteneur de déchets. Le modèle de dissolution du verre pour le verre a été divisé en trois étapes successives dans le temps : 1) une première vitesse de dissolution, la vitesse directe; 2) une période de transition où la vitesse de dissolution diminue sans interruption; 3) une vitesse de réaction finale à long terme qui s'approche *presque* d'un état d'équilibre. Le modèle employé par l'ANDRA semble généralement être conservateur (un taux de relâchement final de 10^{-5} /année); cependant, il reste à déterminer et modéliser plusieurs interactions pertinentes avec l'environnement de stockage. Les programmes de recherche proposés et en cours aborderont un certain nombre de ces questions, par exemple: 1) la détermination de facteurs supplémentaires, autres que la concentration en silice, influençant la vitesse de dissolution du verre; 2) le développement d'une meilleure compréhension des mécanismes de dissolution du verre aux températures inférieures à 50 C dans une gamme de pH allant de 6 à 10 ; 3) la quantification de l'évolution de la surface active en fonction du temps ; 4) le développement d'une meilleure compréhension de la stabilité de la couche de gel à la surface du verre en fonction du temps et de la température.

Recommandations :

Toutefois, malgré le niveau actuel, plutôt approfondi, de l'état des connaissances sur l'altération du verre borosilicaté, certaines questions demandent encore un examen minutieux.

²⁴⁰ Lutze et Ewing, 1988 ; Grambow, 1994, 2000 ; Grambow et Müller, 2001 ; Van Iseghem, 2001 ; Vernaz et Gin, 2001 ; Vernaz et autres, 2001 ; Van Iseghem, 2004

²⁴¹ Godon, 2002

²⁴² Van Iseghem, 2004

1. Malgré cet important effort de recherche, une question importante reste toujours sans réponse. Même dans des conditions stationnaires, c'est-à-dire des conditions de saturation en silice, le verre présente une vitesse d'altération résiduelle à long terme. Bien que cette vitesse soit peu élevée (inférieure d'un facteur de mille à la vitesse de la réaction directe initiale), la valeur exacte et le mécanisme de ce relâchement font l'objet de nombreux débats. Pour simplifier, il existe deux hypothèses différentes sur le mécanisme qui régit la vitesse résiduelle : 1.) Avec le concept d'"affinité" la vitesse résiduelle à long terme dépend de la composition de la solution (par exemple, le degré de "saturation" en silice) et des réactions inverses en surface. Dans ce cas, la tenue du verre est plus sensible aux changements des conditions de l'environnement, telles que la composition de la solution, le débit ou les interactions avec les matériaux dans l'environnement du champ proche. 2.) Avec le concept "protecteur", la vitesse résiduelle à long terme est contrôlée par la formation d'un gel protecteur à la surface du verre jouant le rôle de barrière. D'une part ce gel empêche la diffusion de l'eau vers la surface du verre et d'autre part il empêche le relâchement des radionucléides hors du verre. Dans ce cas, la tenue à long terme dépend de l'intégrité du gel. Pour les expériences à court terme, les différences entre ces deux approches apparaissent mineures, mais l'extrapolation précise de la performance du verre sur des durées beaucoup plus longues exige une compréhension du mécanisme qui accompagne la vitesse résiduelle de relâchement à long terme. Le projet GLAMOR a évalué les implications de ces deux modèles en comparant des résultats obtenus en utilisant les mêmes données expérimentales.²⁴³ Il est intéressant de noter que les deux modèles ont pu reproduire la vitesse résiduelle, mais ils n'ont pas pu faire la distinction entre les mécanismes. En outre, il y a peu de données sur l'altération du verre en présence d'autres solides dans le champ proche (par exemple, l'argile, les produits de corrosion, le béton). *Par conséquent, un programme expérimental et théorique doit être poursuivi afin de déterminer le mécanisme responsable de la vitesse résiduelle à long terme.*
2. Bien qu'il existe une importante base de données à partir des expériences sur des déchets vitrifiés de différentes compositions dans des conditions de laboratoire très variées, il n'existe encore qu'un nombre limité d'expériences sur les verres radioactifs réels. Ces dernières sont importantes en tant qu'éléments nécessaires à la validation des expériences menées avec des verres non radioactifs, mais elles sont également importantes parce que les effets du rayonnement et des dommages engendrés par le rayonnement peuvent faire apparaître de nouveaux phénomènes à prendre en considération pour évaluer la performance prévue pour les déchets vitrifiés.²⁴⁴ *Des études des mécanismes de réaction/d'altération sur de vrais verres radioactifs borosilicatés doivent être effectuées pour confirmer l'applicabilité des*

²⁴³ Van Iseghem, 2004

²⁴⁴ Advocat et autres, 2001

expériences actuelles sur du verre non radioactif pour modéliser les mécanismes d'altération pour les déchets vitrifiés.

3. Les modèles actuels d'altération du verre et de relâchement des radionucléides ont été correctement axés sur le verre dans de nombreuses conditions de laboratoire bien contrôlées pour les expérimentations de lixiviation (par exemple de pH, de Eh, de débit, de composition de la solution, du rapport surface extérieure/volume) ; cependant, il existe peu de travaux de recherche visant spécifiquement à étudier systématiquement les interactions entre le verre, l'eau, l'argile et les métaux des conteneurs de déchets. Le schéma 1 illustre la complexité de ces interactions potentielles. Afin de parvenir au niveau de compréhension indispensable, il est nécessaire de concevoir un ensemble pertinent d'expériences de laboratoire et d'expériences in situ. Les types de matériaux (par exemple, le granite comparé à l'argile) peuvent affecter les résultats des essais de lixiviation en changeant, soit la composition des solutions, soit les propriétés "protectrices" du gel.²⁴⁵ Quelques effets, comme par exemple le retrait de la silice de la solution par son adsorption sur des inclusions dans l'argile peuvent être éphémères et ne pas affecter la vitesse résiduelle de corrosion à long terme, alors que d'autres effets, comme par exemple la sorption de la silice sur les produits de corrosion du Fer restent à évaluer.²⁴⁶ Une étude française récente s'est penchée sur le système verre-eau-argile²⁴⁷ et a conclu que la cinétique de l'altération du verre est contrôlée par les propriétés "protectrices" du gel. Malgré cela, ces exemples ne traitent que d'un aspect des types de réactions chimiques qu'on peut prévoir dans ce système (voir la fig. 4.1). Ce modèle devrait donc être confirmé par des expériences de laboratoire et in situ à plus long terme avec des argiles spécifiques au site de Bure. Ces expériences à venir peuvent très efficacement tirer parti des expériences in situ avec du verre radioactif et non radioactif (R7T7 SON 78) sur d'autres sites, comme par exemple le programme de CORALUS dans l'argile de Boom.²⁴⁸ *Les futurs programmes expérimentaux sur l'altération du verre devraient être élargis pour y inclure les verre-eau-argiles-matériaux des conteneurs de déchets.*

Les modèles actuels sur l'altération du verre s'appuient sur tout un ensemble de données expérimentales; cependant, le modèle de l'altération du verre qui sera employé dans l'évaluation de la performance sur la sûreté du site sera nécessairement d'une forme beaucoup plus simple. Un enjeu important sera le jugement porté sur l'efficacité du modèle plus simple d'évaluation de la performance comparé aux modèles basés sur des fondements scientifiques plus compliqués. Il faut immédiatement envisager la question de savoir comment doit s'effectuer le « passage » entre les modèles à base scientifique et les modèles d'évaluation de la performance. De tels jugements, doivent reposer sur une connaissance d'ensemble de l'évolution de l'environnement du champ proche dans le

²⁴⁵ Jollivet et autres, 2000

²⁴⁶ Curti, 2003

²⁴⁷ Gin et autres, 2001

²⁴⁸ Van Iseghem et autres, 2001 ; Valcke et Van Iseghem, 1999

temps ainsi que sur une compréhension des sources principales d'incertitudes des modèles sophistiqués et des modèles d'évaluation de la performance du stockage. *Il est impératif de faire un examen judicieux du lien entre les modèles à base scientifiques qui étayent l'altération du verre et les modèles réels, simplifiés utilisés dans l'évaluation de sûreté. Il faudra en particulier concevoir des programmes expérimentaux (peut-être des expériences in-situ) qui peuvent être employés pour tester les modèles utilisés dans l'évaluation de sûreté.*

4.5.2 Évaluation sur le combustible utilisé

Dernièrement, des efforts ont visé à rassembler les données et les modèles employés pour évaluer l'évolution à long terme du combustible nucléaire utilisé dans un site de stockage géologique. Neuf organismes européens de recherche ont travaillé ensemble dans le cadre d'un programme de recherche de la Communauté européenne, pour développer un modèle de terme source pour le combustible utilisé dans trois milieux : le granit, l'argile et le sel.²⁴⁹ Cet effort de collaboration (sur le UO₂, le SIMFUEL, le combustible utilisé UO₂, et le combustible utilisé MOX), a permis d'établir un terme source modèle basé sur la cinétique qui devrait fournir des évaluations conservatrices du relâchement des radionucléides. Des modèles plus réalistes exigeront : des modèles quantitatifs de tous les mécanismes potentiels de rétention, y compris la formation de phases secondaires, la co-précipitation et la sorption sur des matériaux du champ proche (par exemple, produits de corrosion des conteneurs métalliques ou de la roche). Il est clair que les matériaux du champ proche (par exemple, les conteneurs métalliques, les matériaux de remblayage et la roche hôte) auront un effet important sur le comportement de dissolution du combustible. Les chercheurs français ont récemment récapitulé les résultats du Programme de recherche sur l'évolution à long terme des colis de combustibles irradiés (programme Precci du CEA) dans deux volumes.²⁵⁰ Ce document fournit la base scientifique pour les modèles qui seront utilisés pour la modélisation de la dissolution du combustible utilisé.

En plus des efforts européens, un modèle électrochimique complet de la corrosion de l'UO₂ a été développé par des chercheurs canadiens.²⁵¹ Le modèle considère les effets de la radiolyse alpha, la précipitation des produits de corrosion du combustible et du conteneur en acier, et les réactions redox parmi des espèces résultant de la corrosion ou de la radiolyse. Le modèle exige encore un effort expérimental substantiel pour développer les paramètres d'entrée nécessaires et pour évaluer le rôle d'un certain nombre de processus, tels que la relation entre la couche résultant de la corrosion et la surface disponible qui accompagne les réactions électrochimiques. Ce modèle n'a pas explicitement abordé le rôle d'autres matériaux dans le champ proche sur le processus de corrosion du combustible utilisé.

²⁴⁹ Grambow et autres, 2000

²⁵⁰ Poinssot et autres, 2001 ; Poinssot et autres, 2004

²⁵¹ Shoesmith et autres, 2003

L'ANDRA a concentré ses efforts sur le développement d'une connaissance des mécanismes de relâchement des radionucléides pour le combustible usé UO_2 .²⁵² Dans les conditions réductrices prévues, les vitesses de corrosion pour l' UO_2 sont approximativement inférieures de trois ordres de grandeur à celles qui interviennent dans des conditions d'oxydation. Les effets de la radiolyse et la possibilité d'une corrosion oxydante du combustible usé présentent un intérêt tout particulier. Il est en effet possible que l'hydrogène produit par la corrosion du métal, puisse supprimer la corrosion de l' UO_2 issue de la radiolyse. L'approche de l'ANDRA envisage trois sources de relâchement pour le combustible usé: 1) la dissolution de la matrice des pastilles du combustible UOX ou MOX; 2) le relâchement des radionucléides du vide entre la gaine et la pastille de combustible; 3) le relâchement des produits d'activation et des produits de fission implantés de la gaine en zircaloy. Les pastilles de combustible sont considérées comme hétérogènes et sont par conséquent divisées en trois zones - centrale, intermédiaire et externe. Deux types de mécanismes de dissolution sont considérés : la dissolution de la matrice et la dissolution radiolytique près de la surface. Selon leur position dans la pastille de combustible ou dans l'assemblage combustible les vitesses de relâchement des radionucléides varient entre 1 et 10^{-5} /an.

Recommandations spécifiques concernant le combustible nucléaire usé :

Comme pour le verre borosilicaté, il existe déjà une base de connaissance considérable pour comprendre la corrosion du combustible nucléaire usé et du relâchement des radionucléides. En outre, on s'attend à ce que le programme PRECCI actuellement en cours fournisse de nouvelles informations importantes. Malgré cela, il faudra encore mener une recherche considérable pour déterminer la forme chimique et l'emplacement physique des principaux radionucléides dans le combustible usé. A l'heure actuelle, seules des estimations majorantes d'une partie du relâchement, par exemple du vide entre la gaine et la pastille de combustible, peuvent être faites. Ces estimations conservatrices ne sont probablement pas nécessaires et peuvent être réduites par une recherche supplémentaire.

- 1. L'utilisation de combustibles à taux de combustion plus élevés ainsi que de combustibles MOX exige un travail supplémentaire considérable pour comprendre le développement de la structure physique et des propriétés dans la pastille de combustible. Outre les différences importantes dans les inventaires des radionucléides, par rapport aux combustibles UOX avec un taux de combustion modéré, il y aura d'autres différences importantes, comme par exemple des concentrations en hélium plus élevées dans le MOX que dans l'UOX. Il se pourrait également que pour les combustibles présentant un taux de combustion élevé la diffusion des produits de fission résultant des rayonnements soit facilitée. Il pourrait y avoir des incertitudes significatives pour certains paramètres importants du relâchement, par exemple, le relâchement à partir des vides du combustible, dues à un manque de données pertinentes.²⁵³ Il faudrait par conséquent un effort spécial de recherches en*

²⁵² ANDRA BET 2002

²⁵³ Jain et autres, 2004

vue de caractériser les propriétés physiques et chimiques des combustibles nucléaires en fonction du taux de combustion et du type de combustible, comme pour le combustible MOX.

2. *Une recherche supplémentaire est nécessaire pour évaluer la proportion de rupture de gaine avant le stockage et le comportement à long terme de la gaine du combustible. A l'heure actuelle le concept français pour le stockage ne s'octroie pas le bénéfice de la performance de la gaine ; pourtant, le comportement de la gaine aura un effet important sur le relâchement prévu du combustible usé. Le concept multibarrières du stockage des déchets nucléaires exige, au minimum, une évaluation qualitative de l'efficacité de toutes les barrières, même si elles ne font pas explicitement partie du dossier de sûreté. En outre, il est possible que lors de l'évaluation finale de sûreté il soit nécessaire de prendre en compte des éléments supplémentaires du système de stockage – même s'ils ne semblaient pas être nécessaires dans la première analyse de sûreté. A titre d'exemple, des recherches futures, par exemple sur la corrosion oxydative du combustible usé résultant de la radiolyse pourraient s'avérer être insolubles en raison des importantes incertitudes dans certaines parties de l'analyse ; cependant, ces incertitudes pourraient être réduites grâce à une connaissance approfondie de la performance d'autres parties du système du champ proche, comme par exemple la performance de la gaine du combustible en tant que barrière.*
3. *La question de l'influence de l'oxydation par radiolyse et de la dissolution du combustible nucléaire usé dans des conditions réductrices n'est pas résolue, particulièrement en présence d'autres composants de l'environnement du champ proche (par exemple, l'hydrogène issu de la corrosion du métal). Les conditions réductrices qui existent dans le site de stockage présentent de grands avantages puisqu'elles limitent la mobilité de plusieurs radionucléides importants (le neptunium et le technétium par exemple); par conséquent, *il est impératif de compléter les expériences et de comprendre l'impact de la radiolyse sur les conditions redox de surface et les mécanismes de corrosion du combustible usé.**
4. *Que la corrosion se produise dans des conditions réductrices ou d'oxydations, des phases secondaires, comme SiO_4 , se formeront certainement, en particulier si l'eau atteint un élément combustible pendant la période thermique. Si elles se forment ces phases secondaires doivent être identifiées. Les modèles chimiques de la corrosion du combustible doivent pouvoir expliquer la formation de ces phases secondaires. De plus, les phases secondaires peuvent devenir des "pièges" pour les radionucléides en incorporant ces éléments dans la structure de la phase secondaire. *Un effort est nécessaire pour déterminer la capacité (c'est-à-dire, le degré de partitionnement) des radionucléides dans les phases secondaires qui sont susceptibles de se former.**

5. En conclusion, "tous ces objectifs contraignant demandent le développement de modèles qui devront être employés pour prévoir l'évolution en fonction du temps, et des variables, des propriétés ou des fonctions choisies. Cependant, au delà de cette approche plutôt directe, la question de la robustesse et de la crédibilité de la prévision est une question importante pour la décision finale sur la gestion à long terme des déchets nucléaires. Dans ce contexte, une extrapolation sur des milliers et des centaines de milliers d'années ne peut se justifier que si elle est étayée par une compréhension approfondie des mécanismes d'évolution réels des matériaux considérés à une échelle microscopique".²⁵⁴ Cette remarque très avisée d'un scientifique français réputé, travaillant au programme du combustible usé de la Commission à l'énergie atomique, souligne les difficultés qui restent à résoudre. *L'ANDRA doit développer la base ou le raisonnement scientifique grâce auxquels elle pourra, avec confiance, extrapoler à long terme le comportement du combustible usé.* Ceci demande, non seulement, une connaissance "à l'échelle microscopique", mais également l'élaboration de méthodes pour confirmer les extrapolations à long terme. A l'heure actuelle il existe trois possibilités : 1.) des essais en laboratoire à long terme ; 2.) des essais in situ à long terme dans le laboratoire souterrain; 3.) l'utilisation d'analogues naturels pertinents. *Ces essais in situ à long terme devraient être menés dans le Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne.*

Recommandations concernant le combustible usé dans un milieu argileux :

Vu la quantité considérable de travail qui a déjà été effectuée sur des aspects fondamentaux de la corrosion du combustible usé, ces recommandations portent sur des aspects spécifiques à la corrosion du combustible nucléaire usé en présence de l'argile.

1. Déterminer l'effet du Eh et du pH des eaux interstitielles sur la vitesse de corrosion du UO₂ ainsi que sur la spéciation et la solubilité de l'uranium.
2. Déterminer l'influence des carbonates et de la matière organique sur la vitesse de corrosion de l'UO₂ ainsi que sur la spéciation et la solubilité de l'uranium.
3. Identifier les mécanismes qui contrôlent la migration/rétention des radionucléides principaux (uranium, neptunium, plutonium, technétium, iode, etc...) pendant la corrosion du combustible usé en présence de l'argile.
4. Déterminer l'effet de la radiolyse (en particulier la décroissance alpha pour les périodes plus longues) sur la solubilité et la mobilité des radionucléides principaux.
5. Développer des modèles synergiques du transport des radionucléides principaux dans le champ proche dans les conditions pertinentes d'un site de stockage.

²⁵⁴ Poinssot et autres, 2001. Traduit par Annie Makhijani

6. Déterminer les effets des fluides alcalins libérés par le ciment sur la corrosion du combustible usé et les propriétés de confinement de l'argile (par exemple, les eaux cimentaires peuvent causer la dissolution des argiles smectiques ou sceller des fractures par la précipitation de la calcite).

Ce genre d'études exigera des expériences de laboratoire avec l' UO_2 et le combustible usé en présence des argilites du Callovo-Oxfordien. Toutes ces études demandent, non seulement une analyse consciencieuse des solutions, mais aussi la caractérisation détaillée de l'état solide des produits de réaction. Il faudra peut-être des essais in situ à une échelle limitée pour confirmer les modèles développés sur la base de ces études de laboratoire. Ces essais peuvent être faits sur de petits échantillons de carotte, mais les essais in situ seront nécessaires pour démontrer l'applicabilité des résultats aux modèles des processus à l'échelle d'un site de stockage.

4.5.3. Déchets B

Les "déchets B" englobent une variété de déchets, dont font partie les déchets bitumés et cimentés. Les déchets bitumés sont principalement constitués par les effluents de basse et moyenne activité issus du retraitement du combustible usé. Les compositions des déchets bitumés sont complexes et diverses. Généralement, la matrice de bitume empêche l'accès de l'eau, et la matrice organique peut retarder le relâchement en maintenant des conditions réductrices. Les déchets cimentés se composent de deux types : 1) des boues et des effluents homogènes ; 2.) des mélanges hétérogènes d'outils en métal, d'équipement de laboratoire, de sources de rayonnement et d'autres matériaux contaminés. Une dernière catégorie comprend des déchets conditionnés consistant pour la plupart de coques en zircaloy, d'autres matériaux de structure des combustibles usés, et les embouts d'assemblages restant après le retraitement des assemblages de combustible UOX, de l'uranium enrichi, et du MOX. Les deux premiers types sont immobilisés dans du mortier, le troisième type est compacté dans des fûts métalliques. Bien que l'activité totale de ces types de déchets soit faible par rapport au déchet vitrifié et au combustible usé, ils contiennent des radionucléides à vie longue, et parce que leur chimie est complexe il est très difficile de développer des modèles mécanistiques détaillés du relâchement et du transport. Les modèles actuels postulent un relâchement presque complet pour des radionucléides à la surface des matériaux et un faible taux de relâchement, 10^{-5} /an, pour la gaine en raison de la faible vitesse de corrosion du zircaloy.

Recommandations :

Bien que le programme proposé par l'ANDRA traite de la majorité des questions clés associées aux déchets B, quelques sujets peuvent néanmoins demander plus d'attention:

1. *L'effet des rayonnements/de la radiolyse sur la stabilité du bitume et des phases de composants des déchets cimentaires.* Les phases hydratées dans le ciment

peuvent faire l'objet d'une radiolyse à semi-conducteurs et ceci pourrait entraîner la production de gaz.

2. Bien que les estimations actuelles sur le carbone présent dans la formation hôte qui pourrait entretenir une activité microbienne soient basses (quelques pour cent), il se peut que les déchets contiennent des matériaux (tissu, filtres, solvants) qui peuvent alimenter l'activité microbienne. L'activité microbienne pourrait réduire la stabilité des déchets, changer la forme/l'état d'oxydation de certains radionucléides, avoir une incidence sur l'intégrité physique de la forme des déchets en ouvrant des fractures ou en causant des fissurations, ou entraîner la formation et le relâchement de gaz. *Il est recommandé que des études in situ et de laboratoire sur des populations microbiennes pertinentes soient effectuées pour les déchets très hétérogènes de classe B, en particulier ceux qui peuvent entretenir une activité microbienne.*

4.6 Évaluation sur les matériaux du champ proche

Une fois relâchés dans le champ proche, les radionucléides sont encore soumis à un certain nombre de mécanismes de rétention qui peuvent fonctionner efficacement. La complexité pour comprendre et modéliser le transport (mobilité/rétention) des radionucléides dans le champ proche tient surtout à la nécessité de comprendre l'évolution des conditions environnementales (la température, le champ de rayonnement et la chimie de l'eau) dans un système de barrières ouvragées et géologiques qui peuvent réagir chimiquement entre elles. Dans l'approche française, différents radionucléides sont traités à des degrés variables de sophistication pour tenir compte de leur impact sur le calcul de dose.²⁵⁵ Bien que la liste des radionucléides étudiés puisse changer au fur et à mesure que de nouvelles informations sont obtenues, l'ANDRA a actuellement identifié les radionucléides suivants comme apportant une contribution dominante à la dose : le carbone 14, le chlore 36, le sélénium 79, le zirconium 93, le niobium 94, le technétium 99, l'étain 126, l'iode 129 et le césium 135. Cette liste consiste essentiellement en des produits de fission à vie longue qui pourraient être mobiles dans un milieu réducteur (à l'exception du carbone 14 et du chlore 36 qui sont des produits d'activation). Les isotopes des actinides à vie très longue se font remarquer par leur absence (uranium, plutonium et neptunium), vraisemblablement en raison de leurs faibles solubilités et de leur mobilité limitée sous conditions réductrices.²⁵⁶ Les objectifs actuels de l'ANDRA portent sur : 1) la collecte d'informations plus précises sur les éléments mobiles, comme le chlore 36 et l'iode 129 ; 2) la détermination du comportement chimique du sélénium 79, du zirconium 93, du niobium 94 et du technétium 99 sous des conditions réductrices; 3) la détermination des paramètres de transport pour les formes anioniques du chlore 36, de l'iode 129 et du sélénium 79. Un certain nombre d'autres radionucléides pouvant présenter des propriétés importantes sont également à l'étude. L'ANDRA est parvenue à une méthode raisonnable pour établir les priorités (des plus importantes au moins importantes) pour son programme de recherche :

²⁵⁵ ANDRA, Référentiel Matériaux Tome 2, 2001

²⁵⁶ Hedin, 1997

- la priorité la plus élevée est accordée aux radionucléides qui contribuent le plus à la dose
- les radionucléides qui contribuent moins à la dose, mais pour lesquels le transport est particulièrement sensible aux conditions évolutives de l'environnement
- les radionucléides pour lesquels il existe des lacunes significatives sur leurs propriétés de spéciation ou de sorption
- les radionucléides qui ne sont pas considérés comme pouvant contribuer de façon significative à la dose, mais dont la radiotoxicité est importante.

Le programme de recherches pour les radionucléides est plutôt complet. Il inclut mais sans s'y limiter :

- la détermination des concentrations basées sur des limites de solubilité calculées à partir des données thermodynamiques (grâce à des collaborations internationales et à l'aide de la Base de données thermodynamiques de l'AEN-OCDE)
- l'appui à des investigations expérimentales centrées sur les actinides, le radium et le niobium:
- la détermination de la spéciation en solution en fonction de la composition de l'eau et des conditions redox.
- une attention toute particulière aux milieux hyperalcalins qui résultent de la présence des déchets cimentaires
- l'évaluation de la stabilité intrinsèque des colloïdes qui peuvent se former pour les radionucléides qui sont sensibles à l'hydrolyse

Recommandations :

1. L'approche adoptée pour établir des priorités pour l'investigation des différents radionucléides est tout à fait raisonnable, et les éléments d'importance de premier ordre sont ceux dont l'impact est le plus élevé sur le calcul de dose. Ce calcul dépend des hypothèses fondamentales faites au cours du calcul d'évaluation de performance. Cependant, les hypothèses conservatrices ou optimistes sur le comportement d'une partie du système du site de stockage peuvent masquer des relations importantes dans d'autres parties du système du site de stockage. Par conséquent, des questions potentiellement importantes peuvent ne pas se manifester de manière évidente dans les étapes initiales, ou même ultérieures, de l'analyse d'évaluation de sûreté. *Pour cette raison, une attention particulière devrait être accordée aux radionucléides de "faible impact" mais dont la toxicité est importante (par exemple, le neptunium et le plutonium).* Le succès de l'autorisation d'implantation du site et la confiance du public dans les résultats de l'évaluation finale de sûreté dépendra de, et exigera une compréhension complète du comportement de ces radionucléides de "faible impact", mais très radiotoxiques.
2. L'ANDRA et d'autres agences françaises ont comme il convient activement participé au développement de la Base de données thermodynamiques de l'AEN-

- OCDE ; cependant, les phases qui se forment en fait dans le champ proche seront probablement déterminées par la cinétique de leurs réactions de formation et de précipitation. *Des expériences de laboratoire doivent être conçues et menées à bien pour comprendre les limitations cinétiques sur la formation des phases secondaires importantes.*
3. Les concentrations des radionucléides qui nous concernent seront généralement très basses, il est donc peu probable qu'elles formeront des phases dans lesquelles elles seront un constituant important. Elles seront plutôt incorporées ou absorbées dans d'autres phases. Le système chimique du champ proche sera dominé par les éléments principaux, tels que le silicium, l'uranium et le fer ; par conséquent, les phases telles que uranium-silicates peuvent se former. Il semblerait qu'un intérêt limité soit porté aux mécanismes d'incorporation ou de sorption dans les phases dominantes. La co-précipitation et l'incorporation sont certainement des processus importants dans les systèmes naturels, et dans un site de stockage géologique où l'argile domine comme roche-type et où elle est utilisée comme matériau de remblayage, les réactions de sorption/désorption seront certainement très importantes. *Des programmes expérimentaux pour étudier l'incorporation des radionucléides et leur sorption sur des phases secondaires altérées devraient être approfondis.*
 4. Pour autant que cet examen critique puisse le déterminer, les dispositions pour tester les modèles sont limitées, en particulier pour ce qui concerne la géochimie du champ proche et son évolution en fonction du temps ou en fonction de l'avancement des réactions. Les modèles géochimiques utilisés pour décrire la géochimie du champ proche sont entachés d'incertitudes importantes et inhérentes. ²⁵⁷ *Les modèles géochimiques du comportement du champ proche devraient faire l'objet d'essais approfondis en laboratoire et d'essais in situ à moyenne échelle dans le laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne. Les modèles géochimiques devraient également être évalués par l'usage approprié des études sur les analogues naturels.*

4.6.1 Conteneurs de déchets métalliques

Le conteneur métallique est un élément essentiel du système multi-barrières. Le conteneur a deux fonctions principales :

- 1.) retarder le contact entre l'eau et les déchets (verre ou combustible nucléaire usé) ;
- 2.) retarder le relâchement dans le champ proche des radionucléides contenus dans le colis de déchets. En outre, le conteneur de déchets peut jouer un rôle d'écran de protection contre les rayonnements et relâchement pendant le transport ; cependant, ces caractéristiques ne sont pas traitées dans cette revue.

²⁵⁷ Voir par exemple, Bethke, 1996, et Nordstrom, 2004

L'intégrité à long terme du conteneur métallique de déchets peut généralement être maintenue par le contrôle de l'environnement géochimique du champ proche de sorte que les vitesses de corrosion soient réduites. Ceci peut être obtenu par la sélection d'une épaisseur qui imposerait un temps considérable avant que la corrosion produise une rupture du colis, ou par le choix de matériaux très résistants à la corrosion, en général le résultat de la formation d'une couche « passive » pendant le processus de corrosion. Un transport restreint, peut-être par diffusion seulement, ou par la sorption chimique sur les produits de corrosion des conteneurs métalliques (par exemple, sorption du technétium sur des oxyhydroxydes de fer), entraîne généralement une rétention des radionucléides. Tous ces processus sont extrêmement sensibles à la chimie des eaux en contact avec le conteneur de déchets, les conditions redox, et la température. Par conséquent, il faut s'attendre à ce que les réactions évoluent dans le temps en fonction du devenir thermique et de l'avancement de la réaction.

Le Référentiel Matériaux, tome 4, La corrosion des matériaux métalliques²⁵⁸ a été la source principale d'information sur le conteneur de déchets pour cette revue critique. Ce document présente une analyse très complète de la littérature scientifique sur la corrosion des conteneurs de déchets, jusqu'au mois de juin 2001. Bien que ce rapport contienne une discussion de la gamme complète des métaux pouvant être utilisés pour les conteneurs de déchets, comme par exemple les alliages de cuivre et de titane, la préférence de l'ANDRA porte sur des aciers non alliés et des alliages Fe-Ni-Cr-Mo (les aciers inoxydables et les alliages de nickel). La revue de l'ANDRA décrit et analyse clairement les effets des changements de l'environnement géochimique, ainsi que d'autres paramètres critiques, comme le champ de rayonnement et l'activité microbienne. La corrosion du métal produira également du gaz, de l'hydrogène ; par conséquent les quantités de gaz produites et leurs effets sur les matériaux de remblayage et le milieu argileux environnant doivent être déterminées. La discussion sur l'évolution du système géochimique au moment où le colis de déchets entre en contact avec les eaux souterraines diluées est limitée. En conclusion, il n'y a pas de description explicite du programme expérimental à effectuer pour étayer la décision finale sur le site de Bure. On s'attendrait au minimum à ce que l'analyse se concentre sur les compositions des eaux souterraines et les conditions prévisibles sur le site de Bure.

Des informations supplémentaires sont également nécessaires sur la conception et la fabrication des emballages de déchets. Les méthodes à employer pour souder les conteneurs (par exemple, il existe différents types de techniques de soudure) et leur traitement thermique ultérieur peuvent avoir un effet profond sur l'intégrité à long terme du colis de déchets. A titre d'exemple, la présence de contraintes résiduelles autour d'une soudure peut avoir comme conséquence d'accroître la susceptibilité à la fissuration de corrosion sous contrainte au contact d'un environnement aqueux. Un autre aspect important, qui ne figure pas dans l'analyse, est la possibilité de rétention des radionucléides due à la sorption sur les produits de corrosion issus de la dégradation des conteneurs de déchets. De tels effets peuvent devenir importants sur des périodes plus longues.

²⁵⁸ ANDRA Référentiel Matériaux Tome 4, 2001

Recommandations :

1. *Il est impératif de concevoir et de mener des expériences de corrosion sur la gamme complète des métaux «candidats» pour le conteneur de déchets. Les expériences devraient se concentrer sur deux phénomènes : 1) la formation et la stabilité des couches « passives » 2.) la corrosion localisée (par exemple par piqûres et crevasses). Cette série d'expériences devrait comprendre les compositions d'eau et les conditions environnementales représentatives qui sont attendues sur toute la période de la stratégie de stockage géologique. Ces expériences devraient comprendre des études sur les effets des eaux interstitielles de l'argile sur la corrosion du conteneur métallique. Les expériences devraient également se concentrer sur la caractérisation des produits de corrosion du métal et sur leurs capacités de sorption. Un ensemble d'expériences spécifiques devra être conçu pour déterminer la quantité de gaz produit pendant le processus de corrosion et les effets de ce gaz sur le milieu argileux environnant.*
2. La corrosion du colis métallique de déchets conduit à la formation d'hydrogène. La présence de gaz dans un système d'argile très étanche est problématique puisque la surpression résultant de l'accumulation de gaz peut créer de nouvelles voies de transport pour les radionucléides, par exemple à travers les barrières ouvragées. En outre, il se pourrait que la présence d'hydrogène puisse empêcher certains des effets oxydants des espèces chimiques issues de la radiolyse. Il faudra certainement prêter plus d'attention à déterminer les volumes et le devenir de l'hydrogène créé au cours de la corrosion des colis métalliques. De fait, la récente Revue internationale par des pairs du Dossier 2001 Argile a tout particulièrement insisté sur cette « ...omission importante en matière de recherche et de développement ».²⁵⁹ *Il faudra développer une série spéciale d'expérimentations pour déterminer la quantité de gaz produite pendant le processus de corrosion ainsi que des modèles décrivant les effets de ces gaz dans le milieu argileux environnant.* Nous sommes conscients que l'ANDRA a récemment débuté un programme de recherche sur cette question comme indiqué par la Commission nationale d'évaluation.²⁶⁰
3. Le type de métal qui sera finalement choisi dictera le type d'études expérimentales qui sont nécessaires; cependant, pour ces métaux dont l'intégrité dépend de la formation d'un film passivant, alors *des études et des expériences spéciales doivent être conçues et accomplies afin de comprendre la probabilité et les effets de la corrosion par piqûre, en particulier en fonction de la composition de la solution.* Il y existe aussi d'autres processus, tels que le "désalliage" (lixiviation sélective) pouvant conduire à la perte ou à la redistribution d'éléments d'alliage clés en fonction du vieillissement, par exemple, du fait de la formation de phases d'altération. Ces processus peuvent réduire la résistance du métal à la corrosion.

²⁵⁹ OECD-NEA, 2003

²⁶⁰ CNE 2004

4. Les interactions microbiennes avec les métaux semblent être importantes, mais, pour la plupart des sites de stockage de déchets nucléaires l'effet réel reste une question à étudier. Il faudrait développer les travaux pour comprendre l'impact potentiel de l'activité microbienne sur des conditions géochimiques du champ proche.
5. Il est nécessaire de concevoir et de mener des essais souterrains pour déterminer les compositions des eaux souterraines au fur et à mesure de leur évolution en fonction de la température.
6. Il faudra concevoir des prototypes de conteneurs et démontrer que les soudures de fermeture peuvent être obtenues sans contraintes résiduelles qui autrement pourraient conduire à une fissuration de corrosion sous contrainte.
7. Il faudra développer et présenter, en se fondant sur les expériences expérimentales et souterraines, le modèle spécifique d'évaluation de performance à employer pour l'analyse de sûreté.
8. Il faudra évaluer l'intégrité à long terme du conteneur par rapport aux analogues pour lesquels des compositions métalliques semblables en métal ont existé sur des échelles de temps géologique ou humaines.
9. Il faudra faire la synthèse de toute cette information dans un modèle de corrosion qui rende compte de l'état de la connaissance des processus chimiques, électrochimiques et de corrosion. Le défi sera dans l'extrapolation de ces modèles à la période très longue du stockage géologique.²⁶¹

Comme nous l'avons vu plus haut, la synthèse réalisée par Dossier 2001 Argile²⁶² est excellente, mais il est impératif d'utiliser cette information pour développer des efforts expérimentaux, théoriques et de modélisation pour étayer l'évaluation de sûreté du site de Bure.

4.6.2 ARGILE - Barrière ouvragée

Les matériaux de remblayage ou des surconteneurs entourant immédiatement le colis de déchets, possèdent un certain nombre de fonctions potentiellement importantes pour la rétention des radionucléides : 1) en gonflant ou se tassant, ils peuvent retarder le contact de l'eau avec le conteneur métallique ; 2) il peuvent avoir un effet tampon sur les propriétés chimiques de la solution pour les rendre moins corrosives en créant, par exemple, des conditions réductrices ; 3) ils peuvent retarder le relâchement des radionucléides en empêchant le mouvement des formes dissoutes ou colloïdales des radionucléides (limitation de l'écoulement de l'eau et réduction de la vitesse de convection) ou par la sorption des radionucléides sur les surfaces réactives. L'argile

²⁶¹ Sagüés, 2002

²⁶² ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B

« fabriquée » sera utilisée autour des colis de déchets qui contiennent les déchets vitrifiés ou le combustible nucléaire usé. Dans le concept français, le rôle de l'argile artificielle est d'éviter le contact avec l'eau et au-delà de retarder le relâchement des radionucléides et des éléments toxiques.

ANDRA a fourni une bonne synthèse de l'état des connaissances en novembre 2001 sur les propriétés chimiques et physiques de l'argile gonflante (montmorillonite) sélectionnée par l'ANDRA comme matériau de référence pour le remblayage.²⁶³ Certains thèmes des études précédentes sont également récapitulés par l'ANDRA,²⁶⁴ en particulier pour des argiles gonflantes à des températures inférieures à 100 °C. Un des principaux aspects de l'approche utilisée dans les modèles du transport chimique des éléments (radioactifs et toxiques) est l'utilisation de l'équilibre thermodynamique, basée sur une hypothèse d'équilibre local. L'hypothèse est étayée par l'observation que les temps caractéristiques d'écoulement et de transport dans la formation callovo-oxfordienne sont lents. L'effort de sélection des valeurs de K_d pertinentes pour chaque condition de stockage est inhérent à cette approche. La base mécanistique de cette approche nécessitera un couplage de la connaissance de la spéciation chimique en solution et à l'interface liquide/solide en fonction de l'évolution des conditions environnementales.

On peut trouver des synthèses plus récentes sur les propriétés de ces argiles et matériaux associés à l'argile dans le document "Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement" un colloque organisé par l'ANDRA en 2002.²⁶⁵ Ce sujet a fait l'objet de beaucoup de collaborations européennes et internationales, par ex. le NEA Clay Club, le projet FEBEX au site de Grimsel, le projet SCK CEN OPHELIE, le Tunnel Sealing Experiment (TSX) dans laboratoire souterrain de recherches canadien, pour n'en citer que quelques uns. Il existe donc déjà un important corpus de connaissances qui peut servir de base pour l'évaluation de la sélection et de la performance des matériaux de remblayage, en particulier des argiles.

Recommandations :

1. *Il faudrait concevoir et mener à bien dans une galerie du laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne des essais avec de l'argile gonflante comme matériau de remblayage. Les essais à grande échelle devraient faire le suivi de l'évolution des contraintes, de la contrainte sur les composants des matériaux de remblayage, de la distribution de l'humidité, de la génération de gaz, de la température et du transport de l'eau à travers la barrière argileuse. Ces expériences nécessiteront une durée considérable, à l'échelle de nombreuses années, et devraient être lancées très tôt dans le projet.*
2. *Des essais de laboratoire et in situ devraient être développés et menés à bien pour tester les modèles de transport des radionucléides à travers la barrière d'argile. Ces essais devraient être étroitement associés à l'utilisation de modèles pour*

²⁶³ ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B et ANDRA BET 2002

²⁶⁴ ANDRA 2002-2005

²⁶⁵ ANDRA Reims 2002

- prédire les résultats des essais in-situ. Les phénomènes qui doivent particulièrement retenir l'attention sont 1) la diffusion et la sorption/désorption des espèces cationiques; 2) la diffusion et les réactions de sorption/désorption des espèces anioniques; 3) les effets de l'évolution des facteurs environnementaux (par exemple, la température, la composition de la solution, et les conditions redox) après la fermeture du site de stockage.
3. Toutes sortes de gaz peuvent être produits en association avec le combustible nucléaire usé et d'autres déchets très radioactifs. Les gaz sont issus de la corrosion du métal, de la radiolyse de l'eau et de la décroissance radioactive. La plus grande quantité de gaz produite sera l'hydrogène issu de la corrosion des colis métalliques sous conditions réductrices. *Il faudra concevoir et mener à bien des expériences pour évaluer les pressions qui peuvent être atteintes du fait de l'accumulation de gaz à proximité des colis de déchets.* La pression de rupture du gaz sera directement liée à l'imperméabilité du remblayage d'argile gonflante. Il faudra évaluer si les voies ouvertes persisteront assez longtemps pour permettre la migration des radionucléides.
 4. Par ses propriétés de réduction des taux de flux convectifs et de sorption sur des surfaces argileuses, l'argile gonflante est une barrière importante au transport des radionucléides. Mais peu d'attention a été accordée à la détermination de la spéciation des radionucléides au fur et à mesure qu'ils entrent en contact avec l'argile gonflante. On peut s'attendre qu'une partie de la rétention (par exemple, de l'uranium) soit causée par les réactions de coprécipitation ou par des réactions de réduction des radionucléides (par exemple, U(VI) et Tc(VII)) à des valences plus basses par des réactions de transfert de charges sur les surfaces des minerais contenant du Fe(II). La phase Fe(II) peut se présenter sous forme d'impuretés mineures dans l'argile gonflante. *Il faudrait mener des études approfondies pour déterminer le devenir des radionucléides clés en contact avec l'argile gonflante.*

4.6.3 Matériaux à base de ciment servant de barrière ouvragée

Il existe toutes sortes de types de ciments et de mortiers pour la fabrication des matériaux de structure, par exemple, pour les revêtements de galerie, et les structures de soutènement, etc. L'avantage potentiel de la présence de matériaux cimentaires est que ceux-ci peuvent créer un environnement alcalin qui réduit la solubilité de certains radionucléides et éléments toxiques. Ils peuvent également présenter des surfaces fortement réactives et par conséquent peuvent retarder le transport de l'espèce adsorbée. Cependant, les réactions avec les eaux interstitielles ou les argiles du milieu géologique entourant les matériaux cimentaires peuvent dégrader certaines propriétés de l'argile. L'ANDRA mène un certain nombre d'études expérimentales et d'efforts de modélisation destinés à décrire les effets des matériaux cimentaires sur la mobilité des radionucléides. L'ANDRA a également reconnu la difficulté de modéliser de tels systèmes géochimiques complexes et adopte une approche conservatrice pour leur évaluation de sûreté (par

exemple, elle considère que le processus de sorption est réversible, quand en fait beaucoup d'études expérimentales suggèrent qu'il ne l'est pas).

Recommandations :

1. *Il faudrait concevoir et mettre en place des essais à long terme pour évaluer les effets des interactions argile-ciment. Une partie de cette analyse peut être étayée par des études d'analogues sur des ciments et des mortiers anthropogènes, ainsi que par l'étude de quelques sites géologiques uniques où les équivalents naturels du béton se sont formés.²⁶⁶ Les résultats devraient être analysés dans le contexte de la très importante base de données déjà disponible pour des matériaux cimentaires, par exemple, la base de données de sorption de ciment.²⁶⁷*
2. Les eaux interstitielles alcalines du ciment, initialement dominées par les hydroxydes du sodium (Na)- et du potassium (K) quitteront par diffusion le matériau cimentaire pour aller dans le champ proche et réagiront avec des minéraux de l'argile avoisinante. Avec la poursuite de la réaction, l'hydroxyde de calcium peut dominer la composition en solution. Bien que des données soient fournies par l'Opalinus Clay Project²⁶⁸ avec des études sur les solutions alcalines en contact avec l'argile, il existe encore des anomalies entre les résultats modélisés pour la formation de phase secondaire et les expériences sur la colonne sédimentaire. On ne sait pas très bien si de telles réactions augmenteront ou diminueront la porosité dans l'argile. *Ces questions pourraient être résolues par une colonne soigneusement prévue et les expériences in-situ qui sont conçues pour fournir une connaissance détaillée de l'évolution des caractéristiques chimiques de l'eau interstitielle associée à la caractérisation des phases solides qui se forment en contact avec le ciment.*

4.6.4 ARGILE - La formation Callovo-Oxfordienne

L'horizon du laboratoire souterrain du site de Meuse/Haute-Marne est situé dans une formation callovo-oxfordienne vieille de 130 millions d'années. Une des raisons d'être du laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne est la caractérisation de cette formation et l'évaluation de son adéquation pour le stockage de déchets à haute activité. Du point de vue de la nature de cette formation comme barrière géologique, beaucoup de propriétés à plus grande échelle (par exemple l'ampleur de la zone endommagée, les réseaux de fractures, et l'hétérogénéité chimique/minéralogique) devront être étudiés (voir les chapitres 2 et 5 de ce rapport)

Cependant du point de vue des processus pertinents pour le champ proche, les questions les plus importantes sont les suivantes:

²⁶⁶ Miller et autres, 2000

²⁶⁷ Wieland et Van Loon, 2003

²⁶⁸ NAGRA, 2002

1. La composition des eaux souterraines qui rentreront en contact avec les conteneurs et les colis de déchets,
2. Le débit
3. Les paramètres géochimiques de température, pH et concentration en carbonates
4. La réponse thermique et la stabilité des minéraux, en particulier des argiles
5. L'évolution dans le temps de la porosité, et de la perméabilité de la formation argileuse en fonction de l'avancement de la réaction, de la température et du champ de rayonnement.

Bien que les propriétés de la formation du Callovo-Oxfordien aient déjà fait l'objet d'études approfondies, principalement à partir des carottages provenant de forages,²⁶⁹ l'exploration des propriétés de cette formation ne sont, par la force des choses, que dans la phase initiale. Il existe également une grande quantité de données disponibles provenant de la participation de l'ANDRA au projet du Mont Terri.²⁷⁰ Ce laboratoire souterrain se situe dans et le long de la galerie de reconnaissance du tunnel routier du Mont Terri dans le Jura plissé dans le nord ouest de la Suisse. Ce tunnel traverse la formation Opalinus Clay (sur une distance d'environ 240 mètres). Ce projet a fourni des informations détaillées sur les propriétés hydrogéologiques, géochimiques et mécaniques des argiles, semblables à celles du laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne.²⁷¹ Cette collaboration internationale a développé les techniques et stratégies nécessaires pour caractériser et évaluer l'adéquation d'une formation argileuse pour le stockage de déchets à haute activité. Tout aussi importante, l'analyse de l'état des connaissances actuel de la formation Opalinus Clay a été menée en référence au processus de développement d'un scénario de sûreté pour la performance à long terme d'un stockage.²⁷² Johnson et autres identifient très clairement les principaux éléments d'une bonne performance du point de vue des interactions entre le terme source et le champ proche pour la performance à long terme d'un stockage dans des formations argileuses :

1. Un milieu géochimique du champ proche qui conduit à la stabilité sur le long terme des barrières ouvragées,
2. Un tampon grâce à l'argile gonflante qui fournit un environnement géochimique favorable pour les colis de déchets ainsi qu'une barrière pour le transport des radionucléides
3. Des formes de déchets stables dans le milieu géochimique
4. Des conteneurs de déchets résistants à la corrosion et qui permettent le confinement total pour une période de temps considérable (10 000 ans pour le combustible usé et les conteneurs vitrifiés de déchet à haute activité).²⁷³

Ils ont aussi identifié un certain nombre de cas, de scénarios altérés, qui peuvent influencer la performance du site de stockage - comme par exemple, le relâchement de

²⁶⁹ Gaucher et autres, 2002; Mosser-Ruck et autres, 2002 ; Lavastre et autres, 2002

²⁷⁰ Thury et Bossart, 1999; Heitzmann et Bossart, 2002a et 2002b

²⁷¹ Heitzmann et Bossart, 2002a et 2002b

²⁷² Johnson et autres 2004; NAGRA, 2002

²⁷³ Johnson et autres 2004

carbone 14 gazeux le long de fractures de la roche hôte ou à travers des puits du site de stockage ou d'un accroissement des débits à la suite d'un changement climatique.

Le SCK/CEN en Belgique a également produit une quantité importante de données sur les propriétés de l'argile de Boom et ses interactions avec des déchets de haute activité.²⁷⁴ Le concept actuel d'un site de stockage dans l'argile de Boom partage de nombreux aspects avec ceux de la stratégie française : la présence de béton, un remblayage d'argile gonflante, la mise en place de déchets à moyenne activité avec des déchets vitrifiés de haute activité et de combustible usé. Les résultats obtenus jusqu'ici offrent une référence utile pour les besoins des futurs programmes expérimentaux. Ceux-ci portent sur : le rôle des anions (Cl^- et Si_2O_3^- par exemple) dans la corrosion des colis de déchets; l'effet des interactions ciment-argile sur la composition de l'eau et les propriétés chimiques de l'argile ; les effets de l'oxydation de l'argile durant la phase de construction et d'exploitation du site de stockage géologique.

Recommandations:

1. Malgré l'existence d'un considérable corpus de connaissances recueilli à partir des échantillons de carottage au laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne et de laboratoires souterrains caractérisés par une géologie similaire, comme c'est le cas pour le Mont Terri, des études traitant tout spécialement des propriétés de la formation callovo-oxfordienne doivent être menées à bien. Une présentation plus détaillée de l'ampleur et de la nature des investigations à mener à bien dépasse le cadre du mandat de cette revue, cependant le projet du Mont Terri est un bon exemple d'une investigation judicieuse. Les études menées sur d'autres sites, comme par exemple le Mont Terri, offrent des indications inestimables pour comprendre les processus critiques qui doivent être examinés. Ces études permettent de choisir les techniques et les technologies adaptées qui doivent être développées pour pouvoir faire les mesures pertinentes. Néanmoins, il faut s'attendre à ce que les caractéristiques spécifiques au site de Meuse/Haute-Marne soient d'une importance critique pour une bonne analyse de sûreté. Les informations obtenues au Mont Terri ne peuvent pas servir simplement de données pour l'analyse de sûreté portant sur le site de Meuse/Haute-Marne. Une raison majeure pour développer le laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne tient à l'opportunité de faire les études et les déterminations nécessaires spécifiques au site. *Il faudra développer, critiquer et mener à bien un programme complet d'essais de caractérisation in situ avant de pouvoir faire une bonne évaluation du programme de recherche sur le site de Bure.*
2. En se fondant sur l'expérience obtenue par les études sur l'argile de Boom, un certain nombre de déterminations in situ doivent être faites dans le laboratoire de Meuse/Haute-Marne:
 - Une caractérisation détaillée de l'argile : texture/dimension du grain; minéralogie ; nature et quantité de matière organique ; compositions isotopiques stables et radiogéniques

²⁷⁴ Cachoir et autres, 2003; Van Iseghem et autres, 2004

- Prélèvement et caractérisation détaillée des eaux interstitielles : matière organique dissoute ; chimie, tout particulièrement de la teneur en carbonates ; compositions isotopiques stables et radiogéniques ; paramètres géochimiques (Eh, pH, concentration ionique, alcalinité).
- La caractérisation détaillée de l'argile et de la composition des eaux interstitielles devrait être associée à une modélisation géochimique détaillée de la composition de l'eau – ceci comme point de départ pour la modélisation du transport résultant de l'interaction entre l'eau et les déchets.
- Des expérimentations in situ devraient être conçues pour étudier les mécanismes qui régissent la mobilité des radionucléides dans le champ proche (par exemple, les limites de solubilité, les réactions de complexation, la formation de colloïdes, la sorption et la filtration)
- Ces mécanismes devraient être représentés par des modèles conceptuels qui seront utilisés dans l'évaluation de sûreté, et ces modèles devraient être testés par des essais in situ.

4.7 Sources d'incertitudes

Dans l'analyse finale, presque toutes les incertitudes dans la performance du terme source et des barrières du champ proche seront contrôlées par les incertitudes des conditions géochimiques qui évolueront au cours du temps. Pour un environnement de stockage dans l'argile, Van Iseghen et autres ont présenté une bonne synthèse de ces incertitudes en se fondant sur leurs travaux dans l'argile de Boom en Belgique:

- l'évolution de la géochimie du champ proche en fonction du temps
- l'effet de la température sur la géochimie dans le champ proche
- l'hétérogénéité de la formation argileuse en terme de minéralogie, chimie et composition des eaux interstitielles
- l'identification du principe des mécanismes de réaction (réduction/précipitation par opposition à la sorption) pour la rétention des actinides polyvalents.
- L'effet du panache alcalin qui pourrait se développer à partir du béton dans le site de stockage.

La stabilité de la matière organique dans l'argile et les eaux interstitielles.²⁷⁵

Il ne semble pas que l'ANDRA ait pour le moment développé, dans son analyse, une approche mathématique ou même conceptuelle de la caractérisation et de la quantification des incertitudes. Tous les programmes expérimentaux in situ et de laboratoire devraient avoir comme priorité de générer des données qui réduisent les incertitudes dans les processus décrits plus haut. Mais cet exercice fait appel à une

²⁷⁵ Van Iseghen et autres, 2004

connaissance précise des sources d'incertitude et une détermination de la nature des incertitudes qui peuvent être réduites par des connaissances supplémentaires. Dans certains cas, un supplément de connaissances peut entraîner des valeurs d'incertitudes plus élevées que celles des estimations initiales (par exemple si l'on découvre que la formation argileuse est plus hétérogène qu'initialement prévu). Pour cette raison, l'expérience des autres programmes nationaux peut être un guide important sur la façon d'aborder ce difficile problème.²⁷⁶

²⁷⁶ Voir par exemple Helton et Davis, 2000 ou Andersson et Grundteknik, 1999

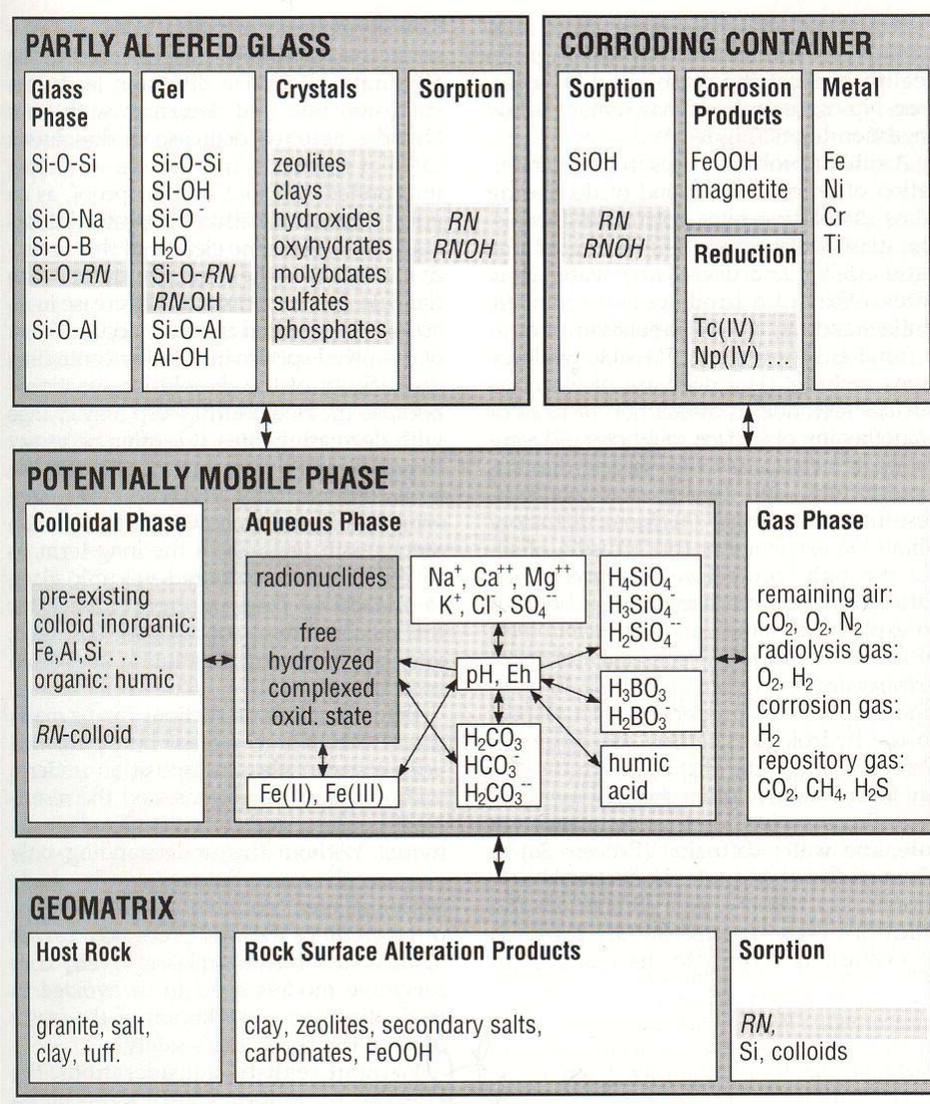


Figure 4-1. Représentation schématique des réactions qui contrôlent le relâchement et la mobilité des radionucléides résultant de l'altération du verre. Les phases contenant des radionucléides se situent dans les ombrées. D'après Grambow (1994) Figure 1, p.21. Reproduite avec la permission de MRS Bulletin. Voir le site web à <http://www.mrs.org/publications/bulletin>.

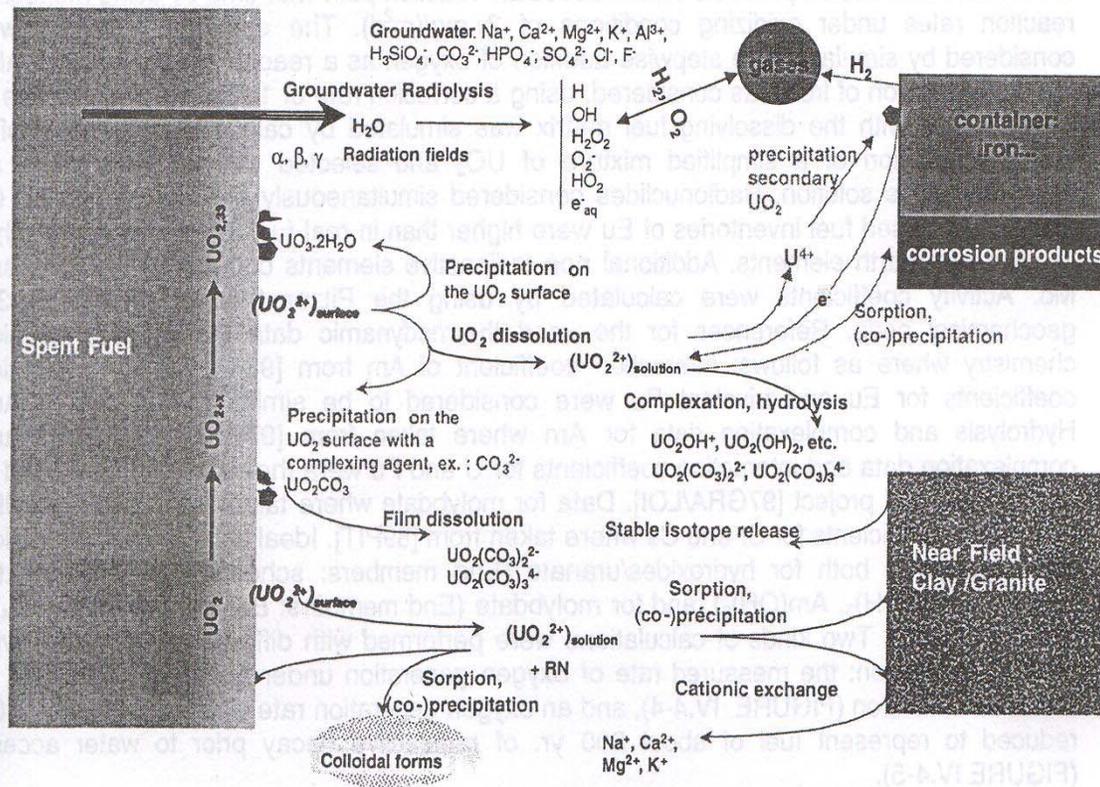


FIGURE IV.4-2. Spent fuel alteration mechanisms and mechanisms controlling radionuclide concentration in solution in presence of environmental materials

Figure 4-2. Représentation schématique des mécanismes de l'altération et de la corrosion du combustible usé en présence des matériaux du champ proche, tels que l'argile et les produits de corrosion du fer. D'après Grambow (2000), Figure IV.4-2). Reproduite avec la permission de la Communauté européenne.

4.8 References

Andersson et Grundteknik, 1999	J. Andersson and G. Grundteknik (1999) SR 97 Data and data uncertainties. SKB Technical Rept. TR-99-09, 138 page.
ANDRA Referentiel Materiaux Tome 1, 2001	ANDRA (2001) Referentiel Materiaux, Tome 1, Contexte et object. C.RP.AMAT.01.060. Novembre.
ANDRA Referentiel Materiaux Tome 2, 2001	ANDRA (2001) Referentiel Materiaux, Tome 2, Les matériaux argileux. C.RP.AMAT.01.060. Novembre.
ANDRA Referentiel Materiaux Tome 3, 2001	ANDRA (2001) Referentiel Materiaux, Tome 3, Les matériaux cimentaires. C.RP.AMAT.01.060. Novembre.
ANDRA Referentiel Materiaux Tome 4, 2001	ANDRA (2001) Referentiel Materiaux, Tome 4, La corrosion des matériaux métalliques. C.RP.AMAT.01.060. Novembre.
ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B LOIS CHECK	ANDRA (2001) Dossier 2001 Argile, Synthesis Report, Part B, Supporting Scientific and Technical Data, 332 pages.
ANDRA Reims 2002	ANDRA (2002) <i>Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement</i> , International Meeting, Reims, December 9-12, Abstracts, ANDRA, Châtenay-Malabry, France.
ANDRA 2002-2005	ANDRA (2002) “Scientific Programme HLLW Clay Repository Project 2002-2005” C PE ADS 02-039, 131 pages. French title: Projet HAVL-Argile Programme Scientifique 2002-2005
ANDRA BET 2002	ANDRA (2002) Bilan des Études et Travaux. Les Colis Chapter 1.
ANDRA BET 2002 Synthesis	ANDRA (2002) Synthesis: Report on Studies and Activities, research on the disposal of high-level long-lived radioactive waste, 79 pages.
Advocat et al. 2001	T. Advocat, P. Jollivet, J.L. Crovisier, M. del Nero (2001) Long-term alteration mechanisms in water for SON68 radioactive borosilicate glass. <i>Journal of Nuclear Materials</i> , vol. 298, 55-62.
Bethke, 1996	Bethke, C.M. (1996) <i>Geochemical Reaction Modeling – Concepts and Applications</i> . Oxford University Press, New York, 397 pages.
Cachoir et al., 2003	C. Cachoir, K. Lemmens, S. Van den Berghe, P. Van Iseghem (2003) UO ₂ dissolution in Boom Clay conditions. <i>Journal of Nuclear Materials</i> , vol. 321, 49-59.
Crovisier et al. 2003	J.-L. Crovisier, T. Advocat, J.-L. Dussossoy (2003) Nature and role of natural alteration gels formed on the surface of ancient volcanic glasses (Natural analogs of waste containment glasses). <i>Journal of Nuclear Materials</i> , vol. 321, 91-109.
Curti, 2003	E. Curti (2003) Glass dissolution parameters: Update for “Entsorgungsnachweis”, Paul Scherrer Institut Report, PSI Bericht. Nr. 03-

	18, 46 pages.
Ewing, 1992	R.C. Ewing (1992) Editor, Thematic issue on Nuclear Waste, Journal of Nuclear Materials, vol. 190, 348 pages.
Gaucher et al., 2002	E. Gaucher, C. Robelin, J.M. Matray, G. Négrel, A. Vinsot, H. Rebours, A. Cassagnabère, A. Bouchet (2002) ANDRA underground research laboratory: Interpretation of the mineralogical & geochemical data acquired in the Callovian-oxfordian formation by investigation drillings. IN <i>Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement</i> , International Meeting, Reims, December 9-12, Abstracts, ANDRA, Châtenay-Malabry, France , pp. 235-236.
Gin et al., 2001	S. Gin, P. Jollivet, J.P. Mestre, M. Jullien, C. Pozo (2001) French SON 68 nuclear glass alteration mechanisms on contact with clay media. Applied Geochemistry, vol. 16, 861-881.
Godon, 2002	N. Godon (2002) Reference Document: Long Term Behavior of Nuclear Waste Glass, ISC – May, 2002, CEA, Technical Report DIEC/2002/02, 111 pages.
Grambow, 1994	B. Grambow (1994) Borosilicate glass: Future research requirements or “What We Don’t Know”, MRS Bulletin, v.19, no. 12, 20-23.
Grambow, 1998	B. Grambow (1998) Source terms for performance assessment of HLW-glass and spent fuel as waste forms. I.G. McKinly and C. McCombie (Eds.) Materials Research Society Proceedings, vol. 506, 141-152.
Grambow, 2000	B. Grambow (2000) Corrosion of Glass, in Uhlig’s Corrosion Handbook, 2 nd Ed., R. Winston Revie (Ed.), John Wiley & Sons, Inc., Chapter 24, 411-437.
Grambow et Müller, 2001	B. Grambow et R. Müller (2001) First-order dissolution rate law and the role of surface layers in glass performance assessment. Journal of Nuclear Materials, vol. 298, 112-124.
Grambow et al., 2000	B. Grambow, A. Loida, A. Martínez-Esparza, P. Díaz-Arocas, J. de Pablo, J.L. Paul, G. Marx, J.-P. Glatz, K. Lemmens, K. Ollila, H. Christensen (2000) Source term performance assessment of spent fuel as a waste form. Final report. Nuclear science and technology. European Commission Report EUR 19140. Luxembourg: European Commission, Directorate-General for Research, 355 pages.
Hedin, 1997	Allan Hedin (1997) Spent nuclear fuel – how dangerous is it?, SKB Technical Report 97-13, 60 pages.
Helton et Davis, 2000	J.C. Helton and F.J. Davis (2000) Sampling-Based Methods for Uncertainty and Sensitivity Analysis. Sandia Report, SAND99-2240, 101 pages.
Heitzmann et Bossart,	P. Heitzmann and P. Bossart (2002) The Mont Terri Project – experiments on Opalinus Clay in an international rock laboratory. IN <i>Clays in Natural</i>

2002a	<i>and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement</i> , International Meeting, Reims, December 9-12, Abstracts, ANDRA, Châtenay-Malabry, France, pp. 107-108.
Heitzmann et Bossart, 2002b	P. Heitzmann and P. Bossart (2002) Programme Overview and Work Programme of Phase 8 (July 2002-June 2003). At head of title: International Research Project in the Mont Terri Rock Laboratory for the Hydrogeological, Geochemical and Geotechnical Characterisation of an Argillaceous Formation (Opalinus Clay). Saint-Ursanne, Switzerland: Geotechnical Institute, 22 November 2002. 57 pp.
Jain et al., 2004	V. Jain, G. Cragolino, L. Howard (2004) A review report on high burnup spent nuclear fuel – disposal issues. Center for Nuclear Waste Regulatory Analyses, CNWRA Report 2004-08,
Janeczek et al., 1996	J. Janeczek, R.C. Ewing, V.M. Oversby and L.O. Werme (1996) Uraninite and UO ₂ in spent nuclear fuel: A comparison. <i>Journal of Nuclear Materials</i> , vol. 238, 121-130.
Johnson et al., 2004	L.H. Johnson, J.W. Schneider, P. Zuidema, P. Gribi, G. Mayer, P.A. Smith (2004) Project Opalinus Clay (Entsorgungsnachweis) – Illustrating the safety and robustness of the proposed disposal system for SF, HLW and Long-lived ILW. IN Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII, Symposium held June 15-19, 2003, Kalmar, Sweden; editors: V.M Oversby, L.O. Werme. <i>Materials Research Society Proceedings</i> , vol. 807, 899-904.
Jollivet et al., 2000	P. Jollivet, Yves Minet, M. Nicolas, É. Vernaz (2000) Simulated alteration tests on non-radioactive SON 68 nuclear glass in the presence of corrosion products and environmental materials. <i>Journal of Nuclear Materials</i> , vol. 281, 231-243.
Lavastre et al., 2002	V. Lavastre, M. Javoy, N. Jendrzewski, D. Rouseet, N. Clauer (2002) Sedimentary history and diagenetic/post-diagenetic events in Callovo-Oxfordian clay-rock (Paris Basin, France): the stable isotopes record of minerals and pore water. IN <i>Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement</i> , International Meeting, Reims, December 9-12, Abstracts, ANDRA, Châtenay-Malabry, France , pp. 457-458.
Lutze et Ewing, 1988	W. Lutze and R.C. Ewing, Editors, (1988) <i>Radioactive Waste Forms for the Future</i> . North-Holland, Amsterdam, 778 pages.
Miller et al., 2000	W. Miller, R. Alexander, N.A. Chapman, I.G. McKinley and J. Smellie (2000) Geological disposal of radioactive waste and natural analogues: lessons from nature and archaeology. <i>Waste management Series 2</i> . Pergamon, Amsterdam.
Mosser-Ruck et al., 2002	R. Mosser-Ruck, V. Hualult, M. Elie (2002) Clay mineralogy changes at the Callovian-Oxfordian boundary of the Paris Basin: a signal for paleo-environmental modifications? IN <i>Clays in Natural and Engineered</i>

	<i>Barriers for Radioactive Waste Confinement</i> , International Meeting, Reims, December 9-12, Abstracts, ANDRA, Châtenay-Malabry, France, pp. 237-238.
NAGRA, 2002	NAGRA (2002) Project Opalinus Clay – Safety Report. Technical Report 02-05, 360 pages + appendices.
Nordstrom, 2004	Nordstrom, D.K. (2004) Modeling Low-temperature Geochemical Processes, in <i>Treatise of Geochemistry</i> , H.D. Holland and K.K. Turekian (Ex. Editors): vol 5. Surface and Ground Water, Weathering, and Soils, J.I. Drever, ed. Elsevier Pergamon, Amsterdam, 37-72.
Oversby, 1994	V.M. Oversby (1994) Nuclear Waste Materials, in <i>Materials Science and Technology</i> (Eds, R.W. Cahn, P. Haasen and E.J. Kramer) Chapter 12, Vol. 10B, 391-442.
OECD-NEA 2003	OECD (2003) The French R&D Programme on Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: An International Peer Review of the “Dossier 2001 Argile”, Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-Operation and Development, 76 pages. Also issued as: Programme français de R-D sur le stockage géologique de déchets radioactifs: Revue internationale par des pairs du Dossier 2001 Argile. On the Web at http://www.nea.fr/html/rwm/reports/2003/nea4432-andraeng.pdf or http://www.nea.fr/html/rwm/reports/2003/nea4588-andrafr.pdf
Poinsot et al., 2001	C. Poinsot, 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, M. Masson (2001) Synthesis on the Long-Term Behavior of the Spent Nuclear Fuel, CEA Rept. CEA-R-5958(E), vols. I and II, 616 pages.
Poinsot et al., 2004	C. Poinsot, P. Lovera, C. Ferry (2004) Radionuclides release model for for performance assessment studies of spent nuclear fuel in geological disposal. <i>Mat. Res. Soc. Symp. Proc.</i> , vol. 824, 71-79.
Raynal, 1989	M. Raynal (1989) Status of research on geological disposal for high level radioactive waste in France. In P.A. Witherspoon (Ed.) <i>Geological Problems in Radioactive Waste isolation: The Second World Wide Review</i> . Proceedings of workshop during the 28 th International Geological Congress, Washington, D.C., July 9-19, 1989.
Sagüés, 2002	A.A. Sagüés (2002) Corrosion performance projection of Yucca Mountain waste packages. <i>Mat. Res. Soc. Symp. Proc.</i> , vol. 713, 17-27.
Shoesmith et al., 2003	D.W. Shoesmith, M. Kolar, F. King (2003) A mixed-potential model to predict fuel (uranium dioxide) corrosion within a failed nuclear waste container. <i>Corrosion</i> , vol. 50, no. 9, 802-816.
Thury et Bossart, 1999	M. Thury and P. Bossart (1999) Mont Terri Rock Laboratory: results of the hydrogeological, geochemical and geotechnical experiments performed in 1996 and 1997. <i>Geologische Berichte Nr. 23</i> . Bern: Landeshydrologie und

	–geologie.
Valcke et Van Iseghem, 1999	E. Valcke and P. Van Iseghem (1999) CORALUS: an integrated in-situ corrosion test on alpha-active glass. Proceedings of the EURADWASTE conference, Luxemburg.
Van Iseghem, 2001	P. Van Iseghem, Editor, (2001) Glass in its Disposal Environment – Proceedings of the International Topical Workshop on Glass in its Disposal Environment. Journal of Nuclear Materials, vol. 298, 209 pages.
Van Iseghem, 2004	P. Van Iseghem (2004) GLAMOR – A critical evaluation of the dissolution mechanisms of high-level waste glasses in conditions of relevance for geological disposal. Proceedings of the Materials Research Society symposium on “Scientific Basis for Nuclear Waste Management”, April 13-16, 2004, San Francisco, Ca.
Van Iseghem et al., 2001	P. Van Iseghem, E. Valcke, A. Lodding (2001) In situ testing of the chemical durability of vitrified high-level waste in a Boom Clay formation in Belgium: discussion of recent data and concept of a new test. Journal of Nuclear Materials, vol. 298, 86-94.
Van Iseghem et al., 2004	P. Van Iseghem, N. Maes, M. Van Geet, L. Wang, M. De Craen, H. Moors, P. De Canniere, D. Jacques, K. Lemmens, C. Cachoir, S. Salah (2004) The role of geochemistry in the research on geological disposal of high-level radioactive waste in a deep Boom clay in Belgium. Geochimica et Cosmochimica Acta, vol. 68(11) pp. A112, Suppl. S.
Vernaz et al., 2001	E. Vernaz, S. Gin, C. Jégou, I. Ribet (2001) Present understanding of R7T7 glass alteration kinetics and their impact on long-term behavior modeling. Journal of Nuclear Materials, vol. 298, 27-36.
Vernaz et Gin, 2001	E. Vernaz and S. Gin (2001) Apparent solubility limit of nuclear glass, K. Hart and G.R. Lumpkin (Eds.) Materials Research Society Proceedings, vol. 663, 217-225.
Wieland et Van Loon, 2003	E. Wieland, L.R. Van Loon (2003) Cementitious Near-Field Sorption Data Base for Performance Assessment of an ILW Repository in Opalinus Clay. PSI Bericht Nr. 03-06, 64 pages.

Chapitre 5 : Hydrogéologie

Detlef Appel

Conclusions principales

1. Dans son modèle conceptuel pour le site de Bure, l'ANDRA fait l'hypothèse d'un transport par diffusion et non pas par convection, à travers les roches argileuses du Callovo-Oxfordien. La faible perméabilité générale de roche hôte vient à l'appui de cette hypothèse.
2. Une recherche minutieuse des fractures de faible taille à l'intérieur de la roche hôte et des fractures importantes avec un faible rejet vertical, qui sont difficiles à détecter, n'a pas encore été effectuée. La présence et l'importance hydraulique de ces fractures ne peut être exclue tant que des recherches plus précises n'ont pas été achevées. De telles fractures pourraient affecter directement la conductivité hydraulique et peuvent être reliées à l'EDZ.
3. Le Dossier 2001 Argile fournit des estimations préliminaires de dose pour trois emplacements : Meuse (Dogger), Marne-Rognon (Oxfordien), et Tithonien. Le programme de recherche visant à déterminer si les paramètres utilisés pour l'évaluation préliminaire de performance sont conservateurs, comme cela est affirmé, doit être achevé avant qu'un jugement scientifiquement fiable puisse être émis sur son caractère conservateur.
4. Quand les solutés atteignent l'interface entre le Callovo-Oxfordien et les formations sous et sus-jacentes, le transport des eaux souterraines par convection deviendra le mécanisme à considérer. Ce transport sera essentiellement parallèle à la stratification des formations calcaires et sera dirigé, depuis l'emplacement de l'arrivée par diffusion des solutés, vers des exutoires de la formation aquifère ou vers des lieux où les eaux souterraines peuvent être exploitées.
5. A ce jour, l'ANDRA exclut une contribution convective significative au transport des solutés dans le Callovo-Oxfordien, qu'il soit parallèle ou perpendiculaire à la stratification. Un transport de cette nature aurait probablement comme conséquence une vitesse de transport plus élevée, donc un temps de transport plus court du site de stockage aux aquifères sus- et sous-jacents que si la diffusion seule est prise en compte. Par conséquent, ceci influencerait significativement le programme de recherche. Des recherches supplémentaires considérables sont nécessaires pour exclure le transport par convection.
6. Selon les données disponibles, la méthodologie et la technique de l'ANDRA pour ses recherches hydrogéologiques présentent un niveau technique élevé et ces recherches sont effectuées en fonction des dernières connaissances dans le domaine.
7. Le modèle conceptuel de l'ANDRA postulant le transport diffusif des solutés à travers le Callovo-Oxfordien et le transport par convection dans les sédiments sus- et sous-

jacents est plausible. Cependant, la démonstration actuelle de la migration diffusive n'est pas définitive. Les hétérogénéités ou les discontinuités de différents types et dimensions posent un problème majeur, parce qu'elles peuvent augmenter localement la conductivité hydraulique et réduire le développement spatial de la "zone homogène de faible perméabilité". La corrélation entre la composition de la roche, les propriétés mécaniques et la perméabilité en laboratoire et in situ n'a pas été encore suffisamment démontrée.

Principales recommandations

1. L'ANDRA devrait démontrer la corrélation entre les paramètres pétrographiques/géomécaniques et la perméabilité sur la base des mesures in situ des paramètres hydrauliques et en lien avec leur signification spatiale.
2. L'ANDRA devrait identifier des indicateurs complémentaires pour la migration essentiellement diffusive des solutés dans le Callovo-Oxfordien. La résolution de surface des résultats doit permettre la détection ou l'exclusion au moins des principales zones d'écoulement vertical à travers le Callovo-Oxfordien.
3. L'utilisation de méthodes géochimiques ou hydrochimiques basées sur les gaz ou de méthodes isotopiques pour estimer le flux vertical des indicateurs gazeux et/ou pour identifier n'importe quel modèle significatif d'écoulement à travers le Callovo-Oxfordien devrait être démontrée en ce qui concerne leur applicabilité dans la zone de Meuse/Haute-Marne.
4. Des données de perméabilité in-situ pour différentes zones géomécaniques du Callovo-Oxfordien présentant une teneur accrue en carbonates, ainsi que pour des interfaces entre des sections avec différentes teneurs en carbonates, qui peuvent présenter une perméabilité plus importante, doivent faire l'objet d'investigations in situ et en laboratoire.
5. La distance "normale" entre les fractures verticales dans le Callovo-Oxfordien gêne leur identification dans les forages verticaux. Le petit nombre de fractures identifiées jusqu'ici, n'exclut pas l'existence de fractures hydrauliquement significatives. Elles sont ou seront recherchées hydrauliquement dans les forages déviés sur le site. Il serait souhaitable d'utiliser des forages horizontaux à partir du laboratoire souterrain pour les recherches in situ sur la perméabilité des différents types d'hétérogénéités au sein de la matrice rocheuse.
(Voir Chapitre 2.)
6. En raison de la faible représentativité spatiale des données hydrauliques in situ, il ne sera probablement pas possible d'exclure complètement l'existence de fractures dans la zone équivalente de transposition. Du fait des incertitudes qui persistent, il faut faire l'hypothèse prudente que des fractures d'une échelle indétectable, importantes pour l'hydraulique, peuvent exister. Des hypothèses devraient être formulées au sujet de leurs

propriétés hydrauliques, dimension et distances pour évaluer leur importance pour le mouvement vertical d'eaux souterraines au moyen de modèles conceptuels.

7. Il semble difficile de décrire exactement les directions de l'écoulement des eaux souterraines dans les parties nord-ouest de la zone équivalente de transposition. Il est recommandé de procéder à au moins un forage profond dans cette zone ou à l'extérieur de la zone équivalente de transposition.

8. La caractérisation hydrogéologique des zones situées entre le site de stockage et les éventuelles zones des exutoires des eaux souterraines pouvant être employées pour des calculs de dose, devrait être effectuée de façon suffisamment approfondie pour permettre l'identification des différentes voies éventuelles de transport des radionucléides, ainsi que la validation des modèles de transport et des estimations de dose faites dans le cadre de divers scénarios.

9. L'influence potentielle du Karst dans les calcaires du Dogger et de l'Oxfordien sur la direction et la vitesse de l'écoulement des eaux souterraines et l'éventuel transport des radionucléides dans ces formations devrait être étudiée de façon approfondie. Ceci devrait comporter un examen explicite de l'éventuel développement de karst dans différents scénarios de changements climatiques et géomorphologiques (notamment des scénarios relatifs à un réchauffement climatique induit par les activités humaines).

5.1 Introduction

Le laboratoire souterrain de recherches du site de Bure sera situé à une profondeur d'environ 500 m dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien. Il se situe donc dans une zone de roche saturée par les eaux souterraines. Par conséquent, les eaux souterraines doivent être considérées comme le milieu le plus important pour le transport potentiel des radionucléides du site de stockage à la biosphère.

La circulation des eaux souterraines et le transport des solutés sont des sujets d'hydrogéologie. L'hydrogéologie est la branche de la géologie appliquée qui traite de l'écoulement des eaux souterraines au travers des roches et de leur interaction avec celles-ci. En ce qui concerne le stockage ultime des déchets radioactifs dans des formations géologiques profondes, l'hydrogéologie – au sens étroit du terme – se consacre aux aspects géologiques qui sont pertinents pour le transport (potentiel) des constituants des déchets dissous dans les eaux souterraines du site de stockage (prévu), depuis la barrière géologique jusqu'à la biosphère. Cependant, l'écoulement des eaux souterraines dépend non seulement de la géologie locale et régionale mais également des facteurs climatologiques et morphologiques qui déterminent la recharge et la décharge des eaux souterraines et la distribution des charges hydrauliques.

La zone d'intérêt majeure pour la construction d'un laboratoire souterrain de recherches et, tout particulièrement, d'un site potentiel de stockage, est désignée sous le nom de zone équivalente de transposition²⁷⁷. Dans cette zone, l'ANDRA s'attend à une situation géologique équivalente permettant la transposition (l'extrapolation) des résultats obtenus en laboratoire à l'éventuel site de stockage. Cette zone, située au nord des puits d'accès du laboratoire prévu, est définie du point de vue des propriétés géologiques²⁷⁸ : épaisseur minimum du Callovo-Oxfordien argileux (130 m), structure tectonique (absence de failles majeures), faciès lithologique (indiquant une faible perméabilité) et profondeur maximale (en fait 600 m). La zone est limitée par un système de failles et de graben à l'ouest, à l'est et au sud du site (fossé de la Marne, fossé de Gondrecourt et des failles secondaires) et la flexure d'Aulnois en Perthois au nord²⁷⁹.

Cependant, puisque l'hydrogéologie spécifique à un site de stockage a aussi des aspects régionaux, une compréhension suffisante de l'hydrogéologie de la zone équivalente de transposition ne sera pas possible sans une connaissance de la situation régionale. Notre évaluation du programme de recherche hydrogéologique de l'ANDRA prendra en compte ces différentes échelles.

Pour évaluer l'aptitude d'un site spécifique au stockage, l'une des premières et des plus importantes questions hydrogéologiques à se poser vise à savoir si le transport des solutés dans les eaux souterraines : est de type diffusif et/ou convectif. Lorsqu'on fait l'hypothèse d'un transport convectif, la vitesse et la direction de ces transports ou même des voies de transport individuelles entre le site de stockage et la biosphère sont identifiées et évaluées. Il est essentiel de comprendre tous les processus influençant la concentration des solutés pendant leur transport pour parvenir à une compréhension qui permettra de prendre une décision rigoureuse sur la faisabilité du site. Pour certains constituants des déchets, il faudra intégrer le transport sous une forme colloïdale, même si ce processus est d'une importance mineure dans des roches argileuses du type de celles de Bure.

Les réponses à ces questions relatives à l'aptitude d'un site particulier à accueillir des déchets radioactifs doivent être basées sur une connaissance suffisante des processus et demande une acquisition complète et une interprétation parfaite des données dans les domaines suivants :

- Les propriétés hydrauliques de la formation hôte et des couches hydrogéologiques sus- et sous- jacentes pertinentes pour l'évaluation de la diffusion et du transport potentiel des radionucléides à une échelle locale et régionale. Pour le site de Bure, ces couches sont la roche hôte argileuse du Callovo-Oxfordien, les calcaires du Dogger immédiatement en dessous, les calcaires de l'Oxfordien immédiatement au-dessus et les marnes du Kimméridgien, au dessus de l'Oxfordien.

²⁷⁷ ANDRA Référentiel Géologique Tome 5, 2001, chapitre IV, Figure 4.4-01; ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A, chapitre VI.1.2.9

²⁷⁸ ANDRA Référentiel Géologique Tome 5, 2001, Fig. 4.4-01

²⁷⁹ ANDRA Référentiel Géologique Tome 3, 2001, Fig. 2.3-01

- L'extension, la forme et la configuration géométrique de ces couches et d'autres au sein de la barrière géologique.
- Les caractéristiques d'écoulement des eaux souterraines locales et régionales dans les formations concernées déterminées par le bilan hydrologique climatique, la morphologie, la répartition des zones de recharge et de décharge des eaux souterraines et les différences de charges hydrauliques (ou pressions de l'eau) entre des formations.
- La situation hydrochimique (y compris les isotopes environnementaux) dans la formation hôte et les formations encaissantes indiquant l'état d'équilibre entre les solides et les solutés et fournissant les informations pertinentes pour évaluer le temps de séjour des eaux souterraines dans la couche hôte et la durée d'un transport potentiel de radionucléides d'un site de stockage à la biosphère.

Les propriétés hydrauliques importantes de la roche sont étroitement liées aux autres propriétés de la roche et même en dépendent, tout particulièrement les caractéristiques géomécaniques qui, elles-mêmes, résultent de la composition minéralogique ainsi que de la texture et la structure des roches. Ces propriétés pétrographiques "primaires" sont régulées par les conditions de formation et par la suite ont été modifiées par des influences diagénétiques et épigénétiques, telles que la cimentation des pores, la charge thermique ou la contrainte tectonique. Certaines propriétés et caractéristiques "primaires" acquises lors des processus ultérieurs sont des indicateurs importants des propriétés hydrauliques et de rétention des formations hydrogéologiques, parce qu'elles sont beaucoup plus faciles à obtenir que les propriétés hydrauliques indispensables. Ces aspects doivent faire partie du concept des recherches de l'ANDRA pour le laboratoire souterrain du site de Bure.

L'interprétation des données acquises pour décrire et évaluer la faisabilité d'un site de stockage doit se fonder sur des modèles conceptuels dérivés de la compréhension générale des processus de transport (et des processus associés) entrant en jeu et des informations spécifiques au site considéré. Ces modèles doivent continuer à être développés au fur et à mesure de l'augmentation du nombre et de la qualité des données spécifiques au site. L'évaluation finale du site vis-à-vis des conséquences radiologiques est généralement effectuée sur la base des calculs numériques du transport des radionucléides. Tous les modèles conceptuels et tous les modèles mathématiques doivent être validés du point de vue de leur exactitude et/ou leur caractère pessimiste, autant que cela est possible en fonction des longues périodes de temps qui doivent être prises en compte pour le stockage ultime des déchets radioactifs.

5.2 Exigences hydrogéologiques de la Règle fondamentale III.2.f

La Règle fondamentale III.2.f sur le stockage ultime des déchets radioactifs dans des formations géologiques profondes comporte les critères fondamentaux de radioprotection²⁸⁰, qui doivent être respectés pour un site de stockage de déchets radioactifs. Parmi ces critères de radioprotection figure la limite de dose de 0,25 mSv par

²⁸⁰ Règle N° III.2.f, section 3.2

an déjà abordée dans le Chapitre 1. La limite de dose peut être comprise comme un critère qui fait partie intégrante de l'évaluation de l'adéquation d'un site de stockage et/ou d'évaluation de la performance d'une installation de stockage. En outre, la Règle comprend un ensemble de critères portant sur le choix d'un site²⁸¹. Ces critères de choix d'un site peuvent être interprétés comme des indicateurs permettant de parvenir au respect des critères de radioprotection dans la mesure où des estimations de dose fiables, sur la base d'un ensemble de données complètes et fiables spécifiques au site, ne sont pas encore possibles.

La recherche portant sur les caractéristiques hydrogéologiques du site doit être dirigée vers une estimation rigoureuse des paramètres, qui sont pertinents pour le transport des radionucléides depuis le stockage jusqu'à la biosphère, et qui sont donc nécessaires pour développer et valider des modèles conceptuels et numériques solides pour le transport des radionucléides et, tout particulièrement, pour une estimation fiable des doses de rayonnements qui en résultent.

Pour la période qui s'étend jusqu'à 10 000 ans, ces paramètres doivent présenter une précision suffisante pour permettre la détermination d'une estimation de dose centrale, basée sur des études d'incertitudes explicites. Au-delà de cette période, ils doivent être déterminés sur des bases manifestement conservatrices, de manière à ce que les doses estimées puissent être considérées de façon fiable comme des limites supérieures, jusqu'au moment prévu pour le pic de dose.

5.2.1 Le critère hydrogéologique essentiel

Le critère hydrogéologique essentiel se rapporte à tous les types de roches hôtes et comprend les exigences suivantes²⁸² :

- « . . . une très faible perméabilité de la formation hôte et un faible gradient [..] hydraulique²⁸³,
- Un faible gradient régional hydraulique [...] recherché de préférence pour les formations environnantes de la formation hôte. »
- « Il faudra prendre en compte les discontinuités ou les hétérogénéités dont la nature et la géométrie pourraient tendre à amoindrir significativement l'efficacité de la barrière géologique. Ces objets devront donc être repérés et caractérisés avec la plus grande attention, de façon, s'il y a lieu, à les éviter au niveau du site ».

La Règle ne spécifie pas de critères numériques pour ces paramètres.

²⁸¹ Règle N° III.2.f, section 4.4

²⁸² Règle N° III.2.f, section 4.4.1

²⁸³ Il faut souligner ici que, en ce qui concerne les roches hôtes de perméabilité globalement faible, comme c'est le cas des roches argileuses du Callovo-Oxfordien, le gradient hydraulique dans la formation hôte est d'une importance mineure comparativement à la répartition des charges ou des pressions hydrauliques dans l'ensemble de la formation hôte et entre les formations avoisinantes.

La règle stipule que « des mesures hydrogéologiques devront être réalisées sur une zone beaucoup plus large que le site de stockage de façon à bâtir des modèles d'écoulement prenant en compte les flux depuis les zones d'alimentation jusqu'aux exutoires. Ces schémas régionaux devront permettre de simuler l'intensité de la direction des circulations souterraines. »

5.2.2 Critère essentiel de stabilité

Le critère essentiel de stabilité²⁸⁴ d'un site de stockage établit que « ...pour une période qui doit être égale au moins à 10 000 ans, la stabilité (qui englobe une évolution limitée et prévisible) doit être démontrée. » « La stabilité du site devra être telle que les éventuelles modifications des conditions initiales dues aux phénomènes géologiques qui peuvent survenir [...] restent acceptables ... » La stabilité du site sera évaluée en « ...se reportant à la situation actuelle, au passé proche (historique) et surtout au passé plus ancien (quaternaire et éventuellement fin du tertiaire). » A partir de cette évaluation, il faudra apprécier les futurs événements et processus géologiques et juger si les modifications qu'ils pourraient apporter « restent acceptables au regard de la sûreté du stockage. »

Du point de vue des exigences hydrogéologiques de la Règle fondamentale RFS III.2.f le critère de stabilité signifie qu'il faut démontrer que les événements et processus qui pourraient survenir ne changeront pas la situation hydrogéologique d'une manière qui pourrait avoir des conséquences radiologiques. C'est-à-dire un dépassement des normes.

5.2.3 Recommandations méthodologiques de la Règle III.2.f

L'Annexe N°1 de la Règle traite des objectifs et des principaux éléments des investigations à mener sur le site. De plus, elle comporte des recommandations méthodologiques pour la recherche hydrogéologique en distinguant les différents types de roches hôtes. Ces recommandations peuvent être interprétées comme un ensemble d'exigences minimum sur la quantité et la qualité des investigations à mener sur le site. Pour les formations argileuses, les travaux suivants sont recommandés²⁸⁵ :

- « la nature et l'importance des hétérogénéités à l'intérieur de la formation hôte [...] devront être déterminées localement,
- les discontinuités verticales (flexures et failles) et horizontales (biseaux sédimentaires, discordances, changements de faciès) [...] devront être localisées et identifiées,
- [...] une interprétation des données géologiques locales en termes de sédimentologie régionale (reconstitution paléogéographique locale) de façon à déterminer les moteurs (direction et nature) ayant agi durant la sédimentation
- une description de l'hydrogéologie superficielle à l'échelle locale, en vue d'avoir une estimation de l'alimentation des aquifères superficiels. »

²⁸⁴ Règle N° III.2.f, section 4.4.1

²⁸⁵ Règle N° III.2.f, Annexe N° 1, section 4.3

Les résultats devront être rassemblés et interprétés aussi précisément que possible et devront décrire la différence entre l'hydrogéologie au niveau régional et au niveau local.

5.2.4 Critères importants

Les « critères importants »²⁸⁶ se rapportent aux propriétés mécaniques, thermiques et géochimiques de la roche hôte. Il faudra tout particulièrement étudier la manière dont le stockage des déchets et tout autre événement ou processus affecteront le champ proche. De plus, la Règle III.2.f exige le respect d'une profondeur minimale du site de stockage (environ 150 à 200 m) pour prévenir une défaillance du site de stockage à la suite de l'érosion. Elle suggère également que les régions disposant de ressources souterraines ou susceptibles d'en receler ne soient pas choisies.

Ces critères se rapportent plus ou moins au critère hydrogéologique essentiel puisque les caractéristiques mécaniques et géochimiques de la roche hôte et leur modification influencent, ou déterminent même, les propriétés hydrauliques des roches hôtes argileuses. La profondeur de la roche hôte et des formations hydrogéologiques encaissantes d'un site de stockage influence la qualité des eaux souterraines et la vitesse de l'écoulement, tandis que l'existence de ressources souterraines, notamment d'eaux souterraines, dépend en général de la situation géologique du site choisi.

5.3 Informations utilisées

Au cours des dernières dix années, environ, l'ANDRA a recueilli une quantité importante et détaillée d'informations hydrogéologiques sur le site de Bure. La totalité de ces informations ne nous a pas été accessible malgré leur intérêt pour cette évaluation. La situation géologique générale autour du site peut être déduite de la carte géologique publiée en 2001²⁸⁷. La description la plus complète de la situation hydrogéologique du site de Bure et des environs est présentée par l'ANDRA dans le "Référentiel Géologique du site de Meuse/Haute-Marne", désigné ci-après comme le Référentiel Géologique. Le Référentiel Géologique²⁸⁸ est la source principale d'informations sur l'hydrogéologie.

Le Référentiel Géologique a été d'abord publié en janvier 1999 et quelques sections ont été mises à jour en juillet 2001 et en septembre 2001 pour rendre compte des nouveaux résultats obtenus par les investigations. Les informations du Référentiel Géologique rendent compte des connaissances disponibles sur la géologie de l'Est du bassin de Paris et des résultats des investigations de l'ANDRA sur le site de Bure, notamment au niveau de l'hydrogéologie. Les résultats obtenus par l'ANDRA et ses partenaires durant la période 2001-2003 ne sont pas disponibles de manière systématique et complète. En ce qui concerne l'hydrogéologie, cela vaut tout particulièrement pour les résultats des

²⁸⁶ Règle N° III.2.f, section 4.4.2

²⁸⁷ ANDRA Cartographie 2001, v.1 et v.2

²⁸⁸ ANDRA Référentiel Géologique Tomes 1, 2001

forages profonds qui ont été creusés ou sont en cours de creusement sur le site de Bure et aux alentours en 2003 et 2004.

Quelques résultats importants obtenus en 2001 et 2002 sont présentés dans le document de l'ANDRA "Bilan des Études et Travaux 2001"²⁸⁹ et "Bilan des Études et Travaux 2002"²⁹⁰ ainsi que dans un certain nombre d'articles scientifiques.

Les informations géologiques et hydrogéologiques du site de Bure présentées et analysées dans les sections suivantes proviennent principalement du Référentiel Géologique. En l'absence de référence particulière, les informations sur le site données ici proviennent de ce Référentiel.

5.3.1 Informations sur la démarche adoptée par l'ANDRA dans ses investigations scientifiques

Les principaux documents utilisés pour la présente évaluation du programme de recherche scientifique passé et futur de l'ANDRA sur le champ lointain autour du laboratoire de Bure sont les suivants :

- **Scientific Programme HLLW Clay Repository Project – 2002-2005** du 19 Septembre 2002, C PE ADS 02-039 cité sous la référence « ANDRA 2002-2005 ». Ce document contient les informations les plus récentes sur le programme de recherche de l'ANDRA.
- **Dossier Argile 2001** sur l'avancement des études & recherches relatives à la faisabilité d'un stockage de déchets à haute activité et à vie longue en formation géologique profonde - **Rapport de synthèse**. Ce rapport est cité sous la référence "ANDRA Dossier Argile 2001". Le rapport de synthèse est également disponible en anglais.
- Dossier Argile 2001 sur l'avancement des études & recherches relatives à la faisabilité d'un stockage de déchets à haute activité et à vie longue en formation géologique profonde – **Rapport de synthèse Partie B Compléments scientifiques et techniques**
- Quelques information récentes et détaillées proviennent du « Bilan des Études et Travaux 2001 et 2002 ». ²⁹¹

Le «Cahier des charges » est le document utilisé pour comprendre l'approche de l'ANDRA au regard des investigations scientifiques qui traitent des investigations hydrogéologiques ou des investigations importantes pour l'hydrogéologie. Nous le citons dans les sections suivantes quand nous nous servons de ses informations.

²⁸⁹ ANDRA BET 2001

²⁹⁰ ANDRA BET 2002

²⁹¹ ANDRA BET 2001 et 2002

5.4 Hydrogéologie du site de Bure

5.4.1 Situation géologique et généralités

Le site de Bure est situé dans la partie est du bassin de Paris, qui s'est formée durant le Mésozoïque et le Cénozoïque inférieur. Il est constitué par une série sédimentaire épaisse d'origine principalement marine. A proximité du site de Bure l'épaisseur des séries mésozoïques est d'environ 1,5 kilomètre. Les sédiments argileux du Callovo-Oxfordien du site de Bure représentent 130 à 145 m de l'épaisseur totale. Leur formation s'étend sur une période de 10 millions d'années durant le Jurassique moyen et supérieur (~160 million d'années avant le présent [AP]).

La couche callovo-oxfordienne se compose d'unités stratigraphiques du Callovien moyen, du Callovien supérieur, de l'Oxfordien inférieur et de la partie inférieure de l'Oxfordien moyen. Elle est présentée par l'ANDRA comme un aquitard semi-perméable de très faible perméabilité. Elle se situe entre les calcaires du Dogger (en dessous) et les calcaires de l'Oxfordien (au-dessus). Ces formations ont - au moins à certains endroits et en comparaison avec le Callovo-Oxfordien - des perméabilités plus fortes et peuvent être considérées comme des formations aquifères à l'échelle régionale. Au-dessous des calcaires du Dogger et au-dessus de ceux de l'Oxfordien les séquences de couches sédimentaires se composent aussi de systèmes hydrogéologiques avec une alternance de perméabilités élevées et faibles.

Des informations directes sur les propriétés de ces formations ont été recueillies à partir de trois endroits du secteur. Ce sont : le forage HTM 102 à la limite sud du secteur, plusieurs forages sur la zone même du laboratoire et le forage MSE 101 dans la partie nord du secteur. Des informations supplémentaires sur la structure de la zone ont été obtenues par des campagnes sismiques à différentes échelles.

D'après les résultats de ces investigations, l'inclinaison du Callovo-Oxfordien et des formations sous- et sus-jacentes est orientée, généralement vers le centre du bassin de Paris. Dans la zone de Bure le pendage est approximativement de 1 – 1,5° au nord-ouest sans irrégularités majeures. Dans la zone équivalente de transposition l'épaisseur et la profondeur du Callovo-Oxfordien augmentent vers le nord ouest :

Epaisseur	130 m (HTM 102) - 145 m (MSE 101)
Profondeur du toit par rapport à la surface (m)	342 m (HTM 102) - 505 m (MSE 101)
Profondeur du toit par rapport au niveau de la mer (m)	+10 m (HTM 102) - -245 m (MSE 101)

A l'emplacement des puits d'accès du laboratoire, l'épaisseur est de 133 m, le toit est à -422 m et la base à -555 m. Les travaux de construction du laboratoire commenceront pratiquement au milieu du Callovo-Oxfordien à une profondeur de -490 m.

D'après les résultats des forages et d'une campagne par réflexion sismique 3D sur une surface de 200 km², au nord du site, la couche du Callovo Oxfordien apparaît homogène.

Aucune hétérogénéité n'a été observée et aucune faille à déplacement vertical notable n'a été détectée²⁹² dans cette zone équivalente de transposition²⁹³.

5.4.1.2 Composition du Callovo-Oxfordien

Les argiles silteuses dominent la composition du Callovo-Oxfordien²⁹⁴. La composition minéralogique moyenne (pourcentage en poids) est la suivante²⁹⁵ :

Minéraux argileux	~40-45 %
Carbonate, principalement calcite	~30 %, maximum 49 %
quartz	~25-30 %

Une observation détaillée met en évidence une variation verticale de la composition²⁹⁶, avec les trois séquences sédimentaires suivantes (de la base jusqu'au sommet) :

- une séquence inférieure d'argiles silteuses (35 m) directement au dessus des calcaires du Dogger, est d'âge Callovien. Elle est relativement riche en argiles silteuses (quartz) et relativement pauvre en carbonates.
- une séquence médiane d'argiles silteuses de 80 m composée des trois ensembles qui sont de bas en haut :
 - Un premier ensemble argileux d'une épaisseur de 45 m. La teneur en minéraux argileux augmente sans interruption jusqu'à atteindre 50 - 60 %. La partie inférieure de ce premier ensemble débute par « une passée d'argilites de 6 mètres d'épaisseur comportant 5 niveaux décimétriques de calcaires. »
 - Un deuxième ensemble d'argilites silto-carbonatées est d'une épaisseur de 16 m. Dans cet ensemble la teneur en minéraux argileux diminue légèrement.
 - Un troisième ensemble d'une épaisseur de 19 m se compose « de siltite argilo-carbonatée [...] correspondant à une diminution plus sensible du

²⁹² ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A, pages 68, 56

²⁹³ voir Section 5.1

²⁹⁴ Les termes « siltite » et « silteux » ne sont pas clairement définis. Dans ce cas ils se rapportent à des roches sédimentaires avec une teneur en argile élevée, légèrement durcies, comme le Callovo-Oxfordien sur le site de Bure.

²⁹⁵ ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001, chapitre II

²⁹⁶ ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001, chapitre I.2.2.1; et Tome 4, Figure 1.1-01

pourcentage de minéraux argileux et à un enrichissement notable en quartz et en carbonates vers le haut de l'unité ».

- La séquence supérieure (18 m) se compose des siltites carbonatées, avec 4 m à la base de calcaire argilo-silteux.

La fraction argileuse est principalement constituée d'illite et de smectite organisés en une couche mixte de séries d'interstratifiés, illite/smectite désordonnés²⁹⁷. La proportion de ces constituants change avec la profondeur. La base du Callovo-Oxfordien (approximativement 60 m) est pauvre en smectite. Dans une zone de transition épaisse d'environ 10 m, cette proportion augmente pour atteindre jusqu'à 18 à 20 %. La chlorite est présente dans presque tous les échantillons en faibles proportions, de 5 % au maximum. La kaolinite n'est présente que dans la base, dans des proportions encore plus faibles.²⁹⁸

La variabilité verticale de la composition minérale se manifeste dans le comportement mécanique de la roche. Les sections dont la composition est relativement forte en carbonates possèdent une résistance plus importante (fort module de déformation) tandis que celle des sections riches en argile et minéraux argileux est plus faible.

La composition du Callovo-Oxfordien, en particulier celle des phases des minéraux argileux, et sa variabilité verticale sont interprétées comme correspondant aux séquences de l'histoire sédimentaire (différents sédiments pour les couches mixtes) et à une évolution diagénétique dès la fin du dépôt. Plus tard, on ne note aucune influence majeure de diagénèse ou de métamorphose qui auraient pu changer ou fortement modifier la composition de départ.²⁹⁹

La subsidence du bassin de Paris ne s'est pas traduite par une forte augmentation de la température et le changement qui l'aurait accompagnée. D'après la détermination des paléotempératures par l'étude de la composition en matière organique³⁰⁰ la paléotempérature maximum n'a pas dépassé 38 °C, ce qui correspond à une profondeur maximale de subsidence d'environ 850 m.

La composition séquentielle du Callovo-Oxfordien est présentée comme étant latéralement homogène.³⁰¹ Aux trois endroits étudiés jusqu'ici, la composition minéralogique et sa variabilité verticale sont très semblables. Par contre une différenciation latérale doit être prise en compte pour l'évaluation du site.³⁰² Cela vaut particulièrement pour la teneur en carbonates³⁰³ et des autres paramètres qui en dépendent.

²⁹⁷ CLARET 2001, CLARET et al. 2002

²⁹⁸ ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001, Table 2.1-03

²⁹⁹ CLARET 2001; ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001, chapitre II.1.21

³⁰⁰ ANDRA 1996, page 9, ANDRA 2000, page 26

³⁰¹ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A, page 56

³⁰² BREGOIN 2003

³⁰³ voir Figure 5-1

5.4.2 Situation hydrogéologique

5.4.2.1 Définition des termes

Comme nous le précisons dans la section 5.1 les propriétés hydrauliques des roches hôtes d'un site de stockage pour les déchets radioactifs et les formations sus- et sous-jacentes sont la diffusion et/ou la convection (transport des solutés dans les eaux souterraines) et la vitesse du transport. La plus importante de ces propriétés est la perméabilité.³⁰⁴

Selon la nature de leur conductivité hydraulique les formations hydrogéologiques des roches sont classées comme aquifères (formations "perméables"), aquitards ou aquifères semi-perméables et aquicludes (formations "impermeables"). La définition de ces termes et de leurs conductivités hydrauliques "caractéristiques" n'est pas strictement arrêtée. Le tableau 5-1 donne un aperçu des conductivités hydrauliques mesurées dans la formation Callovo-oxfordienne et dans les formations sus- et sous-jacentes du site de Bure. La désignation d'une formation géologique comme aquifère, aquifère semi-perméable ou aquiclude ne veut pas dire que cette formation est (ou doit même être) hydrauliquement homogène. Au contraire, et en règle générale, ces formations affichent un large éventail de valeurs.

Dans les sections suivantes, nous présentons une sélection d'informations pertinentes pour l'hydrogéologie. Toutes les informations sont issues de la présentation de l'ANDRA dans le Référentiel Géologique et le Dossier 2001 Argile. Nous avons procédé de cette manière pour permettre une meilleure compréhension des résultats présentés dans les sections 5.6 et 5.7. Notre intention n'est pas de présenter une description complète.

5.4.2.2 Unités hydrogéologiques importantes

L'ANDRA a défini un secteur de recherche pour les investigations hydrogéologiques pour le site de Bure. Ce secteur s'étend bien au-delà des limites de la zone équivalente de transposition (voir la section 5.1), puisqu'il comprend les zones où l'on pense que se trouvent les sources d'alimentation et les exutoires des eaux souterraines de la zone équivalente de transposition.³⁰⁵ Les zones d'alimentation sont les zones montagneuses à l'est et au sud du laboratoire, on pense que les exutoires se retrouvent tout particulièrement dans les vallées de la Marne, de la Meuse et de la Moselle. Ce secteur comprend également les systèmes de failles et grabens qui ont été exclus de la zone équivalente de transposition, du Fossé de Gondrecourt (au sud-est du site) et du Fossé de la Marne (à l'ouest) ainsi que de quelques failles de moindre importance (au sud-ouest).

³⁰⁴ En hydrogéologie dans différents pays le terme « perméabilité » est utilisé avec des significations légèrement différentes. Dans le Référentiel Géologique de l'ANDRA il est normalement utilisé dans le sens d'une conductivité hydraulique (exprimée par la valeur K, dimension: m/sec). Ici, « perméabilité » et « conductivité hydraulique » sont utilisées de la même façon et ont donc la même signification.

³⁰⁵ ANDRA Référentiel Géologique Tome 3, 2001, Figure 1.0-01

Dans cette zone la séquence mésozoïque sédimentaire du secteur de Bure se compose de plusieurs unités où alternent des perméabilités plus fortes ou plus faibles. Parmi ces unités, les couches supérieures en commençant par le Dogger, présentent un intérêt particulier, parce qu'elles sont considérées comme des formations dans lesquelles pourraient exister des voies pour le transport potentiel des solutés depuis le site de stockage prévu jusqu'à la biosphère. Ces unités sont les suivantes :

- Crétacé inférieur - conductivité hydraulique différente (ne s'applique pas au site)
- Tithonien - aquifère
- Marne du Kimméridgien – aquifère semi-perméable
- Calcaire Oxfordien - généralement aquifère, avec par endroit de faibles perméabilités
- Callovo-Oxfordien – aquifère semi-perméable
- Calcaire du Dogger - généralement aquifère, avec par endroits de faibles perméabilités

5.4.2.3 Propriétés hydrauliques

Les valeurs de la conductivité et des charges hydrauliques pour ces formations sont présentées par l'ANDRA dans le tableau 5-1 du Référentiel Géologique. Les valeurs se rapportent aux résultats des essais in situ. Le Référentiel Géologique fournit également des données sur la capacité d'entreposage des différentes formations. Celle-ci est importante pour l'interprétation des essais hydrauliques. Pour ce qui nous concerne elle est de peu d'intérêt et ne sera pas prise en compte.

Les calcaires du Dogger et de l'Oxfordien, situés directement au dessus et en dessous du Callovo-Oxfordien sur le site de Bure, présentent à cet endroit des conductivités hydrauliques plus faibles que celles attendues à partir des informations au niveau régional. Dans ces formations, la conductivité hydraulique n'est que légèrement supérieure à celle du Callovo-Oxfordien. Dans le forage HTM 102 la corrélation entre la faible perméabilité et la forte pression hydraulique de ces zones n'est pas claire.³⁰⁶

D'autre part, les calcaires de l'Oxfordien présentent neuf horizons caractérisés par une porosité plus importante et, par conséquent, une perméabilité plus importante.³⁰⁷ Ces horizons, en particulier ceux mis en évidence par le forage HTM 102 et les forages sur le site de Bure, sont des sections où l'écoulement des eaux souterraines pourrait être plus important et sont, par conséquent, particulièrement importants pour la modélisation des eaux souterraines.

En outre, les calcaires du Dogger et de l'Oxfordien sont sujets à la karstification, particulièrement en l'absence d'une couverture protectrice de roches insolubles ou moins

³⁰⁶ Figure 5-2 and 5.3

³⁰⁷ ANDRA Référentiel Géologique Tome 3, 2001, chapitres IV and V

solubles.³⁰⁸ Ce processus va augmenter la conductivité hydraulique des calcaires, particulièrement le long des fissures et des fractures, et peut même entraîner une redistribution et une canalisation des écoulements des eaux souterraines dans ces formations (Section 5.6.5.2).

La porosité dans la séquence est déterminée par le pétrofaciès. Les valeurs obtenues dépendent de la technique utilisée (porosimétrie mercure ou calcul à partir des mesures de densité; les valeurs obtenues à partir des mesures de densité sont légèrement supérieures, parce que les pores les plus petits sont inclus). En règle générale, la porosité des roches carbonatées est faible (Dogger 4 - 6.4 % ; Oxfordien ~10 %). Cependant, dans l'Oxfordien et les calcaires du Kimméridgien, la porosité augmente dans quelques sections pour atteindre plus de 20 %³⁰⁹. La porosité du Callovo-Oxfordien est positivement corrélée avec la teneur en argile et varie de 10 à 20 % (calcul à partir des mesures de densité) avec une moyenne de 15 %³¹⁰.

Les données de conductivité et de porosité présentées pour la couche hôte ne sont pas censées être influencées par des fractures. Selon le modèle conceptuel de l'ANDRA de l'écoulement des eaux souterraines et du transport de solutés, des fractures présentant une augmentation de conductivité hydraulique et de porosité significative pour la sûreté ne devraient pas se manifester. Selon le Référentiel Géologique (Tome 3 chapitre II.5) aucune fracture de rejet vertical important dans le Callovo-Oxfordien n'a encore été détectée. Par conséquent, l'ANDRA s'attend à ce que la diffusion soit le processus prévalant pour le transport des solutés, illustré par un **coefficient effectif de diffusion** (De). Les valeurs du De obtenues à partir de la recherche en laboratoire pour plusieurs anions et cations vont de 10^{-13} à 2×10^{-11} m²/sec pour les anions et de 10^{-11} - 4×10^{-10} m²/sec pour les cations.³¹¹ Pour le tritium la moyenne des valeurs mesurées est de $1,4 \times 10^{-11}$ m²/sec. Ces valeurs se rapportent à des mesures perpendiculaires à la stratification. Les coefficients sont légèrement plus élevés pour des mesures parallèles à la stratification (tritium : 2×10^{-11} m²/sec). Pour l'évaluation des impacts géologiques et (géo) chimiques potentiels sur la diffusion, l'ANDRA a étudié l'influence de facteurs importants, tels que la composition de la roche, la concentration des solutés, le gradient de concentration, et la salinité.³¹² Quelques données préliminaires sont également présentées sur la rétention des solutés.

5.4.2.4 Écoulement des eaux souterraines

En général, l'écoulement des eaux souterraines dans les unités hydrogéologiques du secteur de Bure prend son origine dans les zones d'alimentation des régions montagneuses au sud et à l'est du site et se dirige vers le centre du bassin de Paris. A l'échelle régionale et locale, il est influencé par le lieu des exutoires, en particulier le long des vallées et des fleuves principaux de la région : la Marne, la Meuse et la Moselle. Les

³⁰⁸ voir chapitre 5 bis xxx

³⁰⁹ ANDRA Référentiel Géologique Tome 3, 2001, Figure 4.2-03 - 4.2-5

³¹⁰ ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001, chapitre II.2.1.2

³¹¹ ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001, chapitre III.2

³¹² ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001, chapitre III.2

écoulements potentiels des eaux souterraines (et le transport des solutés) à partir du site de Bure sont déterminés et évalués par une modélisation hydrogéologique imbriquée, intégrée aux échelles locales et régionales et aussi à l'échelle du site.³¹³

Les données sur les charge hydrauliques (ou la pression de l'eau) dans les formations hydrogéologiques les plus importantes, du Dogger à l'Oxfordien, font défaut. Seules quelques données sont obtenues des forages HTM 102, MSE 101 et du site lui-même. Cette base de données ne permet d'identifier que quelques particularités importantes :³¹⁴

- Les roches argileuses du Callovo-Oxfordien contiennent une zone à haute pression.³¹⁵ En particulier, dans le forage MSE 101 il existe une surpression forte à la fois de la pression hydrostatique prévue et des pressions dans les calcaires du Dogger et de l'Oxfordien. La surpression est moins significative dans le forage HTM 102.
- Le gradient entre les charges hydrauliques dans les calcaires du Dogger et de l'Oxfordien change dans la zone concernée. Il est descendant (plus fort dans l'Oxfordien que dans le Dogger) dans le forage HTM 102 et ascendant dans le forage MSE 101. Aux deux endroits ce gradient est plus faible qu'entre le Callovo-Oxfordien et ces formations.

Selon l'ANDRA³¹⁶, cette zone de haute pression empêche un transport convectif ascendant ou descendant des solutés à travers le Callovo-Oxfordien. Par conséquent, c'est pour l'ANDRA l'un des arguments principaux qui sous tend son modèle conceptuel sur la migration diffusives dans la couche hôte.³¹⁷

A l'échelle régionale, il n'y a pas non plus de données suffisantes sur les charges hydrauliques ou les pressions de l'eau dans les calcaires du Dogger du secteur de Bure pour pouvoir décrire précisément l'écoulement des eaux souterraines.³¹⁸ L'acquisition des données est en cours.³¹⁹ Une modélisation hydraulique récente basée sur des données encore insuffisantes indique un écoulement des eaux souterraines vers un exutoire dans la vallée de la Moselle à quelques dizaines de kilomètres au nord-est du site.³²⁰ Le temps de parcours calculé est de quelques millions d'années.

Selon des données présentées dans le Référentiel Géologique, Tome 3 (chapitre 5 et Figures 5.1-01 et 5.1-06 à 5.1-08) et Tome 5 (chapitre 2.1 et Figure 2.1-03), l'écoulement des eaux souterraines dans les formations au-dessus du Callovo-Oxfordien semble généralement se diriger vers le nord-ouest. Pour les calcaires de l'Oxfordien, cette conclusion peut être déduite des charges hydrauliques aux lieux des trois forages profonds (HTM 102, site de Bure, MSE 101). Pour le reste de la zone équivalente de

³¹³ WENDLING et al. 2002

³¹⁴ voir Figures 5-2 and 5-3

³¹⁵ ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001, Table 3.1-01; ANDRA 1995, Table "Resultats definitifs" au 14/02/1996

³¹⁶ ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001, chapitre III.3

³¹⁷ voir Section 5.5

³¹⁸ ANDRA Référentiel Géologique Tome 3, 2001, chapitre 5 and Figure 5.1-01

³¹⁹ voir Section 5.6.5

³²⁰ WENDLING et al. 2002

transposition ou d'une zone encore plus grande il n'existe pas suffisamment d'informations (Référentiel Géologique, Tome 3, Figures 5.1-01, 5.1-06, 5.1-07, 5.1-08).³²¹ Dans le détail, la direction de l'écoulement des eaux souterraines est fortement influencée par les plus importantes rivières de la région, particulièrement la Marne et la Meuse. Ainsi, une modélisation récente basée sur des données encore préliminaires et insuffisantes indique un exutoire dans la vallée de la Marne au sud-ouest du site. Le temps de parcours calculé serait de l'ordre de plusieurs centaines de milliers d'années.³²²

	Épaisseur (m)	Conductivité hydraulique (m/sec)	Cote Pseudo- piézométrique (m NGF)
Calcaire du Barrois, Tithonien (aquifer)	~85	$3 * 10^{-5}$	-
Kimméridgien marneux (aquitard)	100 - 110	$6,7 * 10^{-12}$	346 - 352
Calcaire Oxfordien, inclusif Kimmeridgien inférieur (aquifère)	~290	$8 * 10^{-13} - 1,2 * 10^{-8}$	256 - 317
Callovo-Oxfordien (aquitard)	130 - 145	$9,4 * 10^{-14} - 1,1 * 10^{-9+}$	310 - 387
Calcaire Dogger (aquifère)	234 - 250	$7,8 * 10^{-13} - 2,7 * 10^{-8}$	286 - 289

Tableau 5-1 Données hydrauliques in situ du Callovo-Oxfordien et des formations hydrogéologiques sous et sus-jacentes dans le site de Bure (données provenant du Référentiel Géologique, tome 3, Figures 1.1-03 et 1.1-04; Référentiel Géologique, Tome 4, Tableau 3.1-01; ANDRA 1995, Tableau "Résultats définitifs" au 14/02/1996)

⁺ Selon les résultats de l'évaluation détaillée des données et l'interprétation des mesures à long terme de la pression hydraulique dans les forages la représentativité des valeurs les plus élevées de cette fourchette est considérée comme réduite. On s'attend à ce que des valeurs plus fiables soient proches de 10^{-14} m/s (Référentiel Géologique, Tome III, chapter III.1.3).

³²¹ ANDRA Référentiel Géologique Tome 3, 2001, Figures 5.1-01, 5.1-06, 5.1-07, 5.1-08

³²² WENDLING et al. 2002

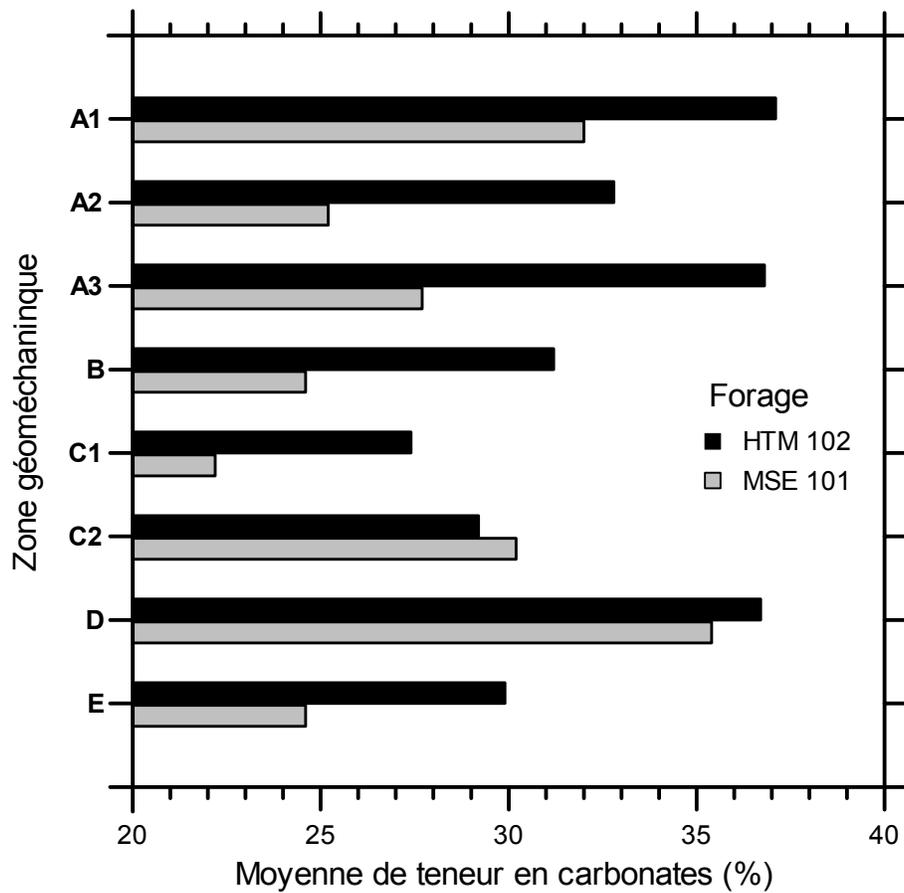


Figure 5-1 Variabilité verticale de la teneur en carbonates du Callovo-Oxfordien à deux endroits de forage sur le site de Bure en fonction des valeurs moyennes pour les zones hydromécaniques Données du Référentiel Géologique, Tome 4, tableau 2.1-02.

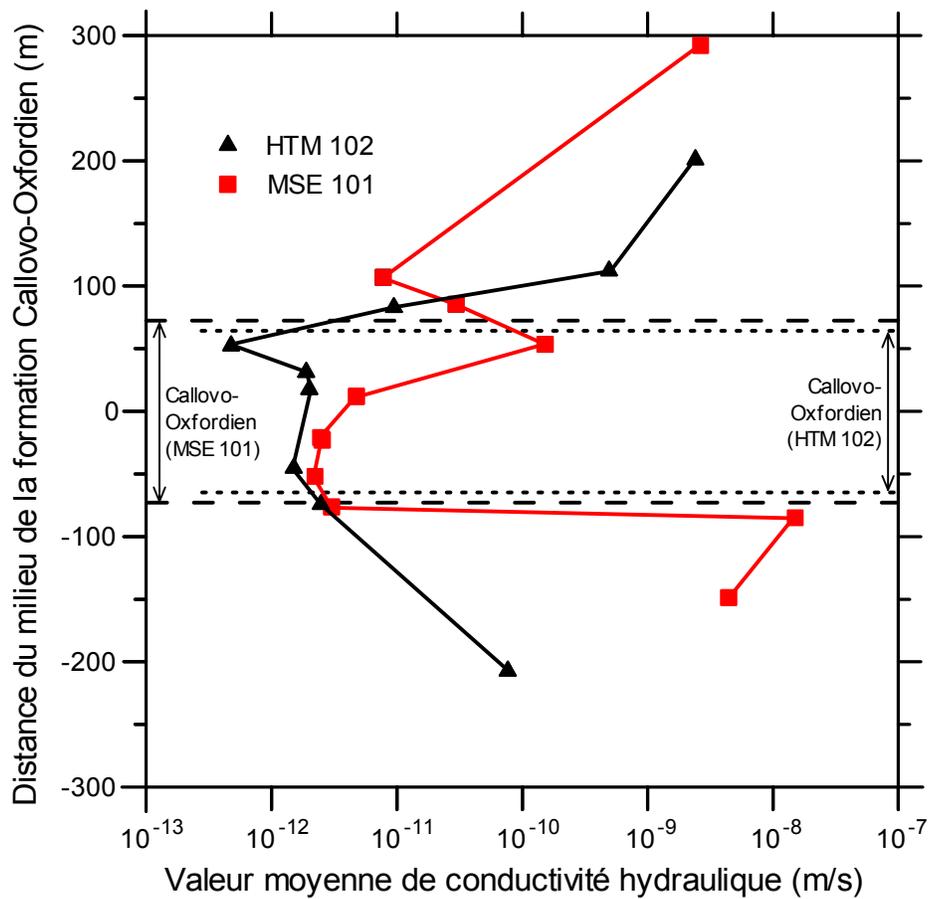


Figure 5-2 Variabilité verticale de la conductivité hydraulique dans le Callovo-Oxfordien et des formations hydrogéologiques sus- et sous jacentes des calcaires du Dogger et de l'Oxfordien en fonction de la distance des intervalles des essais par rapport au milieu du Callovo-Oxfordien.

Des valeurs moyennes ont été calculées à partir de la fourchette des valeurs présentées dans le Référentiel Géologique, tome 3, Figures 1.1-03 et 1.1-04; Référentiel Géologique, Tome 4, Tableau 3.1-01 ; ANDRA 1995, Tableau "Résultats définitifs" au 14/02/1996).

Voir également la remarque [⁺] dans le tableau 5-1.

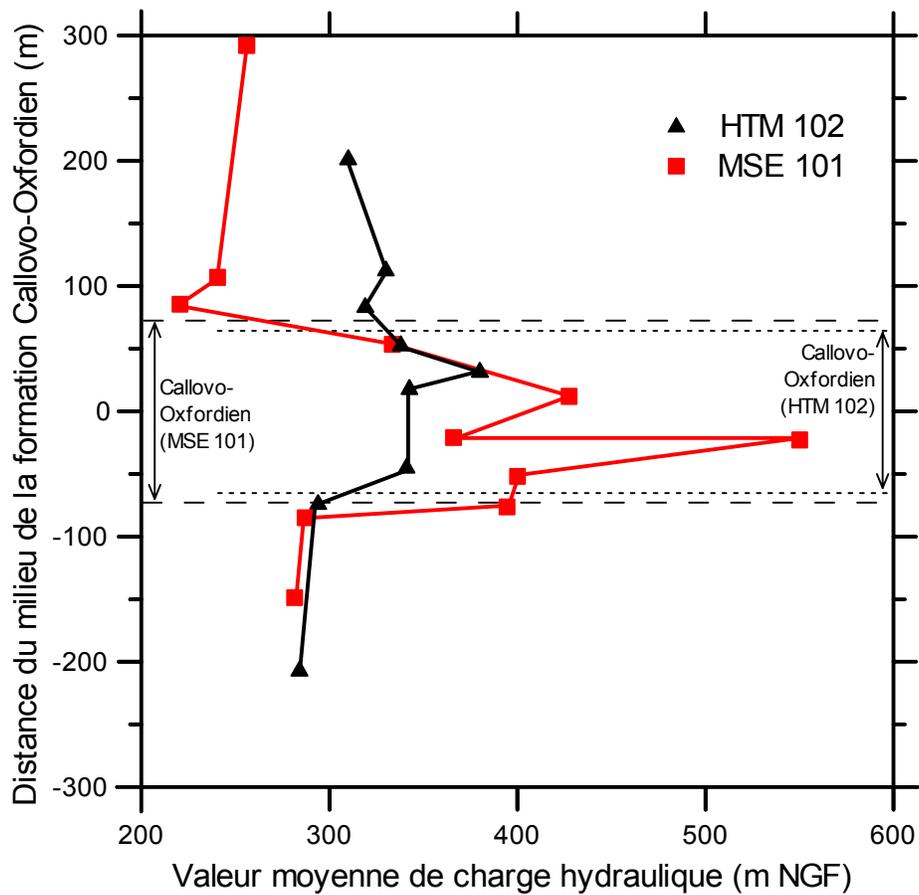


Figure 5-3 Variation verticale de la pression hydraulique dans le Callovo-Oxfordien et les calcaires hydrogéologiques sus et sous-jacents du Dogger et de l'Oxfordien en fonction de la distance des intervalles des essais du milieu du Callovo-Oxfordien.

Des valeurs moyennes ont été calculées à partir de la fourchette des valeurs présentées dans le Référentiel Géologique, tome 3, Figures 1.1-03 et 1.1-04 ; Référentiel Géologique, Tome 4, Tableau 3.1-01 ; ANDRA 1995, Tableau "Résultats définitifs" au 14/02/1996).

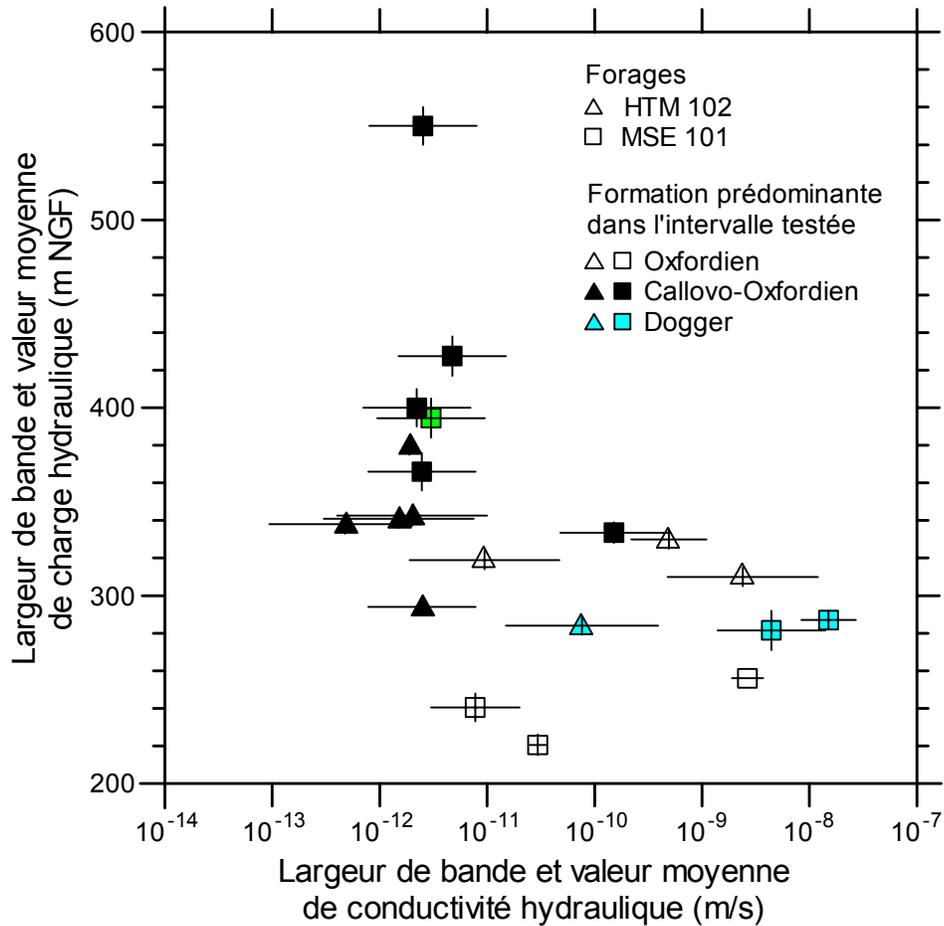


Figure 5-4 Dépendance de la pression hydraulique vis-à-vis de la conductivité hydraulique dans le Callovo-Oxfordien et les calcaires sous- et sus-jacents du Dogger et de l'Oxfordien.

Des valeurs moyennes ont été calculées à partir de la fourchette des valeurs présentées dans le Référentiel Géologique, tome 3, Figures 1.1-03 et 1.1-04 ; Référentiel Géologique, Tome 4, Tableau 3.1-01 ; ANDRA 1995, Tableau "Résultats définitifs" au 14/02/1996).

5.4.2.5 Hydrochimie

A l'échelle régionale une étude de l'hydrochimie des eaux souterraines, montre que la composition de l'eau, dans certaines formations hydrogéologiques caractérisées par une conductivité hydraulique plus élevée, est différente selon que la formation reçoit, ou ne reçoit pas, une infiltration directe de la zone d'alimentation. Dans les zones où la recharge directe et la circulation intensive des eaux souterraines sont possibles la teneur en sel est basse. Au site de Bure, et notamment dans les forages HTM 102 et MSE 101, les eaux souterraines sont confinées dans les formations plus profondes comme le montre la composition chimique des eaux souterraines qui est surtout fournie ici par la teneur en sel.

Pour ce qui concerne les eaux souterraines des calcaires du Dogger, seul le forage MSE 101 apporte quelques informations.³²³ Avec 4,3 g/l TDS (total des solides dissous) la teneur totale en sel dépasse de beaucoup la concentration normale de l'eau de mer. Le faciès des eaux souterraines est du type NaCl.

En raison des petits diamètres des pores, il est difficile, d'un point de vue méthodologique et technique, d'extraire et d'analyser l'eau des roches argileuses du Callovo-Oxfordien. L'ANDRA a appliqué différentes techniques pour surmonter ces problèmes, le pressage et la lixiviation, la deuxième technique fournissant des concentrations plus élevées des solutés. Les données que nous présentons ont été obtenues par pressage.³²⁴

L'eau dans les roches argileuses du Callovo-Oxfordien se trouve dans un milieu réducteur comme l'indique la présence de pyrite plutôt que d'oxydes de fer. Les teneurs en sel dans le Callovo-Oxfordien varient quelque peu dans les trois forages HTM 102 (2,7 – 5,5 g/l), EST 104 sur le site du laboratoire (3,7 – 8,5 g/l) et MSE 101 (4,2 – 7,2 g/l). En règle générale, le chlorure et/ou le sulfate dominant, pour les anions, pour les cations ce sont le sodium, suivi du calcium. Les concentrations élevées en sel dans le forage EST 104 sont dues au sulfate plutôt qu'au chlorure. En général, les concentrations en sel sont les plus élevées dans le forage MSE 101. La profondeur du Callovo-Oxfordien, plus élevée dans ce forage qu'aux autres endroits, pourrait en être la raison.³²⁵

La salinité de l'eau dans les calcaires de l'Oxfordien se situe entre 500 et 650 mg/l dans les zones d'eaux souterraines libres. Au site de Bure (forage EST 103), où l'alimentation et circulation de l'eau sont limitées, la concentration est de 1,455 mg/l. Le faciès hydrochimique est de type Na-HCO₃. La composition chimique des eaux souterraines dans les calcaires du Kimméridgien dépend également de la couverture. Là où la charge hydraulique est libre, la teneur en sel est d'environ 550 mg/l. Au site de Bure (EST 103) la concentration en sel est de 932 mg/l, le faciès des eaux souterraines est du type Mg-HCO₃. Les investigations isotopiques au site de Bure indiquent que les eaux souterraines dans les calcaires de l'Oxfordien et du Kimméridgien sont d'origine météorique³²⁶.

³²³ ANDRA Référentiel Géologique Tome 2, 2001, chapitre IV.2.2 and tableau 4.2-01

³²⁴ ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001, chapitre II.3.3

³²⁵ ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, chapitre II.3.3

³²⁶ ANDRA BET 2002, page 175

Les concentrations en sel et particulièrement en chlorure, décroissantes des calcaires du Dogger à ceux de l'Oxfordien, sont interprétées de façon préliminaire par l'ANDRA comme des indicateurs de diffusion du Dogger à l'Oxfordien en passant par le Callovo-Oxfordien.³²⁷

5.5 Le modèle hydrogéologique conceptuel de l'ANDRA

A partir des propriétés hydrogéologiques du Callovo-Oxfordien et des formations sus- et sous-jacentes du Dogger et de l'Oxfordien, l'ANDRA a dérivé un modèle conceptuel du transport des solutés qui devrait être validé pour la zone équivalente de transposition³²⁸.

5.5.1 Callovo-Oxfordien

Les argilites du Callovo-Oxfordien forment un aquifère semi-perméable de taille régionale entre les formations aquifères des calcaires du Dogger et de l'Oxfordien. La diffusion des solutés dans le Callovo-Oxfordien non perturbé est le transport prévalent. La migration potentielle des radionucléides est supposée suivre le gradient de concentration et parvenir à une couche plus perméable, soit les calcaires du Dogger ou ceux de l'Oxfordien. Par conséquent, une migration verticale plutôt que latérale à la stratification est prise en compte. Cette conclusion est principalement dérivée des caractéristiques suivantes.³²⁹

- la très faible perméabilité des argilites du Callovo-Oxfordien, indiquée par la basse conductivité hydraulique mesurée,
- les différences significatives entre les charges hydrauliques dans les calcaires du Dogger et de l'Oxfordien, indiquant leur séparation hydraulique par le Callovo-Oxfordien,
- l'existence d'une zone significative de surpression dans le Callovo-Oxfordien indiquant une reconstitution très lente de l'équilibre de la pression hydraulique et excluant un transport par convection verticale des solutés à travers la roche hôte,
- les différences de composition chimique et isotopique de l'eau interstitielle du Callovo-Oxfordien par rapport à celles du Dogger et de l'Oxfordien, la variabilité verticale du chlore, du brome, et des concentrations des isotopes environnementaux ainsi que de leurs ratios dans les diverses formations Callovo-oxfordiennes et voisines,
- la variabilité verticale du chlore, du brome, et des concentrations des isotopes environnementaux dans le Callovo-Oxfordien et les aquifères sus- et sous-jacents.
- l'absence d'hétérogénéités faciales ou structurales dans le Callovo-Oxfordien qui pourraient affecter la perméabilité de manière significative.

³²⁷ voir Section 5.5

³²⁸ ANDRA Référentiel Géologique Tome 1, chapitre II.5.3, Tome 4, chapitre III.3

³²⁹ voir aussi Section 5.4, Figures 5-2 and 5-3

5.5.2 Les formations sus- et sous-jacentes

Une fois que l'interface entre le Callovo-Oxfordien et les formations encaissantes sera atteinte par les solutés, le transport des eaux souterraines par convection deviendra le mécanisme à considérer. Ce transport sera parallèle à la stratification des formations calcaires et est dirigé, depuis l'emplacement de l'arrivée par diffusion des solutés, vers des exutoires de la formation aquifère ou vers des lieux où les eaux souterraines peuvent être exploitées. Cette conclusion est déduite de :

- la conductivité hydraulique relativement élevée dans les calcaires du Dogger et de l'Oxfordien par rapport au Callovo-Oxfordien argileux,
- la perméabilité parallèle à la stratification étant sensiblement plus élevée que celle perpendiculaire à la stratification,
- l'obstacle au transport vertical ascendant dû à l'existence d'une série de conductivités hydrauliques faibles et intermédiaires au-dessus des calcaires de l'Oxfordien (par exemple les marnes du Kimméridgien).

Puisque la conductivité hydraulique de ces formations encaissantes est faible, l'ANDRA fait l'hypothèse que le transport convectif dans ces formations sera significativement retardé.

A ce jour, l'ANDRA exclut une contribution convective significative au transport des solutés ou même un transport par convection dans le Callovo-Oxfordien, qu'il soit parallèle ou perpendiculaire à la stratification. Un transport de cette nature aurait probablement comme conséquence une vitesse de transport plus élevée, donc un temps de transport plus court du site de stockage aux couches aquifères et à l'aquiclude voisins que si la diffusion seule est prise en compte. Par conséquent, ceci influencerait significativement le programme de recherche.

5.6 Évaluation de l'approche de l'ANDRA pour des investigations hydrogéologiques

5.6.1 Contraintes et critères

Les propriétés hydrogéologiques, notamment hydrauliques, des roches dépendent directement de leurs propriétés pétrographiques et minéralogiques, reflétant la formation de la roche et/ou sa modification ultérieure par des processus diagénétiques et épigénétiques. De plus, elles sont influencées ou même déterminées par les propriétés géomécaniques et chimiques de la roche qui, elles aussi, sont le produit de la formation du massif rocheux ou des processus diagénétiques et épigénétiques. Par conséquent, des informations appartenant à d'autres domaines d'étude que l'hydrogéologie "pure" pourraient avoir des implications hydrogéologiques et influencer significativement le programme de recherche de l'ANDRA.

Pour réduire la complexité de l'information hydrogéologique et des informations éventuellement importantes pour l'hydrogéologie, nous avons limité notre évaluation du

programme scientifique de l'ANDRA aux aspects étroitement liés à son modèle conceptuel.

Un programme de forage profond visant à fournir des informations hydrogéologiques sur la zone de Bure, en complément de celles provenant des forages aux trois emplacements mentionnés à la section 5.4, a commencé en 2002. Le programme d'investigations in-situ dans les forages et d'échantillonnage dans le laboratoire n'est pas connu en détail. C'est particulièrement vrai pour les essais in-situ sur la conductivité hydraulique ou la pression hydraulique (numéro, profondeur, longueur, position stratigraphique et pétrofaciales des sections testées, etc.). Par ailleurs, les résultats de ces recherches ne sont pas disponibles jusqu'à maintenant.

Notre évaluation porte sur les questions suivantes :

- le programme sera-t-il mené en fonction de l'état des connaissances et des techniques ? (Section 5.6.2),
- le modèle hydrogéologique conceptuel de l'ANDRA pour décrire l'écoulement des eaux souterraines sur le site de Bure et pour l'évaluation à long terme du transport potentiel de radionucléides du site de stockage à la biosphère est-il plausible ? (Section 5.6.3),
- les connaissances et la compréhension des caractéristiques pertinentes des argilites et des processus associés sont-elles suffisantes ? (Section 5.6.4),
- la base de données est-elle suffisante pour permettre l'évaluation des propriétés de confinement du Callovo-Oxfordien, notamment la validation des modèles conceptuels et mathématiques ? Le programme hydrogéologique est-il conçu de façon à combler les lacunes dans les connaissances et la base des données, pour permettre la validation et l'évaluation des incertitudes et du caractère pénalisant des modèles et des résultats ? (Section 5.6.5),
- la base scientifique est-elle suffisamment rigoureuse pour transposer les résultats des investigations prévues à la zone équivalente de transposition ? (Section 5.6.5).

Les recommandations sur le programme scientifique hydrogéologique découleront des différences identifiées entre l'approche de l'ANDRA et les expérimentations considérées comme essentielles ou utiles. Une évaluation détaillée pour démontrer la conformité réglementaire des résultats obtenus jusqu'ici avec les critères hydrogéologiques de la Règle fondamentale pour la sélection du site dépasse le cadre de notre évaluation. Nous centrons notre étude sur les argilites du Callovo-Oxfordien.

Les thèmes qui suivent ne seront pas traités dans l'évaluation hydrogéologique, même s'ils ont, ou peuvent avoir une certaine importance à long terme pour la situation hydrogéologique dans le « champ lointain » du stockage envisagé.

- la production de gaz à partir des déchets du point de vue des effets de la pression de gaz accrue de manière « critique » sur la fonction de barrière des roches argileuses, et du milieu hydro-chimique autour des zones de stockage des déchets,
- les effets géomécaniques et thermiques liés au creusement et à la mise en place des déchets, et leurs effets éventuels sur les propriétés hydrauliques de la roche hôte dans le « champ lointain ».

Ces aspects sont partiellement traités dans les chapitres 4, 2 et 3.

5.6.2 Etat des connaissances et des techniques

Bien qu'on ne dispose pas d'informations détaillées sur les recherches hydrogéologiques en cours pendant le programme de forage actuel, on peut supposer que l'ANDRA utilise une approche similaire à celle qui a procédé la campagne de forage profond, mais l'a adapté aux avancées des techniques et des instruments de mesure. On peut donc supposer que les recherches, en ce qui concerne la méthodologie et les investigations hydrogéologiques, sont effectuées avec des moyens techniques de haut niveau, en fonction de l'état des connaissances.

L'ANDRA participe à plusieurs projets internationaux qui traitent de certains aspects hydrogéologiques pertinents pour le stockage ultime des déchets radioactifs en général, et dans des formations argileuses en particulier. L'ANDRA participe activement aux expérimentations qui sont menées dans des laboratoires souterrains déjà créés, en particulier ceux du Mont Terri et de Mol. A ce jour, l'information présentée par l'ANDRA dans ses descriptions détaillées de l'hydrogéologie de Bure, notamment le Référentiel Géologique et le Dossier 2001 Argile, a été acquise avec des techniques de pointe. Quand ces techniques ne sont pas disponibles, l'ANDRA contribue au développement d'une méthodologie et de techniques sophistiquées pour l'acquisition de données.

L'approche scientifique pour déterminer et évaluer les propriétés du confinement du Callovo-Oxfordien et du transport des solutés dans les formations aquifères sus- et sous-jacentes telle qu'elle est présentée dans ANDRA 2001 et ANDRA 2002-2005³³⁰ ainsi que les spécifications du programme semblent être très diversifiées. On peut s'attendre à ce que les résultats de l'ANDRA permettent de répondre aux questions hydrogéologiques résultant des exigences géologiques et méthodologiques de la Règle fondamentale. Il faut en particulier noter, en ce qui concerne l'écoulement régional des eaux souterraines, l'intégration dans le modèle de tout le bassin de Paris. Une attention spéciale est portée sur l'origine et, en particulier, la diagenèse du Callovo-Oxfordien et des formations encaissantes directes, y compris les processus mis en jeu, et leur influence sur la variabilité des propriétés de transport. A ce jour, il n'est pas possible d'évaluer de manière définitive, dans quelle mesure les modifications du programme qui ont été introduites en

³³⁰ Dossier 2001 Argile et ANDRA 2002-2005, chapitre II

réponse au retard pris par les expérimentations souterraines, pourront être considérées comme équivalentes du point de vue de la fiabilité et de la représentativité des résultats. L'interprétation des résultats repose sur une base scientifique rigoureuse. La participation à la recherche de l'ANDRA de plusieurs établissements scientifiques permet de s'assurer que différentes options scientifiques seront introduites sur les sujets les plus importants. Plusieurs thèses sur des sujets scientifiquement pertinents ont été faites ou sont en cours en coopération avec l'ANDRA. Cependant, il est parfois difficile de suivre comment l'ANDRA passe des résultats de la recherche à des jugements relatifs à la sûreté, tout d'abord parce que l'information est répartie entre un grand nombre de publications scientifiques détaillées plutôt que rassemblée dans des présentations synthétiques.

Il semble que l'ANDRA ait suivi une approche quelque peu restrictive sur certaines questions hydrogéologiques pertinentes relatives à la sûreté. Il est crucial de prendre en compte l'interdépendance des propriétés hydrogéologiques et géomécaniques avec les propriétés hydrauliques les plus importantes, en particulier la perméabilité/conductivité hydraulique **in-situ**. Le Dossier 2001 Argile et ANDRA 2002b ne permettent pas de savoir clairement si l'ANDRA a accordé aux données in-situ pertinentes l'attention qu'elle mérite pour démontrer que les données disponibles peuvent être transposées à la zone équivalente de transposition, et aussi pour conclure que les propriétés hydrauliques du Callovo-Oxfordien sont adéquates à n'importe quel endroit de la zone équivalente de transposition. Il en est de même pour la discussion au sujet de la présence possible d'hétérogénéités qui pourraient altérer la qualité de rétention du Callovo-Oxfordien. Elle recoupe tout particulièrement la question de la pertinence des fractures de différentes tailles et des hétérogénéités sédimentaires pour les propriétés de rétention du Callovo-Oxfordien. C'est une question d'une importance cruciale pour la démonstration des propriétés de confinement de la couche hôte.

5.6.3 Plausibilité du modèle conceptuel de l'ANDRA

Le modèle conceptuel de l'ANDRA postulant le transport diffusif des solutés à travers le Callovo-Oxfordien³³¹ et le transport par convection dans les sédiments sus- et sous-jacents est plausible. Les arguments présentés pour appuyer la thèse de la migration diffusif dans le Callovo-Oxfordien sont, en général en conformité avec

- les connaissances scientifiques actuelles sur des propriétés pertinentes des roches argileuses en général (section 5.6.4) et
- les résultats hydrogéologiques du site de Bure et dans les environs montrant clairement la faible perméabilité de la couche hôte (section 5.4.2).

Cependant, la démonstration actuelle de la migration diffusif n'est pas convaincante. Il existe plusieurs points qui n'ont pas encore été pris en compte ou démontrés de façon

³³¹ voir Section 5.5

assez approfondie pour diminuer des incertitudes ou pour exclure toute possibilité d'écoulement non diffusif. Ces points sont les suivants :

- la variabilité latérale et verticale de la conductivité hydraulique de la pression de l'eau et leurs interdépendances et causes,
- la pertinence de la composition du Callovo-Oxfordien et de sa variabilité latérale et verticale pour la conductivité hydraulique in-situ en particulier pour les sections plus riches en carbonates,
- la pertinence des fractures de différentes tailles,
- la communication hydraulique entre différents types d'hétérogénéités de conductivité hydraulique potentiellement plus élevées, par exemple des couches plus riches en carbonates, des plans de stratifications et des zones de fracture,
- la formation, ainsi que l'extension d'une structure hydraulique de la zone de surpression, y compris la pertinence des hétérogénéités de différentes tailles (section 5.6.5),
- indicateurs de l'extension de la zone de surpression, elle-même étant un indicateur d'une faible perméabilité.

En raison de ces incertitudes il est nécessaire de valider le modèle conceptuel en utilisant des séries de données indépendantes de celles qui sont pertinentes pour le modèle même (voir la section 5.6.5).

5.6.4 Connaissances relatives aux propriétés des roches argileuses consolidées

5.6.4.1 Propriétés et caractéristiques pertinentes

En termes généraux et simplifiés, l'intérêt des argilites, comme celles du Callovo-Oxfordien du site de Bure, comme roche hôte pour le stockage ultime des déchets radioactifs réside dans leur faible perméabilité (ainsi que leur faible porosité effective) et leur capacité de rétention, en particulier par sorption. Comme l'ANDRA le suppose pour le site de Bure, étant donné que la perméabilité est suffisamment faible, la diffusion plutôt que la convection est probablement le type de transport des radionucléides dans les formations encaissantes directes.

La capacité des argilites à servir de barrière efficace au transport par convection des fluides et même des gaz est en général bien connue. Elle peut être déduite de l'existence de certains types de gisements de pétrole et de gaz. L'efficacité avec laquelle les argilites peuvent effectivement séparer différentes formations d'eaux souterraines est un autre exemple. D'un autre côté toutes les formations argileuses ne possèdent pas ces propriétés à un degré suffisant pour assurer un confinement géologique. Cependant, l'identification et la caractérisation d'un site sont compliquées par le fait qu'il n'existe pas de critères permettant de déterminer simplement, à partir de la fourchette des résultats obtenus par

les investigations sur le terrain, si le processus important est la migration diffusive ou le transport convectif.

La Règle Fondamentale III.2.f (section 5.2) exige une très faible perméabilité et un faible gradient hydraulique pour la couche hôte, mais elle ne propose pas de critères quantitatifs pour y répondre³³². Le Comité allemand sur le processus de sélection d'un site (AkEnd) propose, sans viser un type de roche particulier, que la couche isolante entourant le site de stockage présente un champ de conductivité hydraulique (in situ) inférieure à 10^{-10} m/s et une épaisseur de 100 m minimum³³³. Pour pouvoir comparer différents sites pendant le processus de sélection le comité a classé les formations rocheuses comme "favorables" si leur champ de conductivité hydraulique est $<10^{-12}$ m/sec ou "relativement favorables" s'il est entre 10^{-12} et 10^{-10} m/sec. Une conductivité hydraulique inférieure à 10^{-12} m/sec est considérée comme une indication de diffusion plutôt que de transport convectif. L'isolement des zones rocheuses de moindre perméabilité et de plus grande épaisseur, conformément aux exigences minimum, ou assurée par l'isolement des zones rocheuses d'autres sites, offre évidemment une certaine réserve de sécurité.

En ce qui concerne la comparaison de différents sites candidats de stockage l'AkEnd a indiqué des formations avec des coefficients de diffusion inférieurs à 10^{-11} m²/sec comme "favorables", de 10^{-11} à 10^{-10} m²/sec comme "relativement favorables" et supérieurs à 10^{-10} m²/sec comme "moins favorables"³³⁴.

Cependant, il ne suffit pas qu'un site réponde à tous les critères "favorables" indiqués par l'AkEnd pendant le choix du site pour qu'il soit réellement adapté ou respecte les exigences légales. Il semblerait que ce soit le cas pour le site de Bure. Bien que le coefficient de diffusion postulé pour le scénario d'évolution normale soit dans le domaine des coefficients de diffusion "favorables" de l'AkEnd, la performance du site estimée de façon préliminaire dans le Dossier 2001 Argile ne répond pas à la norme requise par la Règle III.2.f³³⁵. En conclusion, dans ces circonstances, l'épaisseur de 100 m, ou même supérieure à 130 m, du Callovo-Oxfordien n'apporterait plus aucune marge de sûreté. Elle ne suffirait même pas à assurer la sûreté nécessaire. Naturellement, ces remarques sont faites à titre de comparaison et nous admettons que l'ANDRA considère que les calculs sont pénalisants.

La perméabilité et la porosité effective des roches argileuses légèrement consolidées du Callovo -Oxfordien de Bure, ne dépendent pas seulement de leurs propriétés "primaires". Les propriétés « primaires » se sont formées durant le dépôt sédimentaire, et ensuite par le processus de diagenèse. Les propriétés géomécaniques sont aussi particulièrement importantes. Elles dépendent elles-mêmes de la composition minéralogique et granulométrique de la formation, de son degré de consolidation, induit par la compaction sous le poids des dépôts sus-jacents ou la décompaction des roches par l'érosion, ainsi que de l'état de contraintes tectoniques spécifique au site. Dans ce contexte, il est

³³² voir Section 5.2

³³³ AKEND 2002, chapitre 4.1.3

³³⁴ AKEND 2002, Tableau 4.3

³³⁵ see Chapter 1; CNE 2002; ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.A, p. 134

important de noter qu'il n'existe pas de massifs rocheux importants qui soient homogènes et se composent uniquement d'argile quand la taille des grains et la composition minéralogique sont toutes les deux prises en compte. La plupart des roches argileuses sont des mélanges composés de fractions différentes de taille de grain et de différentes phases minéralogiques. Cela signifie que l'influence de la variabilité spatiale de la composition sur les propriétés hydrauliques doit être prise en compte dans l'évaluation de la couche hôte. C'est également vrai pour les modifications épigénétiques des propriétés pertinentes pour l'hydrogéologie par la contrainte tectonique, en particulier la formation de fractures à différentes échelles, et les fissures liées à l'activité humaine.

La représentativité spatiale des données hydrauliques des roches de faible perméabilité comme le Callovo-Oxfordien du site de Bure, est insuffisante même si elles sont obtenues par des forages in situ. En effet, du fait de la faible perméabilité, la masse rocheuse affectée par un essai hydraulique et lui répondant, est très réduite. Par conséquent, les indicateurs des propriétés hydrauliques in-situ qui peuvent être obtenues plus facilement et avec plus de représentativité doivent être employés pour s'assurer que les propriétés hydrauliques nécessaires peuvent être trouvées non seulement à proximité du forage examiné mais dans une zone plus étendue. Dans le cas de Bure cette zone est au moins de la taille de la zone équivalente de transposition.

Suivant la situation locale, différentes propriétés et caractéristiques pétrographiques et géochimiques des roches argileuses peuvent servir d'indicateurs pour leurs propriétés hydrauliques in-situ. Un examen des effets des différentes compositions et des effets diagénétiques et épigénétiques selon leurs degrés d'importance montre que les indications suivantes sur la **perméabilité relativement élevée et/ou la porosité effective** des formations argileuses doivent être prises en compte

- faible teneur en argile,
- faible teneur en minéraux argileux gonflants (en particulier la smectite),
- forte teneur en carbonates. Elle peut agir sur la porosité et le diamètre des pores, fragiliser la roche et donc créer des cassures ouvertes de différentes tailles, des fissures et des diaclases (également en fonction du type et du degré de contrainte tectonique),
- teneur élevée en argiles silteuses et/ou en quartz. Elle peut engendrer une augmentation du diamètre des pores, de la perméabilité et de la porosité accessible.

Pour une composition donnée, les effets de tous ces facteurs dépendent de la répartition des carbonates et/ou des argiles silteuses dans la formation et donc de sa texture. La dispersion de la répartition des carbonates et/ou des argiles silteuses dans la roche n'affectera pas les propriétés mécaniques de la même manière et au même degré que leur enrichissement dans les couches ou les intercalations. C'est le cas pour les roches argileuses du crétacé inférieur sur le site de stockage de Konrad en Allemagne. Dans ce site, malgré une teneur globale plus faible en carbonates, la nature cassante des couches dont la teneur en carbonates est plus élevée a engendré une perméabilité plus élevée par

rapport à celles dont la teneur en carbonates est plus élevée, mais dispersée³³⁶. Outre la concentration et le type de répartition des hétérogénéités minéralogiques ou granulométriques, bien sûr, la connectivité de ces zones de perméabilité éventuellement accrue joue un rôle dans leur importance pour le mouvement des eaux souterraines et le transport des solutés.

Les caractéristiques suivantes ne sont liées qu'indirectement à la conductivité hydraulique mais peuvent être néanmoins interprétées comme indicatrices d'une perméabilité élevée :

- une faible profondeur. Elle indique un faible degré des effets de compaction et des effets diagénétiques ou épigénétiques sur la composition minéralogique, mais par contre elle indique une porosité relativement élevée ou la décompression des roches compactes (par exemple en raison de l'érosion) et la formation ou l'ouverture de fractures latentes qui en résultent.
- une forte charge thermique s'étant produite dans le passé géologique qui aurait pu sensiblement changer les propriétés mécaniques de la roche (fragilité accrue) et entraîner des fractures ouvertes en réponse à une contrainte tectonique supplémentaire,
- l'existence de fractures isolées ou d'un réseau relié (ouvert) de fractures de différentes tailles (fissures, diaclases) engendrées par la contrainte tectonique actuelle ou passée ou liée aux activités humaines.

Pour ces mêmes raisons, il est possible que les formations qui ne possèdent pas ces propriétés ou les possèdent à un moindre degré présentent une perméabilité et une porosité effective relativement faibles. Des exemples elucidant l'influence de certains de ces facteurs sur la perméabilité des formations argileuses sont présentés dans Appel et Habler³³⁷.

Ces dernières 10 à 15 années, au cours des recherches détaillées sur l'aptitude de différentes formations argileuses pour le stockage ultime des déchets radioactifs, quelques indicateurs supplémentaires sur la faible perméabilité d'une formation de roche argileuse ont été identifiés et étudiés (par exemple : les argiles Opalinus du site de Benken, Suisse³³⁸) :

- L'existence d'une zone significative de surpression dans la formation, concernant aussi bien la situation hydrostatique attendue que les pressions plus basses dans les formations hydrogéologiques sus- et sous-jacentes, particulièrement les couches aquifères, s'opposant au transport par convection des solutés à travers la formation,
- Des profils hydrochimiques et isotopiques caractéristiques à travers la formation dont l'interprétation montre un transport diffusif plutôt que convectif.

³³⁶ Appel & Habler 2002, Tableau 7-30

³³⁷ Appel & Habler 2002, chapitre 7.2.5

³³⁸ NAGRA 2002, chapitre 4.2.5

A ce jour les processus contrôlant la formation de pressions anormales ne sont pas bien compris.³³⁹ Leur quantification est difficile parce que les paramètres pertinents ne sont pas bien connus (par exemple la conductivité hydraulique à grande échelle et sa dépendance vis-à-vis du gradient hydraulique, l'efficacité osmotique). Les processus les plus fréquemment évoqués pour expliquer les pressions anormales sont le couplage hydromécanique (par exemple la compaction due à l'augmentation des terrains de recouvrement, la décompression due à l'érosion ou à la fonte des glaciers) et le couplage géochimique (osmose).

Au site de Benken en Suisse, où le degré de compactage de l'argilite Opalinus est analogue à celui du Callovo-Oxfordien de Bure, la surpression est interprétée comme le résultat de l'évolution d'un enfouissement-soulèvement. Etant donné que ce processus prend beaucoup de temps, la présence d'une zone de surpression peut être interprétée comme un indicateur de la faible perméabilité à long terme. L'aspect le plus significatif qui pourrait affecter cette situation est la présence de fractures, hydrauliquement actives mais ne pouvant pas être détectées par des investigations, comme par exemple les campagnes sismiques 3D.³⁴⁰

5.6.4.2 Callovo-Oxfordien de Bure

Une charge thermique élevée dans le passé et une faible profondeur n'apparaissent pas comme des facteurs pouvant avoir des conséquences significatives sur les propriétés hydrauliques du Callovo-Oxfordien argileux sur le site de Bure (voir Section 5.4). Selon les résultats disponibles pour les investigations in-situ et en laboratoire (voir Section 5.4.2.3), la matrice de roches argileuses semble présenter une très faible conductivité hydraulique. Cependant, les hétérogénéités ou les discontinuités de différents types et dimensions posent un problème majeur, parce qu'elles peuvent augmenter localement la conductivité hydraulique et réduire le développement spatial de la "zone homogène de faible perméabilité" qui est recherchée :

- La variabilité verticale et latérale de la teneur en minéraux en général, et en particulier du pourcentage de minéraux d'argile gonflante, résultant peut-être de l'existence de plans de stratification et d'autres interfaces entre les masses rocheuses de composition différente qui présentent une importance pour l'hydrologie.
- la variabilité verticale de la teneur en carbonates. En raison de la formation et de l'existence de fractures dans des sections enrichies en carbonates, elle influence le comportement mécanique de la formation et, indirectement, la conductivité hydraulique,
- l'existence de fractures hydrauliquement actives.

³³⁹ OECD-NEA 2003

³⁴⁰ NAGRA 2002

Un travail exhaustif a été effectué par l'ANDRA ou pour l'ANDRA sur la variabilité latérale et verticale des facteurs pétrographiques et géomécaniques.³⁴¹ La pertinence hydraulique de ces variabilités ne peut pas être évaluée sans établir de distinction entre les zones pétrographiques et géomécaniques. D'après l'état des travaux rapporté dans le Dossier 2001 Argile et le Référentiel Géologique, l'ANDRA ne l'a pas encore fait en ce qui concerne les propriétés hydrauliques in-situ. L'orientation et la longueur des échantillons dans les forages HTM 102 et MSE 101 ne permettent même pas une corrélation entre la composition de la roche, les propriétés mécaniques et la perméabilité, puisque les longueurs des échantillons examinés ne correspondent pas aux segments géomécaniques. La corrélation entre ces propriétés et la conductivité hydraulique, n'a donc pas été encore suffisamment démontrée.³⁴²

Les indicateurs de faible perméabilité et de diffusion à long terme au site de Benken mentionnés ci-dessus sont aussi importants pour Bure. L'osmose est considérée comme un facteur important pour la formation de la zone de surpression dans le Callovo-Oxfordien.³⁴³ De plus, la question de l'importance des fractures sur la perméabilité est similaire à celle qui se pose pour le site de Benken.

Pour le Callovo-Oxfordien de Bure l'importance éventuelle des fractures est particulièrement évidente, parce que

- les fractures dans les formations hydrogéologiques situées au-dessus du Callovo-Oxfordien indiquent que la contrainte tectonique a eu/a encore une incidence sur le Callovo-Oxfordien (Section 5.6.5.2.) et que l'existence de fractures au sein du Callovo-Oxfordien ne peut être simplement exclue,
- les différences significatives entre les pressions hydrauliques des calcaires du Dogger et de l'Oxfordien³⁴⁴ permettraient un transport vertical des solutés, étant donné que la perméabilité est suffisante le long de ces discontinuités verticales.

Les indicateurs hydrochimiques et isotopiques du Callovo-Oxfordien de Bure indiquent une diagénèse complexe avec un échange limité entre les minéraux et les fluides, et la préservation d'une signature isotopique initiale³⁴⁵. Par contre il y a pas d'indications qu'un changement dans la composition de l'eau primaire se soit produit³⁴⁶. Jusqu'à maintenant, aucun profil de concentration typique d'une migration diffusive depuis le Callovo-Oxfordien dans les couches sous et sus-jacentes n'a été identifié pour un quelconque constituant des eaux souterraines.

En conclusion, il faudra démontrer la possibilité de transposer les résultats de la surpression ainsi que des signatures diffusives typiques d'autres sites à celui de Bure, ceci

³⁴¹ par ex. CLARET et al. 2002

³⁴² voir Section 5.6.5.1

³⁴³ ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001, chapitre III.1.2.3

³⁴⁴ voir Figure 5-3

³⁴⁵ ROUSSET et al. 2002, LAVASTRE et al. 2002

³⁴⁶ LAVASTRE et al. 2002

dans le contexte la formation d'une zone de surpression et de ses caractéristiques. Cette démonstration n'a pas été encore faite. En son absence, les indicateurs d'une faible perméabilité prévue à long terme de la roche hôte doivent être déduits de la recherche sur le site.

5.6.5 Données hydrogéologiques de base et programme de recherche

5.6.5.1 Exigences générales

Pour l'évaluation hydrogéologique d'un site de stockage, la base de données requise pour le transport potentiel de radionucléides du site de stockage à la biosphère doit être plus développée que celle servant à la formulation d'un modèle conceptuel des propriétés de rétention d'un site et de la situation générale de transport.³⁴⁷ Cette démarche est essentielle pour une modélisation fiable.

Les données sur la perméabilité et la conductivité hydraulique doivent être acquises principalement par des expérimentations in situ. Généralement, ces données sont recueillies grâce à des mesures utilisant différentes techniques dans les forages. Les résultats de ces mesures doivent fournir des informations intégrées pour l'ensemble des formations ou pour des segments importants. Ils doivent également fournir des informations détaillées sur les propriétés pertinentes de sections plus petites si celles-ci existent.

Cependant, pour des roches de faible perméabilité comme le Callovo-Oxfordien, même des données hydrauliques in-situ ont une représentativité spatiale réduite (Section 5.6.4.1). Par conséquent, il est méthodologiquement difficile de démontrer et de vérifier l'existence de l'extension spatiale de la zone équivalente de transposition et de la qualifier de « zone homogène de faible perméabilité » (Section 5.6.4.2). Comme les roches argileuses naturelles présentent des propriétés et des caractéristiques plus ou moins favorables, il est essentiel de ne pas se borner à évaluer les propriétés et caractéristiques désirées mais aussi celles qui pourraient éventuellement compromettre la faisabilité de la formation concernée ou réduire sa proportion avec des propriétés positives.

Si l'existence de ces propriétés ou caractéristiques ne peut être exclue a priori, il faut analyser leur importance autant que les propriétés ou caractéristiques recherchées pour réduire les incertitudes liées à l'extension et à la qualité de la « zone homogène de faible perméabilité » recherchée. Les principaux objectifs des recherches hydrogéologiques du Callovo-Oxfordien de Bure sont donc de :

³⁴⁷ voir Section 5.5

- démontrer et vérifier aussi précisément que possible l'existence des propriétés recherchées par des investigations in-situ à l'intérieur de la zone équivalente de transposition,
- démontrer l'absence de caractéristiques ou de propriétés négatives, comme des sections particulières de la séquence, des plans de stratification ou des fractures présentant une augmentation potentielle de la conductivité hydraulique ou,
- démontrer au moins que ces propriétés et caractéristiques ne vont pas nuire à la sûreté du stockage prévu.

Les données de laboratoire sur la conductivité ou la perméabilité hydraulique fourniront des informations supplémentaires permettant de décrire les différences hydrauliques potentielles concernant les différentes échelles d'observation. Pour le Callovo-Oxfordien par exemple, l'ANDRA a relevé que la conductivité hydraulique in situ est supérieure de deux ordres de grandeur aux valeurs obtenues sur les échantillons dans le laboratoire³⁴⁸. Pour beaucoup de types de roche, même pour les formations argileuses, les différences entre les conductivités hydrauliques obtenues par essais in situ et l'analyse en laboratoire sont encore plus grandes. Cependant, avant de pouvoir utiliser les résultats des données de laboratoire sur la perméabilité comme indicateurs quantitatifs pour la perméabilité in-situ, les raisons d'une telle relation quantitative et les conditions de validité de cette corrélation doivent être comprises. Jusqu'à présent, l'ANDRA n'a fourni des interprétations probables que sur cette relation³⁴⁹.

Pour pouvoir décrire quantitativement les processus de migration et de transport, il faut obtenir des données sur des paramètres supplémentaires. Pour évaluer la diffusion prévue à travers les roches argileuses du Callovo-Oxfordien, il faut disposer de données de diffusion in-situ en plus des données existantes sur les coefficients de diffusion effectifs des échantillons.

Pour évaluer la vitesse et la direction du transport par convection, il faut connaître la porosité efficace des formations hydrogéologiques et la distribution des charges hydrauliques. Il faut aussi connaître leur géométrie et leur configuration, ainsi que l'emplacement des zones d'alimentation et des exutoires des eaux souterraines. Il faut également connaître la situation hydrochimique et la rétention des solutés par des processus chimiques et de sorption (coefficient de partition, K_d). En conclusion, l'importance des hétérogénéités, qu'elles soient sédimentaires ou tectoniques, doit être évaluée. L'objectif principal du programme de recherche en ce domaine est de fournir des données qualitativement suffisantes et représentatives sur les propriétés importantes des éléments concernés pour permettre la description et l'évaluation des voies de transfert depuis le stockage envisagé jusqu'à la biosphère.

5.6.5.2 Le programme de recherches de l'ANDRA

Les résultats des mesures in situ dans les forages et des analyses de laboratoire constituent la base pour le développement et la consolidation du modèle conceptuel de

³⁴⁸ ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001, chapitre III.1.3.4

³⁴⁹ ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001, chapitre III.1.3.4

l'ANDRA sur le transport des solutés à travers le Callovo-Oxfordien et les formations sus- et sous-jacentes³⁵⁰. D'une manière générale, la majeure partie des données hydrogéologiques spécifiques au site ou près du site présentées dans le Référentiel Géologique et le Dossier 2001 Argile ont été obtenues à partir des forages de l'ANDRA : HTM 102, à environ 3 km au sud-est du site, et MSE 101, à 12 km au nord-ouest de Bure. Ces forages traversent le Callovo-Oxfordien et fournissent des informations sur les formations sous-jacentes. Les forages sur le site (par exemple EST 103/104) s'arrêtent au milieu du Callovo-Oxfordien. Il existe des forages plus profonds de l'industrie pétrolière mais ils sont à plus de 15 km du site. Etant donnée la situation tectonique près des systèmes de grabens et des autres structures importantes, il n'est pas évident que leurs situations hydrologiques par rapport au site de Bure puissent fournir des informations pertinentes³⁵¹.

Des campagnes sismiques dans la zone de Bure ont révélé l'existence de failles verticales avec un rejet mineur, mais cependant « visible » dans certains cas, à travers le Callovo-Oxfordien. L'ANDRA a interprété ces données sismiques comme un indicateur de l'absence de failles qui joueraient un rôle important dans l'écoulement vertical des eaux souterraines et le transport par convection des solutés à travers le Callovo-Oxfordien.

Le programme scientifique de l'ANDRA jusqu'à 2001 et 2002 pour améliorer les connaissances et la base de données hydrogéologiques, en particulier celles nécessaires pour la modélisation de l'écoulement des eaux souterraines et le transport des solutés, est décrit dans le Dossier 2001 Argile et de façon plus approfondie et détaillée dans ANDRA (2002b). Il vise à améliorer la compréhension des relations entre les paramètres stratigraphiques, pétrographiques, géomécaniques et hydrauliques essentiels à l'évaluation des propriétés de confinement du Callovo-Oxfordien, ainsi que la base de données servant à la modélisation des eaux souterraines³⁵².

Conformément à ce programme des forages profonds supplémentaires ont été réalisés, ou sont en cours de réalisation, à des endroits sélectionnés dans le secteur de Bure. Les emplacements ont été choisis en fonction des besoins de la modélisation hydrogéologique et de l'amélioration de la corrélation des profils sismiques avec le détail de la séquence stratigraphique identifiée dans les forages.

Le programme a été modifié à la suite des résultats apportés par ces forages³⁵³. De plus, à la suite de l'accident mortel de 2002, la CNE³⁵⁴ a suggéré un changement dans le programme des forages. Depuis, des forages déviés profonds ont été effectués en 2003/2004 sur le site lui-même. Un des objectifs est d'étudier des phénomènes de structure qui devaient être étudiés dans le laboratoire³⁵⁵.

³⁵⁰ voir Section 5.5

³⁵¹ ANDRA Référentiel Géologique Tome 2, 2001, figure 2.1-01

³⁵² ANDRA 2002a

³⁵³ ANDRA 2003e

³⁵⁴ CNE 2003, p. 31

³⁵⁵ ANDRA 2003a, 2003d

Les informations détaillées sur le programme de forage et les résultats hydrogéologiques de la campagne de forage, en particulier les données sur la perméabilité et les pressions hydrauliques à l'intérieur des éléments hydrogéologiques concernés, ne sont pas encore disponibles. Selon l'ANDRA elles n'apportent aucune surprise.³⁵⁶

Les objectifs des forages déviés sur le site de Bure comportent une recherche sur une linéation "secondaire" et les diaclases dans le Dogger et probablement dans le Callovo-Oxfordien, ainsi qu'une zone de fracture potentielle dans le Callovo-Oxfordien. La détermination du champ de contrainte est aussi un objectif³⁵⁷. Les mesures in situ de la perméabilité hydraulique et de la pression hydraulique dans les forages, ainsi que la diagraphe géophysique ne sont pas mentionnées explicitement mais ont été/ou seront réalisées avec les moyens perfectionnés adéquats.

5.6.5.3 Évaluation du programme

La campagne de forage actuellement en cours permettra d'améliorer considérablement les données hydrogéologiques. Les forages déviés offriront en particulier la possibilité d'obtenir des informations sur les éléments structuraux de tailles différentes et à des distances différentes entre elles. Mais, malgré l'utilité de ces données, on peut se demander, à partir des objectifs connus pour les forages et des emplacements des forages, si les problèmes ou les questions suivantes reçoivent une réponse suffisante :

- La représentativité spatiale des données à partir d'un petit nombre de forages, même in situ, est très limitée et exige une transposition au moyen d'indicateurs appropriés (Section 5.6.5.1). L'ANDRA utilisera (ou utilise) des paramètres pétrographiques et géomécaniques pour l'interpolation et l'extrapolation des propriétés de rétention de la séquence verticale des sections individuelles du Callovo-Oxfordien à la zone équivalente de transposition. Cependant, le Référentiel Géologique, ne contient pas de données in situ ou de laboratoire sur la perméabilité qui peuvent être corrélées avec les propriétés de différentes zones géomécaniques et de pétrofaciès, parce que les intervalles des essais in situ ne se rapportaient pas à ces zones. Les informations relatives aux forages profonds récents ou prévus ne permettent pas de déterminer l'importance qui est accordée à l'acquisition de données in situ à partir de ces éléments et de ces éléments spécifiques pour permettre une corrélation avec les données de géomécanique et de pétrofaciès issues des recherches sur échantillons. Si une utilisation des résultats des recherches sur échantillons est envisagée, la compréhension quantitative de la relation entre les mesures in situ et sur échantillons doit être établie.

Autrement, l'ANDRA devra démontrer que la variabilité verticale des valeurs in situ de la perméabilité dans un forage donné et la distribution latérale dans différents forages est aléatoire ou a pour cause des processus non hydrauliques.

³⁵⁶ ANDRA 2003c

³⁵⁷ ANDRA 2003a et ANDRA 2003b

- Des indicateurs supplémentaires de la prédominance de la migration diffuse des solutés dans le Callovo-Oxfordien doivent être identifiés et leur capacité à révéler l'existence d'une zone importante de faible perméabilité doit être vérifiée. Ces indicateurs peuvent être la zone de surpression et la distribution spatiale des constituants des eaux souterraines Callovo-Oxfordien et des formations hydrogéologiques sus- et sous-jacentes, en particulier du chlore ou des isotopes environnementaux. Certains de ces indicateurs ont, dans une certaine mesure, déjà été étudiés. Ils ont fourni quelques informations sur l'évolution diagénétique du Callovo-Oxfordien et des temps de séjour probables des eaux souterraines, mais sans mettre en évidence une tendance claire.³⁵⁸
- Il y a un manque de données in situ sur la perméabilité des différentes zones géomécaniques du Callovo-Oxfordien qui présentent une teneur plus élevée en carbonates (par exemple la zone géomécanique D). Ces zones, ou des sections particulières de celles-ci, peuvent être plus fragiles et peuvent donc présenter une perméabilité plus élevée par rapport aux zones plus faibles en carbonates. Cela pourrait être vrai également pour les plans de stratification. Si cela est le cas et si elles sont reliées aux fractures hydrauliquement actives, ces hétérogénéités pourraient faire partie d'une voie composite ouverte au transport local par convection des solutés.
- La distance "normale" entre les fractures qui traversent verticalement le Callovo-Oxfordien (et les formations voisines) est de quelques mètres³⁵⁹, ce qui rend difficile leur identification dans les forages verticaux. Le petit nombre de fractures identifiées jusqu'ici, n'exclut pas l'existence de fractures hydrauliquement significatives. Celles-ci peuvent être présentes et doivent être hydrauliquement étudiées par des forages déviés. Ces mesures devraient être faites dans la mesure des possibilités techniques.
- La formation des fractures et les variations pétrographiques et géomécaniques des argilites du Callovo-Oxfordien sont indépendantes les unes des autres. De plus les données hydrauliques in situ ayant une faible représentativité spatiale, il ne sera, par conséquent, pas possible d'exclure l'existence de fractures dans la zone de transposition équivalente par une simple transposition des propriétés pétrographiques et mécaniques indicatives. Il faut en revanche admettre qu'il puisse exister des fractures de petites tailles et/ou d'orientation défavorable difficiles à étudier. Il faut évaluer leur importance pour l'écoulement des eaux souterraines. Leur structure et leur perméabilité/transmissivité, ainsi que leur intégration dans la modélisation des eaux souterraines doivent être déterminées correctement.
- A partir des pressions hydrauliques très proches mesurées dans les calcaires du Dogger des forages HTM 102 et MSE 101³⁶⁰, il semble difficile de décrire

³⁵⁸ voir Section 5.6.4

³⁵⁹ ANDRA 2002-2002, page 36

³⁶⁰ voir Tableau 5-1 et Figure 5-3

exactement les directions de l'écoulement des eaux souterraines dans les parties nord, nord-ouest de la zone équivalente de transposition. L'ANDRA ne semble pas envisager de faire des forages supplémentaires dans cette zone. Un forage profond, au minimum, dans cette zone ou à l'extérieur de la zone équivalente de transposition pourrait améliorer la compréhension de l'écoulement des eaux souterraines. On obtiendrait également, en plus des données acquises par des méthodes "indirectes" (campagnes sismiques), des données directes sur les propriétés hydrauliques du Callovo-Oxfordien extrapolables à la zone équivalente de transposition.

- A ce jour, peu d'informations sur les forages profonds à proximité du site de Bure semblent être disponibles sur la variabilité spatiale des propriétés des roches importantes pour le transport potentiel par convection des radionucléides dans les calcaires du Dogger et les formations au-dessus du Callovo-Oxfordien. Il semble que cela soit également vrai pour la situation hydraulique dans les formations situées entre le site et les exutoires potentiels des eaux souterraines. L'ANDRA devrait améliorer la base de données pour les paramètres indispensables à la modélisation du transport des solutés relatifs à la représentativité spatiale de la zone en question.

Les campagnes sismiques qui ont été effectuées dans la zone de Bure par l'ANDRA ou pour le compte de l'ANDRA ont jusqu'ici amélioré significativement la compréhension générale des variations verticales et horizontales des unités hydrogéologiques concernées et ont donné des éléments de compréhension sur l'existence ou l'absence de fractures importantes. Appliqués conjointement avec une diagraphie et une recherche sur échantillons elles représentent un outil puissant pour la subdivision de la séquence stratigraphique concernée et de la continuation de ses différentes sous-sections à l'intérieur de la zone de recherche. Dans ce domaine l'ANDRA a visiblement atteint un niveau de recherche très avancé.³⁶¹

Toutefois les campagnes sismiques ne constituent pas un outil puissant pour l'identification des structures verticales, en particulier des fractures/failles avec un petit rejet vertical. Par conséquent, les données sismiques existantes ne fournissent pas une base de données suffisante pour la description définitive et l'évaluation de la répartition des fractures de tailles différentes, leur orientation et leur éventuelle importance hydraulique³⁶² et ne permettent pas l'évaluation définitive de la situation hydraulique et hydrochimique et la modélisation définitive de l'écoulement des eaux souterraines. Selon l'état des recherches géophysiques de l'ANDRA telles que documentées dans le Référentiel Géologique et le Dossier 2001 Argile, d'autres techniques géophysiques qui peuvent présenter un meilleur potentiel pour la détection des structures verticales n'ont pas été utilisées ; de telles recherches ne sont en tout cas pas mentionnées dans les documents de l'ANDRA sur les recherches prévues qui sont évaluées ici³⁶³.

³⁶¹ ANDRA BET 2002, p. 30

³⁶² voir Chapitre 7

³⁶³ ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.A, ANDRA 2002-2005

5. 6.5.4. Aspects supplémentaires

Validation des modèles

La base de données améliorée par les recherches de l'ANDRA selon le programme modifié³⁶⁴ (section 5.6.5.1) sera probablement suffisante pour confirmer le modèle conceptuel sur la pertinence des mécanismes de transport dans la couche hôte et les calcaires du Dogger et de l'Oxfordien. Les connaissances sur les paramètres pertinents pour l'écoulement des eaux souterraines et sa modélisation seront améliorées.

Cependant, même si les insuffisances mentionnées dans la section 5.6.5.1 sont réduites, les incertitudes dans la base de données et les connaissances sur la direction et la vitesse d'un transport potentiel des radionucléides du site de stockage aux exutoires potentiels des eaux souterraines demeureront. Il est donc est inévitable de valider les modèles, les évaluations et les calculs. Les paramètres utilisés pour cette validation doivent être indépendants des paramètres utilisés dans les modèles. Il faudra faire des recherches spécifiques pour acquérir des données nécessaires.

Incertitudes et caractère majorant des paramètres choisis

Pour ce qui concerne la modélisation, le Référentiel Géologique (Tome 1 et Tome 5) traite du problème des incertitudes en établissant systématiquement une distinction entre différents types d'incertitude.

Nous ne traiterons ici que des incertitudes se rapportant au modèle conceptuel de l'ANDRA et à la transposition des paramètres à la zone équivalente de transposition. Ces incertitudes découlent d'un manque de compréhension ou de connaissances et surtout d'un manque de données de base. Le manque d'information est dû à la faible résolution spatiale des données in situ sur la perméabilité et à des facteurs comme les discontinuités verticales (fractures) et des zones pétrographiques enrichies en carbonates. Il n'est pas possible de surmonter totalement ces incertitudes en augmentant le nombre de forages pour obtenir des données et/ou des informations hydrauliques supplémentaires sur l'existence des fractures et de leurs effets hydrauliques.

La faible résolution spatiale des données de perméabilité des roches de faible perméabilité ne peut être surmontée qu'en employant des indicateurs pour la perméabilité. Quel que soit l'indicateur choisi, il faudra démontrer que le paramètre correspondant indique réellement une faible perméabilité et possède une résolution spatiale plus fine que les valeurs de la conductivité hydraulique in situ. Les propriétés pétrographiques et géomécaniques utilisées par l'ANDRA sont probablement des indicateurs valables, à condition que la dépendance de la perméabilité in situ par rapport aux indicateurs soit suffisamment démontrée³⁶⁵ et que la corrélation entre les paramètres soit démontrée par des approches géostatistiques, notamment en ce qui concerne la pertinence spatiale de ces corrélations. Cet aspect porte principalement sur la perméabilité de la matrice rocheuse.

³⁶⁴ voir Section 5.6.5.1

³⁶⁵ voir Section 5.6.1

L'existence d'hétérogénéités qui pourraient augmenter localement la perméabilité in situ de la matrice rocheuse et, par ailleurs, réduire l'extension de la(les) zone(s) de faible perméabilité « homogène » relative à la zone équivalente de transposition (Section 5.6.4.2) constitue une source d'incertitude essentielle. Il faut identifier la configuration des fractures de différentes tailles. Tout d'abord, il faut étudier l'efficacité hydraulique d'un nombre suffisant de fractures de différentes tailles du point de vue de leur efficacité hydraulique. Comme l'existence de telles hétérogénéités ne peuvent être exclues a priori, cette incertitude doit être abordée avec une approche prudente. Puisqu'il ne sera pas possible de déterminer l'efficacité individuelle de toutes les fractures, un modèle conceptuel doit être développé. Dans celui-ci l'existence de fractures de différentes tailles est postulée sur la base de cette recherche et leur pertinence est évaluée en faisant varier les paramètres utilisés.

Les données qui sont employées dans la modélisation devront être aussi réalistes et appropriées que possible. Sinon les modèles et leurs résultats n'auront aucune chance d'être correctement évalués. L'utilisation d'hypothèses et d'évaluations pénalisantes doit être réservée aux cas où les données et les informations ne peuvent pas être obtenues comme il faut, en particulier pour la période au delà de 10 000 ans, comme le permet la Règle fondamentale.

A ce jour, on ne voit pas très bien comment l'ANDRA traitera les incertitudes et le choix de paramètres majorants liés à la question de la diffusion ou du transport par convection à travers le Callovo-Oxfordien le long d'hétérogénéités locales. Pour la modélisation de l'écoulement et du transport des solutés d'eaux souterraines dans les calcaires sus-jacents et sous-jacents du Dogger et de l'Oxfordien l'ANDRA identifie des incertitudes. La modélisation de l'écoulement des eaux souterraines et l'acquisition de données pour réduire les incertitudes se poursuit ; elles ne peuvent pas être évaluées du fait du manque d'informations sur les résultats des forages profonds récents et de leurs conséquences éventuelles pour des recherches supplémentaires.

Transposition des résultats de la recherche à la zone équivalente de transposition

Le Dossier 2001 Argile³⁶⁶ décrit les caractéristiques les plus importantes du Callovo-Oxfordien à considérer pour extrapoler les données obtenues par des recherches dans le laboratoire souterrain (ou à d'autres endroits) à la zone équivalente de transposition, où serait éventuellement situé un site de stockage. Pour l'hydrogéologie, l'épaisseur minimum, les propriétés de confinement et l'absence de fractures hydrauliquement pertinentes, en particulier de failles, sont de la plus grande importance³⁶⁷.

Epaisseur du Callovo-Oxfordien

La variation de l'épaisseur du Callovo-Oxfordien autour du site de Bure a été identifiée par des investigations sismiques qui ont été calibrées avec les données des forages profonds sur le site et aux alentours. Les résultats des récents forages profonds³⁶⁸

³⁶⁶ ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.Achapitre VI.1.2.9.

³⁶⁷ voir également Chapitre 7

³⁶⁸ voir Section 5.6.1

tiendront probablement compte de l'amélioration du calibrage de l'interprétation sismique et par conséquent amélioreront les connaissances sur la variation de l'épaisseur.

En ce qui concerne l'épaisseur de la formation de confinement l'ANDRA prévoit d'inclure les formations encaissantes du Dogger et de l'Oxfordien, en raison de sa faible perméabilité³⁶⁹. Dans ces conditions les règles d'extrapolation des données à la zone équivalente de transposition doivent inclure ces formations. Il est important de noter qu'un indicateur important des propriétés de confinement, la surpression de l'eau interstitielle, ne sera probablement pas valable pour la totalité ou une partie de ces formations calcaires³⁷⁰.

Propriétés de confinement du Callovo-Oxfordien

Trois caractéristiques apparaissent clairement comme des facteurs conditionnant les propriétés de la formation³⁷¹:

- sa teneur en carbonates primaires et diagénétiques,
- la proportion de minéraux argileux en général et de smectite en particulier,
- la texture de la roche, et particulièrement la taille des pores.

A ce jour, il n'y a aucune information disponible sur la corrélation géostatistique entre paramètres pétrographiques/lithologiques/géomécaniques et perméabilité in situ. Si l'ANDRA considère le Callovo-Oxfordien comme une unité et la compare aux calcaires sus- et sous-jacents du Dogger et de l'Oxfordien, il y a le risque que d'éventuelles variations des propriétés hydrauliques ne soient pas détectées.

Le Callovo-Oxfordien montre une variation verticale évidente dans sa composition, en particulier dans les teneurs en argiles et en carbonates³⁷². A partir des valeurs moyennes des paramètres pétrographiques (par ex. la teneur en carbonates) et des paramètres géomécaniques (par ex. le module de déformation) pour les zones géomécaniques distinguées par l'ANDRA et présentées dans le Référentiel Géologique³⁷³, on peut conclure que la teneur en carbonates, en particulier, peut affecter les propriétés géomécaniques. Cela peut influencer la perméabilité in situ. Par exemple l'épaisseur de la Zone géomécanique D n'est que de 5 m environ. Elle a été examinée dans le forage HTM 102 au sein d'un intervalle d'essai de 105 m de long (atteignant les calcaires du Dogger). Dans le forage MSE 101 elle a été incluse dans un intervalle de 35 m. Ces mesures n'ont pas fait apparaître une augmentation de la perméabilité. Cependant, ces longueurs des essais sont trop importantes pour détecter une perméabilité sensiblement plus élevée.

Influence des fractures

³⁶⁹ ANDRA 2002-2005, page 33

³⁷⁰ voir Figure 5-3

³⁷¹ ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.A chapitre VI.1.2.9

³⁷² voir Section 5.4.1 et Figure 5-1

³⁷³ ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001, Tableaux 2.1-02 et 4.2-03

A partir des résultats de ses campagnes sismiques dans le secteur de Bure, l'ANDRA a exclu des fractures hydrauliques importantes, et même des failles, pour le transport (vertical) des solutés. Cette affirmation est étayée par les deux points suivants³⁷⁴:

- la composante principale du mouvement le long des plans de faille est verticale, comme l'indiquent les failles identifiées par la campagne sismique 3D-dans les calcaires du Dogger et la partie plus inférieure du Callovo-Oxfordien.
- il n'existe aucune faille de rejet vertical principal (> 5 m) "visible" dans le Callovo-Oxfordien.

Toutefois, de telles campagnes ne peuvent détecter (toutes) les failles avec un rejet vertical faible ou inexistant. En outre, une configuration de fractures mineures, appelées « secondaires », peut ne pas être détectée par des forages verticaux. Il faut également tenir compte du fait que des failles avec un rejet mineur peuvent présenter une certaine importance hydraulique.

La position de l'ANDRA est discutée depuis longtemps par des habitants de la région sur la base de l'observation des failles et des fractures. Elle est aussi en partie en contradiction avec les résultats de Rocher et al.³⁷⁵ Ils affirment que des fractures sans composante verticale principale mais potentiellement importantes hydrauliquement ont été identifiées dans les environs du site de Bure. Ces fractures sont liées au champ de contrainte actuel (de type principalement compressif). Ces résultats sont en conformité avec l'observation de la forte ovalisation dans les forages des recherches de l'ANDRA dans les environs du site.³⁷⁶

En fait, il est difficile d'identifier par des forages verticaux des fractures presque verticales, quelles que soient leurs tailles, et espacées de plusieurs mètres. Même des failles présentant un rejet vertical mineur peuvent ne pas être détectées par des campagnes sismiques, même de haute résolution. Dans ce cas les informations pertinentes seront obtenues par les forages déviés actuellement effectués sur le site.³⁷⁷

Il n'apparaît pas clairement comment le programme scientifique de l'ANDRA, notamment ses forages déviés, traitera du problème de l'extrapolation des données à toute la zone équivalente de transposition.

Karst

Les calcaires du Dogger et de l'Oxfordien peuvent être affectés par une karstification (Section 5.4.2.3). Dans des zones de karst développé, l'écoulement des eaux souterraines, au moins localement, peut ne plus être conforme à la théorie « normale » de la filtration (selon la loi de Darcy), mais doit être décrit en termes de dynamique des fluides. Aussi, le processus karstique sur le site de Bure doit être étudié en détail et ses forces motrices

³⁷⁴ ANDRA 2002-2005

³⁷⁵ Rocher et al. 2002, pages 2, 33

³⁷⁶ ANDRA 1997

³⁷⁷ voir Section 5.6.4

particulières et les spécificités de son développement doivent être parfaitement comprises. Ces connaissances doivent ensuite être intégrées dans les modèles hydrogéologiques utilisés pour évaluer le transfert des radionucléides dans les formations situées au-dessous et au-dessus des argilites du Callovo-Oxfordien.

Des études pratiques de grottes karstiques ont été effectuées à travers un travail approfondi par Jaillot et ses collaborateurs.³⁷⁸ Cette recherche est à notre avis conforme aux normes les plus élevées. Elle a abouti à des enseignements importants, comme le développement du modèle phénoménologique relatif au développement de conduits karstiques dans les calcaires du Barrois et la saignée de la vallée de la Marne, et l'élucidation du rôle des dépôts de couverture dans le développement du karst.

Il reste à voir comment les informations concernant le développement des conduits karstiques et les orientations des écoulements d'eau karstique signalés par Jaillot seront intégrés dans les modèles hydrogéologiques relatifs à la sûreté ; les documents les plus récents que nous avons eu à notre disposition montrent que cela n'était pas encore le cas même s'il existe le projet de le faire.³⁷⁹

Nous remarquons aussi que, bien que les études du groupe de Jaillot fournissent effectivement une grande quantité d'informations sur les structures des systèmes karstiques actuellement connus dans le Barrois, leurs bassins versants et beaucoup d'autres aspects de la karstification, il semble qu'il y ait un problème à relier ces résultats à la zone du site de Bure et à la zone équivalente de transposition. Même s'il est évident que les résultats des études du groupe de Jaillot sont directement pertinents pour la problématique du site de Bure, il n'est pas possible à ce stade de se prononcer sur la présence de karst à proximité immédiate, ou sur l'éventualité de son développement à cet endroit à l'avenir.

Démonstration du respect de la Règle fondamentale

Il n'existe actuellement pas suffisamment d'informations pour évaluer si la caractérisation hydrogéologique sur laquelle s'appuient les estimations de dose dans le Dossier 2001 Argile est scientifiquement défendable. Le Dossier 2001 Argile³⁸⁰ présente des évaluations préliminaires de dose à trois exutoires supposés d'eaux souterraines du Dogger, de l'Oxfordien et du Tithonien³⁸¹ : Meuse (Dogger), Marne-Rognon (Oxfordien), et Tithonien. La raison de ces évaluations est de démontrer la méthodologie et non pas la conformité réglementaire en tant que telle. A ce jour, il n'y a aucune recherche hydrogéologique exhaustive sur les formations de transfert pour déterminer la validité des paramètres pertinents pour le transport de radionucléides, en particulier ceux que l'ANDRA utilise pour ses calculs de conformité. L'achèvement du programme de recherche est crucial pour démontrer la conformité réglementaire de façon scientifiquement fiable.

³⁷⁸ Jaillot 2000.

³⁷⁹ ANDRA BET 2002, p. 224.

³⁸⁰ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A, p. 132

³⁸¹ voir Tableau 5-1

Les calculs de dose doivent être basés sur des données réalistes, et les calculs de sensibilité doivent prendre en compte la gamme entière des données réalistes ou - en cas d'absence de données - les données conservatrices appropriées. Les calculs de sensibilité présentés dans le Dossier 2001 Argile³⁸² ne sont pas l'équivalent des calculs d'incertitude requis par la Règle III.2.f pour la période inférieure à 10 000 ans. Ils ne sont pas non plus équivalents à une démonstration pessimiste des estimations de dose pour la période au delà de 10 000 ans. Par exemple, le coefficient de diffusion pour l'iode 129 utilisé dans le scénario "d'évolution normale" dans le Dossier 2001 Argile est $(4 \times 10^{-12} \text{ m}^2 / \text{sec})$. L'ANDRA affirme que ce coefficient est majorant par un facteur de 40.³⁸³ Mais l'existence du caractère prudent de ce coefficient doit être démontrée en utilisant des données et des analyses in situ.

5.7 Recommandations

Avec les forages profonds sur le site de Bure et dans ses environs depuis 2002, les recherches hydrogéologiques de l'ANDRA ont atteint une phase de consolidation des informations existantes et d'interprétation des données, et d'expansion de la base de données nécessaire à l'évaluation de la situation hydrogéologique et à la modélisation du mouvement des eaux souterraines et du transport des radionucléides. Toutefois, les informations sur le programme et les résultats ne sont pas suffisamment accessibles pour permettre une évaluation exacte. Il est donc possible que les recommandations qui suivent soient partiellement des descriptions du travail actuel de l'ANDRA plutôt que des suggestions pour de nouvelles orientations de travail.

- Le paramètre le plus pertinent pour décrire les propriétés du confinement du Callovo - Oxfordien est sa perméabilité **in situ**. La corrélation entre des paramètres pétrographiques/géomécaniques et de perméabilité (et d'autres données moins importantes du point de vue de la variabilité spatiale) doit être démontrée sur la base des mesures in situ des paramètres hydrauliques et en lien avec leur signification spatiale. D'un autre côté il faut démontrer que la variabilité verticale de la perméabilité dans un forage donné et la variation latérale entre différents forages est aléatoire ou le résultat de facteurs non-hydrauliques.
- Des indicateurs supplémentaires visant à démontrer que la migration des solutés dans le Callovo-Oxfordien est principalement diffusive devraient être identifiés et examinés en fonction de leur capacité à indiquer l'existence d'une zone étendue de faible perméabilité. La formation, l'évolution et la structure hydraulique de cette zone doivent faire l'objet de recherches si elles peuvent servir d'indicateur élargi pour une faible perméabilité à long terme. Les interdépendances entre pression et perméabilité à l'intérieur de cette zone, et les effets possibles des zones d'une perméabilité accrue sur la répartition de la pression, doivent être compris.

³⁸² ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A chapitre VI.4.3.5.

³⁸³ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A, p. 134

De tels indicateurs peuvent être utilisés pour la validation du modèle conceptuel. Les investigations associées doivent être faites à l'échelle spatiale de la zone équivalente de transposition. La résolution de surface des résultats doit permettre la détection ou l'exclusion au moins des principales zones d'écoulement vertical à travers le Callovo-Oxfordien. Selon la méthode de validation et les paramètres appliqués, les données requises doivent être obtenues par des investigations spécifiques qui doivent être incluses dans le programme de recherche.

L'utilisation de méthodes géochimiques ou hydrochimiques basées sur les gaz ou de méthodes isotopiques pour estimer le flux vertical des indicateurs gazeux et/ou pour identifier n'importe quel modèle significatif de découlement à travers le plus Callovo-Oxfordien devrait être démontrée en ce qui concerne leur applicabilité dans la zone de Bure. Le choix des paramètres adéquats pour une telle évaluation préliminaire doit s'appuyer sur les résultats des recherches sur les paramètres et les isotopes environnementaux déjà effectuées par l'ANDRA et l'interprétation de leurs variations surfaciques et spatiale au moyen de techniques géostatistiques. Les indicateurs d'origine pré-Dogger sont d'un intérêt tout particulier (par ex. les isotopes de Sr).

- Selon l'état des recherches documenté dans le Référentiel Géologique, il y a un manque de données in-situ de perméabilité pour différentes zones géomécaniques du Callovo-Oxfordien présentant une teneur accrue en carbonates, ainsi que pour des interfaces entre des sections avec différentes teneurs en carbonates, qui peuvent présenter une perméabilité plus importante. La perméabilité de telles zones devrait être étudiée en détails par des investigations in situ et de laboratoire de façon à ce que la présence de zones à perméabilité accrue, qui peuvent contribuer au transport par convection, puisse être exclue ou évaluée.
- La distance "normale" entre les fractures verticales dans le Callovo-Oxfordien gêne leur identification dans les forages verticaux. Le petit nombre de fractures identifiées jusqu'ici, n'exclut pas l'existence de fractures hydrauliquement significatives. Elles sont ou seront recherchées hydrauliquement dans les forages déviés sur le site.

Pour la recherche dans le laboratoire souterrain, il est en outre recommandé d'utiliser des forages horizontaux et continuer d'utiliser les forages inclinés pour les recherches in situ sur la perméabilité des différents types d'hétérogénéités au sein de la matrice rocheuse. L'orientation et l'inclinaison de ces forages peuvent être modifiées en fonction de l'objectif des recherches et du champ de contrainte, des informations sur les orientations des fractures ou des plans de stratification hydrauliquement importants, etc.

- En raison de la faible représentativité spatiale des données hydrauliques in-situ, il ne sera probablement pas possible d'exclure l'existence de fractures dans la transposition équivalente. Du fait des incertitudes qui persistent, il faut faire l'hypothèse prudente que des fractures d'une échelle indétectable peuvent exister. Des hypothèses devraient être formulées au sujet de leurs propriétés, dimension et distances hydrauliques pour évaluer leur importance pour le mouvement vertical d'eaux souterraines au moyen de modèles conceptuels.

- D'après les pressions hydrauliques très proches mesurées dans les calcaires du Dogger dans les forages HTM 102 et MSE 101 il semble être difficile de décrire exactement les directions de l'écoulement des eaux souterraines dans les parties du nord-ouest de la zone équivalente de transposition. Jusqu'à maintenant, aucun forage complémentaire n'est prévu dans cette zone.

Au moins un forage profond dans cette zone ou à l'extérieur de la zone équivalente de transposition pourrait confirmer et améliorer la compréhension de l'écoulement des eaux souterraines dans cette zone et fournir des informations complémentaires pour améliorer la transposition des informations (voir ci-dessous). Cependant, il est recommandé de démontrer la représentativité spatiale/surfacique des données hydrauliques existantes ou l'ampleur nécessaire des investigations supplémentaires au moyen d'une évaluation géostatistique.

- En ce qui concerne la répartition en surface des nouveaux forages, il reste une différence entre les parties ouest et nord de la zone équivalente de transposition et sa partie sud, du point de vue de sa transposition. Les forages supplémentaires (voir plus haut) dans cette zone fourniraient des informations directes sur les propriétés du Callovo-Oxfordien à transposer à la zone équivalente de transposition en plus de celle qui ont été acquises par des méthodes « indirectes » (campagnes sismiques). Le nombre et l'emplacement de ce(s) forage(s) devraient être déterminés par une interprétation géostatistique des données disponibles.
- La caractérisation hydrogéologique des zones situées entre le site de stockage et les éventuelles zones des exutoires des eaux souterraines pouvant être employées pour des calculs de dose, devrait être effectuée de façon suffisamment approfondie pour permettre l'identification des différentes voies éventuelles de transport des radionucléides, ainsi que la validation des modèles de transport et des estimations de dose faites dans le cadre de divers scénarios.

Il est important de déterminer la variabilité spatiale des propriétés hydrauliques des formations de transfert : les coefficients de diffusion et de sorption de ces formations, et les charges hydrauliques. La représentativité surfacique/spatiale des données existantes ou les besoins en données supplémentaires devraient être démontrés au moyen de techniques géostatistiques.

L'usage potentiel des aquifères, public ou privé, pour l'alimentation en eau doit faire partie des recherches

- L'influence potentielle du Karst dans les calcaires du Dogger et de l'Oxfordien sur la direction et la vitesse de l'écoulement des eaux souterraines et l'éventuel transport des radionucléides dans ces formations devraient être étudiées de façon approfondie en deux phases :

Une première étape logique visant à combler les lacunes entre les connaissances déjà acquises sur le développement du karst dans la zone et le besoin de connaissances supplémentaires, plus spécifiques au site, serait une évaluation globale et la

régionalisation de la zone concernée (c'est-à-dire, à proximité du site de Bure et la zone équivalente de transposition) en termes de potentiel de développement de karst (risque karstique). Des approches méthodologiques pour la régionalisation de territoires karstifiés et le classement des unités territoriales en fonction du risque karstique ont été développées par des karstologues russes au début des années 1990.³⁸⁴ Nous recommandons l'utilisation de cette méthode ou d'une approche semblable.

Un développement actif du karst dans des calcaires comme les calcaires du Dogger et de l'Oxfordien est envisagé à la fois pour des états climatiques tempérés (similaires à l'état actuel) et les états boréaux futurs du climat en Meuse/Haute-Marne.³⁸⁵ Nous recommandons que les scénarios potentiels d'évolution de l'hydrologie du site comprennent un examen approfondi et explicite de l'éventuel développement du karst dans différents scénarios de changements climatiques et géomorphologiques (notamment des scénarios associés à un réchauffement climatique induit par les activités humaines).

5.8 References

AKEND 2002	AKEND - Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (2002): Site Selection Procedure for Repository sites. Recommendations of the AkEnd - Committee on Site Selection Procedure for Repository Sites.
ANDRA 1995	• ANDRA (1995 - B RP 1GSV 95-002): Rapport final. Tests hydrologiques sur le site de forage d'exploration HTM102 de Haute-Marne entre Circfontaines en Ornois et Gillaume.- Avril 1995.
ANDRA 1996	• ANDRA (1996 - B RP 0CRE 96-003): Détermination de la paléotempérature du Callovo-Oxfordien de la Haute Marne.- 15.06.1996.
ANDRA 1997	• ANDRA (1997 - B RP 0ANT 96-128/B): Expertise relative a l'ovalisation de forages de la zone d'étude de l'est de la France.- Date d'origine. Juillet 1997. Rév. B, 07/1997.
ANDRA 2000	• ANDRA (2000 - D RP 0CRE 00-003): Thermicité du Callovo-Oxfordien du site de L'Est. Détermination d'un paléoenfouissement maximum. Etude complémentaire.- Octobre 2000.
ANDRA Cartographie 2001	• ANDRA (2001 - D RP 0G2R 00-003): Site Meuse/Haute Marne. Cartographie géologique et structurale de l'environnement régional du site. Volume 1: Texte; Volume 2: Figures et planches hors texte; Volume 3: Fiches de sites micro tectoniques.- Avril 2001.
ANDRA 2002-2005	• ANDRA (2002 - C PE ADS 02-039): Scientific programme HLLW Clay Repository Project 2002-2005.- 19/09/2002.
ANDRA 2002a	• ANDRA (2002 - D NT ADS 02-021): Site Meuse/Haute-Marne - Evaluation de l'apport de forages vis-à-vis de la fiabilisation de la modélisation

³⁸⁴ Dublyanskaya & Dublyansky 1992.

³⁸⁵ BIOCLIM D2 2002, p. 55.

	hydrogéologique du site Meuse/Haute-Marne.- 26/03/2002.
ANDRA 2003a	<ul style="list-style-type: none"> • ANDRA (2003 - C SP ADS 03-024): Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne - Spécifications de besoin concernant les forages du programme FRF up1.- Date d'origine: 18/03/2003. Rév. B, 08/10/03. ANDRA Identification "C SP ADS 03-024."
ANDRA 2003b	<ul style="list-style-type: none"> • ANDRA (2003 - C SP ADS 03-063): Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne - Spécification de besoin concernant les forages du programme FRF up2. Date d'origine: 29/09/2003. Rév. B, 30/10/03. ANDRA Identification "C SP ADS 03-063."
ANDRA 2003c	<ul style="list-style-type: none"> • ANDRA (2003): Mai 2003: Forage scientifique profond. On the Web at http://www.andra.fr/popup.php3?id_article=87&id_rubrique=91 [access: 15.4.2004]
ANDRA 2003d	<ul style="list-style-type: none"> • ANDRA (2003): À la recherche de nouvelles données.- La vie du Labo, N° 23, page 2-3.- Automne 2003. On the Web at http://www.andra.fr/IMG/LVLabo23.pdf.

ANDRA 2003e	<ul style="list-style-type: none"> ANDRA (2003): Forages scientifiques profonds. Adaptation du programme.- La vie du Labo, N° 23, page 4.- Automne 2003. On the Web at http://www.andra.fr/IMG/LVLabo23.pdf.
ANDRA Recueil 2004	<ul style="list-style-type: none"> ANDRA (2004): Recueil des transparents Andra. Description et modélisation du comportement du stockage. Présentation des calculs 2004. Audition du 11 et 12 février 2004 de la Commission Nationale d'Evaluation. DOC TR ADS 04-0004/A.
ANDRA BET 2001	<ul style="list-style-type: none"> ANDRA BET (2001): Recherches pour le stockage des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue 2001.- Bilan des Études et Travaux et synthèse du bilan.- Available on CD.
ANDRA BET 2002	<ul style="list-style-type: none"> ANDRA BET (2002): Recherches pour le stockage des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue 2002.- Bilan des Études et Travaux et synthèse du bilan.- Available on CD.
ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A	<ul style="list-style-type: none"> Dossier 2001 Argile sur l'avancement des études & recherches relatives à la faisabilité d'un stockage de déchets à haute activité et à vie longue en formation géologique profonde - Rapport de synthèse. [Partie A]. On the Web at http://www.andra.fr/IMG/pdf/DOSSIER_2001.pdf. Part A in English on the Web at http://www.andra.fr/IMG/pdf/DOSSIER_2001_E.pdf.
ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.B	<ul style="list-style-type: none"> Dossier 2001 Argile sur l'avancement des études & recherches relatives à la faisabilité d'un stockage de déchets à haute activité et à vie longue en formation géologique profonde - Rapport de synthèse Partie B Compléments scientifiques et techniques.
ANDRA Référentiel Géologique Tome 1, 2001	<ul style="list-style-type: none"> ANDRA Référentiel Géologique Tome 1 (2001) Référentiel Géologique du site de Meuse/Haute-Marne, Tome 1, Contexte et objet. Identification: A RP ADS 99-005/B, Émetteur: Direction Scientifique, Date d'origine. Janvier 1999. Rév. B: 27/07/2001.
ANDRA Référentiel Géologique Tome 2, 2001	<ul style="list-style-type: none"> ANDRA Référentiel Géologique Tome 2 (2001) Référentiel Géologique du site de Meuse/Haute-Marne, Tome 2, La connaissances à l'échelle régionale. Identification: A RP ADS 99-005/B, Émetteur: Direction Scientifique, Date d'origine. Janvier 1999. Rév. B: 25/07/2001.
ANDRA Référentiel Géologique Tome 3, 2001	<ul style="list-style-type: none"> ANDRA Référentiel Géologique Tome 3 (2001) Référentiel Géologique du site de Meuse/Haute-Marne, Tome 3, La connaissances à l'échelle du secteur. Identification: A RP ADS 99-005/B, Émetteur: Direction Scientifique, Date d'origine. Janvier 1999. Rév. B: 18/07/2001.
ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001	<ul style="list-style-type: none"> ANDRA Référentiel Géologique Tome 4 (2001) Référentiel Géologique du site de Meuse/Haute-Marne, Tome 4, Le Callovo-Oxfordien, Identification: A RP ADS 99-005/B, Émetteur: Direction Scientifique, Date d'origine. Janvier 1999. Rév. B: 16/07/2001.

ANDRA Référentiel Géologique Tome 5, 2001	<ul style="list-style-type: none"> ANDRA Référentiel Géologique Tome 5 (2001) Référentiel Géologique du site de Meuse/Haute-Marne, Tome 5, Etat d'avancement de la modélisation, Identification: A RP ADS 99-005/B, Émetteur: Direction Scientifique, Date d'origine. Janvier 1999. Rév. B, 03/09/2001.
APPEL & HABLER 2002	<ul style="list-style-type: none"> APPEL, D. & HABLER, W. (2002): Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung. Phase 2: Auswertung der Datensätze für die Kriterienentwicklung.- Report to Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, AkEnd (German Committee on Site Selection Procedure for Repository Sites).
BIOCLIM D2 2002	<ul style="list-style-type: none"> BIOCLIM (2002): Deliverable D2: Consolidation of Needs of the European Waste Management Agencies and the Regulator of the Consortium. Work package 1: Site-specific and palaeo environmental data. Modeling Sequential Biosphere Systems under Climate Change for Radioactive Waste Disposal. Châtenay-Malabry: ANDRA, 2001. On the web at http://www.andra.fr/bioclim/pdf/d2.pdf.
BRÉGOIN 2003	<ul style="list-style-type: none"> BRÉGOIN, S. (2003): Variabilité spatiale et temporelle des caractéristiques du Callovo-Oxfordien de Meuse/Haute Marne. Thèse de doctorat de l'Université Paris XI, spécialité Sciences de la Terre,- Résumé sur le Web at http://www.lgs.jussieu.fr/~geologie/pages/ed/ed_etudiants.htm#bre (access: April 2004)
CLARET 2001	<ul style="list-style-type: none"> CLARET, F. (2001): Caractérisation structurale des transitions minéralogiques dans les formations argileuses: contrôles et implications géochimiques des processus d'illitisation. Cas particulier d'une perturbation alcaline dans le Callovo-Oxfordien Laboratoire souterrain Meuse / Haute Marne. Thèse présentée pour l'obtention du titre de Docteur de l'Université Joseph Fourier, Grenoble I. Collection les Rapports ANDRA. Summary on the Web at http://www.andra.fr/IMG/Claret.pdf (access: April 2004)
CLARET et al. 2002	<ul style="list-style-type: none"> CLARET, F., SAKHAROV, B.A., DRITS, V.A., GRIFFAULT, L., MEUNIER, A., BAUER, A., SCHAEFER, T. & LANSON, B. (2002): Clay mineralogy of the Callovo-Oxfordian formation using multi-specimen method.- In: ANDRA - Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs: Clays in natural and engineered barriers for the radioactive waste containment.- International Meeting, December 9-12, 2002, Reims, France, Abstracts, page 97-98.
CNE 2002	<ul style="list-style-type: none"> CNE - Commission Nationale d'Evaluation relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs. Instituée par l'article L 542 dur Code de l'environnement issu de la loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 (2002): Rapport d'Evaluation n° 8.- Septembre 2002
CNE 2003	<ul style="list-style-type: none"> CNE - Commission Nationale d'Evaluation relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs. Instituée par l'article L 542 dur Code de l'environnement issu de la loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 (2003): Rapport d'Evaluation n° 9.- Juin 2003.

DUBLYANSKAYA & DUBLYANSKY 1992	<ul style="list-style-type: none"> DUBLYANSKAYA, G.N. & DUBLYANSKY, V.N. (1992): Mapping, subdivision into regions, and geological engineering assessment of karstified territories. Publishing House of the Siberian Branch of the Academy of Sciences of USSR, Novosibirsk, 144 p. (<i>In Russian</i>)
JAILLET 2000	<ul style="list-style-type: none"> JAILLET, S. (2000): Un karst couvert de bas-plateau: le Barrois. Structure – Fonctionnement – Evolution. Thèse, Université Michel de Montaigne, Bordeaux 3, 543 p.
LAVASTRE et al. 2002	<ul style="list-style-type: none"> LAVASTRE, V., JAVOY, M., JENDRZEJEWSKI, D., ROUSSET, D. & CLAUER, N. (2002): Sedimentary history and diagenetic / post-diagenetic events in Callovo-Oxfordian clay-rock (Paris Basin, France): The stable isotopes record of minerals and the pore water. In: ANDRA - Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs: Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste containment.- International Meeting, December 9-12, 2002, Reims, France, Abstracts, page 457-458.
NAGRA 2002	<ul style="list-style-type: none"> NAGRA - National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste (2002): Project Opalinus Clay. Safety Report. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis).- Technical Report 02-05, December 2002. On the Web at http://www.nagra.ch/english/aktuell/e_nachweis/ntb02_05.htm.
OECD-NEA 2003	<ul style="list-style-type: none"> OECD-NEA – Nuclear Energy Agency of the Organisation for Economic Co-operation and Development (2003): The French R&D Programme on Deep Geological Disposal of Radioactive Waste. An International Peer Review of the “Dossier 2001 Argile”.- Paris, ISBN 92-64-18260-8. On the Web at http://www.nea.fr/html/rwm/reports/2003/nea4432-andraeng.pdf.
Règle N° III.2.f	<ul style="list-style-type: none"> Règle Fondamental - Règle Fondamental III.2.f - Règles fondamentales de Sûreté relatives aux installations nucléaires de Base base autres que Réacteursréacteurs, Règle No. III.2.f (10 juin 1991) – Stockage définitif de déchets radioactifs en Formation Géologique Profonde.
ROCHER et al. 2002	<ul style="list-style-type: none"> ROCHER, M., BAIZE, S., CUSHING, E. M., LEMEILLE, F. & LOZAC'H, Y. (2002): Fracturation et paléocontraintes autour du site de Bure.- IRSN/Département de Protection de l'environnement, Rapport DPRE/SERGD/02-12, Mars 2002.
ROUSSET et al. 2002	<ul style="list-style-type: none"> ROUSSET, D., MAES, P., VERDOUX, P., LANCELOT, J. & CLAUER, N. (2002): Open-system vs. closed-system evolution of the diagenesis in the Callovo-Oxfordian argillites of the eastern Paris Basin. In: ANDRA - Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs: Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste containment.- International Meeting, December 9-12, 2002, Reims, France, Abstracts, page 99-100.
WENDLING et al. 2002	<ul style="list-style-type: none"> WENDLING, J., BUSCHAERT, S. & BARTHELEMY, Y. (2002): Hydrogeological and transport models for the MHM site evaluation program: Current status and potential future developments. In: ANDRA - Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs: Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste containment.- International Meeting, December 9-12, 2002, Reims, France, Abstracts, page 161-162.

Chapitre 6. Aspects minéralogiques et géochimiques dans la formation hôte

Yuri Dublyansky

Conclusions principales

Les questions scientifiques abordées dans ce chapitre se rapportent à une question centrale : la formation d'argilite du Callovo-Oxfordien laisse-t-elle apparaître qu'elle s'est comportée, par le passé, comme un système ouvert en terme de migration des fluides. La présence de calcite hydrogénique secondaire dans les formations de l'Oxfordien, du Callovo-Oxfordien et du Dogger pourrait indiquer l'existence, par le passé, d'un « cross-formational flow » (c'est-à-dire une circulation d'eau d'une formation perméable à une autre, à travers une formation imperméable). La présence de gaz d'hydrocarbures piégés dans les argilites du Callovo-Oxfordien laisse également supposer un éventuel comportement en système ouvert. Ces gaz possèdent des propriétés moléculaires et isotopiques suggérant fortement une origine thermogène (et donc une provenance des profondeurs)

Les processus du passé qui auraient pu être à l'origine de ce comportement en système ouvert de la formation sont importants à prendre en compte du point de vue de la performance future du système du site de stockage.

Conclusions

Une analyse des documents mis à notre disposition nous permet de conclure que les approches et méthodes utilisées par l'ANDRA pour comprendre les processus qui ont conduit au dépôt des minéraux secondaires et l'incorporation des hydrocarbures gazeux dans la formation du Callovo-Oxfordien paraissent généralement bien fondées. Cependant les observations suivantes amènent à reléguer au second plan cette conclusion positive :

1. La phénoménologie des processus qui ont engendré le comportement plausible d'un système ouvert n'est pas encore comprise. Il n'existe pas encore de modèle phénoménologique unique et défendable pour les processus en question.
2. Les processus en question n'ont pas encore été correctement (quantitativement) caractérisés puisque leur importance spatiale et temporelle n'est pas connue avec un degré suffisant de précision.
3. Par conséquent il n'a pas encore été possible d'inclure ces processus dans le modèle géologique/hydrogéologique du modèle du système du site de stockage. On peut donc considérer que ce modèle serait incomplet si ces processus potentiellement perturbateurs n'étaient pas explicitement pris en compte.

4. Dans les documents qui ont été mis à notre disposition, nous n'avons pas trouvé de stratégie cohérente visant à clarifier la phénoménologie de la migration des paléo-fluides, à obtenir une caractérisation minutieuse des processus dans la zone étudiée et finalement à évaluer les implications de ces processus pour la performance du site de stockage.

Recommandations

Nous recommandons que la recherche sur les minéraux secondaires et les hydrocarbures gazeux dans les argilites du Callovo-Oxfordien et les roches carbonatées avoisinantes soit plus énergique et ciblée. Le développement et l'exécution d'un programme de recherche spécifique pour résoudre ce problème pourraient être justifiés. Ce programme aurait comme objectifs une compréhension qualitative et une caractérisation quantitative complète des processus impliqués.

Outre les méthodes d'études qui ont déjà été utilisées par l'ANDRA (les études sur les inclusions fluides, les isotopes stables des carbonates, les traces d'éléments, les isotopes du strontium, etc.) il faudrait utiliser un certain nombre de méthodes complémentaires. Ces études comprennent : les études sur les isotopes piégés dans les inclusions fluides, les études chimiques et isotopiques des gaz piégés, l'analyse du δD des hydrocarbures gazeux, etc. Certaines méthodes déjà utilisées par l'ANDRA demandent des modifications et ajustements (comme par exemple la mise en place d'un protocole rigoureux d'assurance qualité pour la préparation et la manipulation des échantillons pour l'analyse des inclusions fluides, l'utilisation de méthodes de haute résolution pour l'analyse des isotopes stables de la calcite, etc.). La datation fiable de la migration des fluides est très importante, et le traitement de cette question est essentiel.

Pour pouvoir aider à l'interprétation des données, des échantillons de minéraux associés à des occurrences documentées du « cross-formational flow » dans le Bassin parisien devraient être étudiés avec les mêmes méthodes. Cette approche aurait l'avantage de fournir des données solides de référence pour l'interprétation. De la même façon, les données obtenues à partir des gaz d'hydrocarbures piégés dans le Callovo-Oxfordien devraient être comparées avec les données obtenues à partir d'autres parties du bassin houiller lorrain.

Pour les besoins de la caractérisation, la série de méthodes mentionnées plus haut devrait être appliquée au plus grand nombre possible d'occurrences de minéraux secondaires et de gaz d'hydrocarbures dans la zone étudiée. Les études devraient être menées sur tous les carottages des forages ainsi que sur les matériaux obtenus lors du fonçage des puits et le creusement des galeries du laboratoire souterrain. L'objectif serait d'obtenir une représentation en 3 dimensions des propriétés géochimiques à partir de laquelle il serait possible de construire une caractérisation tridimensionnelle de la migration des paléo-fluides.

La mise en œuvre réussie du programme proposé pourrait aider à comprendre la signification que les processus qui ont engendré le comportement ouvert du système dans le passé pourraient avoir sur la sûreté et la performance d'une éventuelle installation de stockage des déchets nucléaires.

6.1 Introduction : Objectifs et moyens de la recherche paléo-hydrogéologique

Le rôle central du développement du modèle phénoménologique détaillé pour le système géologique est présenté dans le document « Projet HAVL-Argile Programme Scientifique 2002-2005 »

« Le concept général de stockage en formation géologique profonde est basé sur l'idée qu'il existe des formations ayant des propriétés telles et situées dans un contexte géologique tel, qu'elles peuvent assurer le confinement de colis de déchets qui y seraient déposés.

Pour montrer que la formation étudiée correspond à cette notion, il faut être en mesure de proposer un modèle conceptuel géologique intégrant les données sédimentologiques, structurales, hydrogéologiques, géomécaniques et géochimiques qui permettent de décrire et de comprendre les plus précisément possible l'état actuel de l'environnement géologique. »³⁸⁶

Cette affirmation programmatique ne met l'accent que sur la connaissance de « l'état actuel de l'environnement géologique ». Nous notons cependant que, bien que la connaissance de l'état actuel du milieu soit de fait très importante, il est encore plus important de pouvoir anticiper l'évolution du milieu géologique dans le futur. Pour y parvenir il est nécessaire de posséder une connaissance approfondie de l'évolution de l'environnement géologique par le passé.

Le développement d'un modèle conceptuel utile pour décrire la performance du site de stockage sur des temps géologiques exige notamment un niveau de confiance raisonnable dans les connaissances sur l'évolution possible, dans le futur, de l'hydrogéologie de la zone étudiée. Bien sûr, de telles prévisions ne sont pas possibles (ou bien elles sont, au mieux, ambiguës) si elles ne se fondent pas sur une connaissance suffisamment détaillée de l'évolution du système hydrogéologique dans le passé.

Dans la liste compilée par l'OCDE/AEN des caractéristiques, événements et processus (features, events and processes, FEPS) pertinents pour le stockage géologique des déchets radioactifs³⁸⁷, l'information paléo hydrogéologique est considérée comme un FEP important. La publication mentionnée ci-dessus suggère qu'en 2003, la synthèse paléo hydrogéologique pour le site de Bure restait encore à faire. En nous basant sur les

³⁸⁶ ANDRA, 2002-2005, p. 13.

³⁸⁷ Mazurek et al., 2003.

documents qui nous sont disponibles³⁸⁸, la recherche en cours de l'ANDRA dans ce domaine présente une grande diversité.

Parmi les points principaux décrivant le FEP "Paléo hydrogéologie de la couche hôte et des formations encaissantes (FEP A3.1, C1.1.1)", la publication de l'OCDE/AEN souligne que:

- les reconstructions paléo hydrogéologiques doivent se baser sur l'information obtenue à partir des expérimentations sur le site en question;
- la qualité et la fiabilité de la reconstruction paléo hydrogéologique dépendent directement de la quantité et de la qualité des données justificatives; et
- les événements se produisant pendant l'évolution hydrogéologique d'un site peuvent également suggérer des scénarios pour le futur comportement du site³⁸⁹.

Les minéraux hydrogéniques secondaires dans les roches sont une source d'une grande valeur pour les informations paléo-hydrogéologiques. Dans les documents nous étant disponibles, nous n'avons pas trouvé de projet spécifiquement dédié à l'étude de ces minéraux. L'étude des gaz piégés dans les argilites pourrait également être une source d'information puisqu'elle pourrait aider à comprendre l'histoire de la migration des fluides à travers les roches.

6.2 Réglementations relatives aux questions abordées dans ce chapitre

La règle No III.2.f stipule que : *"Les barrières du système de confinement jouent des rôles complémentaires, la barrière géologique assurant un rôle essentiel en particulier à long terme"*. (2.3, c'est nous qui soulignons). De plus, le document précise : *"Il faut distinguer les expositions pouvant résulter du stockage en conditions d'évolution normale de référence et les expositions potentielles susceptibles de résulter d'événements aléatoires venant perturber l'évolution du stockage."* ceci parce que *"Certains événements aléatoires, d'origine naturelle ou associés à des actions humaines, peuvent perturber l'évolution du stockage et éventuellement conduire à des expositions individuelles plus élevées que celles associées à l'évolution de référence du stockage"* (3.2).

En ce qui concerne la migration potentielle des radionucléides, il semblerait que le nombre important de données rassemblées sur le site du Bure indique assez catégoriquement que la formation hôte des argilites du Callovo-Oxfordien présente, aujourd'hui, un caractère "étanche". Les très faibles perméabilités de la formation sont considérées comme une caractéristique empêchant quasiment la migration convective des fluides aqueux dans la roche. La formation peut être perçue ainsi comme une barrière efficace pour empêcher la migration des radionucléides avec la phase aqueuse³⁹⁰. Cependant, cette situation ne concerne que les *"conditions d'évolution normale"*. Il est important que le programme scientifique de l'ANDRA puisse démontrer que, dans

³⁸⁸ ANDRA, 2002, ANDRA, 2002-2005.

³⁸⁹ Mazurek et al., 2003, pp. 191 and 193.

³⁹⁰ Les problèmes d'EDZ ne sont pas abordés dans ce chapitre.

l'histoire géologique, ces conditions favorables n'ont pas été interrompues par de quelconque(s) événement(s) au cours desquels se serait produite une augmentation de la migration des fluides à travers la formation hôte, de sorte qu'on puisse affirmer qu'aucun événement de ce type ne risque d'intervenir à l'avenir. Dans le cas contraire, il faudra démontrer que ces événements n'altéreront pas la capacité de la formation hôte à jouer efficacement son rôle de barrière géologique pour empêcher la migration des radionucléides. Ceci peut être obtenu, par exemple, en démontrant que la probabilité d'une nouvelle manifestation de ces événements est très faible, ou que leurs effets sur les propriétés d'isolement de la formation hôte seraient négligeables.

Si cependant il s'avère que la possibilité d'une migration à travers la formation hôte ne peut pas être écartée et que l'absence d'impacts négatifs sur les propriétés de confinement du site de stockage ne peut pas être démontrée sans équivoque, il faudra alors incorporer cette migration dans les modèles globaux du système de stockage et ses conséquences devront être formellement et quantitativement évaluées.

6.3 Questions scientifiques abordées dans ce chapitre

Les questions scientifiques qui seront analysées dans ce chapitre visent à savoir si la formation hôte a pu présenter, dans le passé, les caractéristiques d'un comportement de "système ouvert". Pour cela nous poserons la question suivante : existe-il des données géologiques (minéralogiques, géochimiques) qui pourraient représenter des traces de migration de phase liquide ou gazeuse dans, depuis, ou à travers la formation d'argilite du Callovo-Oxfordien, qui se seraient produites dans le passé géologique ? Ensuite nous déterminerons : (a) si les données rassemblées au cours des études scientifiques de l'ANDRA sont suffisantes pour garantir une compréhension solide de la phénoménologie mise en jeu; (b) si le programme de recherche de l'ANDRA semble adapté pour fournir une caractérisation satisfaisante des processus; et (c) quelles actions doivent être entreprises pour acquérir les connaissances nécessaires.

Nous voulons tout d'abord démontrer que les questions relatives au comportement en "système ouvert" de la formation hôte du Callovo-Oxfordien sont justifiées. La règle III.2.f stipule que l'étude de l'hydrogéologie d'un éventuel site de stockage doit être effectuée dans le contexte de l'hydrogéologie régionale, *"prenant en compte les flux depuis les zones d'alimentation jusqu'aux exutoires"*. Ceci exige donc une recherche au niveau de l'ensemble du Bassin parisien. A cette échelle, certains éléments prouvent une circulation des eaux entre les formations géologiques ("cross formational flow"). Le terme "cross formational flow" est défini par Worden et Matray comme *"le mouvement de l'eau d'une formation perméable à une autre à travers une ou plusieurs formations imperméables"*³⁹¹. Ces auteurs ont documenté un tel écoulement vertical à travers plusieurs centaines de mètres d'argilite liasique, depuis le grès du Trias de la formation de Chaunoy au carbonate du Dogger du Jurassique moyen. Les traces du "cross formational flow" ont été révélées par les minéraux secondaires ainsi que par les compositions chimiques et isotopiques des eaux prélevées dans ces formations. Par

³⁹¹ Worden and Matray, 1995, p. 53.

conséquent, dans le contexte des études du site de Bure, il semble justifié d'évaluer la possibilité d'écoulements à travers la formation d'argilite hôte du Callovo-Oxfordien, entre le Dogger perméable et les formations carbonatées de l'Oxfordien moyen et supérieur.

Les recherches menées par l'ANDRA et ses partenaires scientifiques ont montré que des eaux, autres que celles des eaux de formation, ont circulé dans les roches carbonatées de la région Est du bassin parisien où elles ont causé une cimentation omniprésente, y compris à proximité immédiate du site de Bure³⁹². Les origines, et le mode de circulation de ces eaux demeurent cependant mal compris puisque la période pendant laquelle la circulation s'est manifestée demeure indéterminée.

L'importance de la recherche sur les minéraux secondaires est ainsi présentée dans le programme scientifique de l'ANDRA :

« La caractérisation minéralogique et géochimique des remplissages des discontinuités éventuellement rencontrées dans les puits et galeries du laboratoire souterrain permet de préciser les périodes de paléo-percolation de fluides. Cette information, une fois mise en cohérence avec le modèle tectonique du site, donnera les éléments permettant ou non de prendre en compte le transport des radionucléides par convection dans des discontinuités du Callovo-Oxfordien dans le modèle conceptuel de transport³⁹³. »

Un autre signe de la possibilité de comportement en "système ouvert" de la formation hôte dans le passé, a été établi par la détermination des propriétés moléculaires et isotopiques caractéristiques de l'origine thermogénique (et donc, de la grande profondeur de leur provenance) des gaz d'hydrocarbures dans les argilites du Callovo-Oxfordien³⁹⁴. Ici aussi, l'origine des gaz, comme le caractère et la date de leur migration ne sont pas connus. Nous aborderons ces questions en détail ci-dessous.

6.4 Minéraux secondaires

6.4.1 Calcite de fracture et de remplissage sur le site de Bure : aperçu d'ensemble

Les calcites secondaires dans les fractures et les cavités dans l'Oxfordien sus-jacent, dans le Dogger sous-jacent et, à un moindre degré, dans les formations de la couche hôte du Callovo-Oxfordien ont été au centre des études de l'ANDRA et de ses partenaires scientifiques depuis plusieurs années. L'importance de ces minéraux est résumée ainsi : *"Néanmoins, ces carbonates sont les seuls éléments significatifs du point de vue de l'ouverture des systèmes et des transferts et permettent de conclure que même si des*

³⁹² Buschaert, 2001, Maes, 2002, Buschaert et al., 2004, ANDRA, 2001, 2002.

³⁹³ ANDRA, 2002-2005, p. 22.

³⁹⁴ Girard et al., 2002, BRGM, 2003.

fluides sont présents à tout moment de l'histoire des systèmes, seules quelques crises majeures de percolation ont été enregistrées par les minéraux." ³⁹⁵ .

Alors que la plupart des minéraux secondaires étudiés provenaient des roches carbonatées situées au dessus et en dessous de la formation hôte, des minéraux ont aussi été trouvés dans la formation oxfordienne riche en argile.³⁹⁶ Par conséquent, il semblerait que la circulation des fluides à l'origine du dépôt de minéraux secondaires n'a pas été limitée aux roches carbonatées, relativement perméables mais, dans une certaine mesure, a aussi concerné la formation hôte d'argilites « imperméables ». Les résultats et les interprétations les plus significatifs sont récapitulés ci-dessous.

Les études sur les isotopes stables³⁹⁷ ont démontré que des minéraux ont été déposés par les eaux météoriques continentales sur la base des données $\delta^{18}\text{O}$. Le carbone, lui, viendrait des carbonates du substratum rocheux (sur la base des données $\delta^{13}\text{C}$), ce qui suggère soit des rapports faibles entre eau et roche soit une grande profondeur de leur provenance³⁹⁸. Les études sur les inclusions fluides ont démontré que les eaux à l'origine de la formation des minéraux étaient légèrement chaudes (30-40 °C) et salines (2,7 % en poids de NaCl)³⁹⁹. Les études des isotopes du Strontium ont montré que quelques calcites ont des rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ sensiblement plus radiogéniques que ceux de la roche environnante, ce qui indiquerait que les formations triasiques profondes pourraient être à l'origine des fluides⁴⁰⁰. De même des valeurs radiogéniques ont été déterminées dans des minéraux des failles tectoniques régionales, comme, par exemple, le Fossé de Gondrecourt. Les données sur les éléments traces et des compositions des lanthanides suggèrent que parmi les calcites de fractures il pourrait y avoir deux variétés d'origine, une dérivée directement des carbonates de la roche et l'autre déposée par une eau « exotique »⁴⁰¹. A ce jour, aucune donnée robuste/fiable n'est disponible sur les âges exacts de la calcite. La première tentative de datation de la calcite à partir des forages de l'ANDRA par la méthode Uranium-Thorium suggéraient que l'âge des échantillons était probablement supérieur à 500 000 années (limite supérieure conventionnelle de l'applicabilité de la méthode Uranium-Thorium)⁴⁰². Les documents de l'ANDRA indiquent que le travail dans cette direction pourrait être en cours⁴⁰³.

³⁹⁵ ANDRA BET 2001, p. 85.

³⁹⁶ Deux occurrences minérales ont été signalées dans les argilites du Callovo-Oxfordien à -356.2 and -371 m par Buschaert et al., (2004), pp. 1210-1211.

³⁹⁷ Buschaert, 2001), Buschaert et al., 2004).

³⁹⁸ ANDRA Référentiel Géologique Tome 3, 2001, Buschaert, 2001).

³⁹⁹ Ayt Ougougdal et al., 1996), Buschaert, 2001).

⁴⁰⁰ Maes, 2002).

⁴⁰¹ Lecocq, 2002).

⁴⁰² Deschamps, 2003).

⁴⁰³ ANDRA, 2002-2005).

6.4.2 Hypothèses concernant l'origine des minéraux secondaires et leurs implications paléo-hydrogéologiques

6.4.2.1 Hypothèses concernant l'origine des minéraux secondaires

Les premières études sur les inclusions fluides des ciments de calcite du forage HTM102 effectuées en 1996 ont été basées sur l'hypothèse implicite que la calcite est une phase diagénétique⁴⁰⁴. Par conséquent, son origine a été présumée *a priori* et n'est pas abordée dans cette étude. Les études suivantes sur les isotopes stables ont cependant démontré qu'au moins une partie des ciments de calcite a été déposée par des eaux météoriques ce qui soulève par conséquent la possibilité qu'au moins une partie de ces minéraux soit d'origine épigénétique. Dans le Référentiel Géologique de 1999, l'incertitude concernant l'origine des minéraux a été explicitement énoncée :

« Ce fluide est interprété comme d'origine continentale, mais pourrait éventuellement être constitué d'un mélange entre des eaux météoriques et de l'eau d'origine marine. Les calcites des géodes et fractures proviendraient donc des interactions entre la roche encaissante avec soit des eaux de surface qui se seraient infiltrées durant des périodes d'émersion, ou avec des fluides profonds lors de leur remontée à travers des zones de failles⁴⁰⁵. »

A ce stade de la recherche les questions auxquelles des chercheurs ont été confrontés ont été formulées comme suit :

« Dans le cadre des reconstructions des paléo écoulements, une question importante consiste à comprendre à quelle(s) phase(s) de circulation peuvent être dus les vides aujourd'hui colmatés ou non par de la calcite, dissolution précoce ou fluides postérieurs ? origine minéralogique (calcite ?, aragonite ?) et devenir de la matière dissoute ? Si l'on interprète les cristallisations dans ces cavités par des circulations d'eaux météoriques, comment explique-t-on l'importance de vides résiduels et la présence de cavités sans aucune sparite secondaire ?, faibles perméabilités ?, circulations localisées sur des discontinuités structurales ?, dissolutions secondaires ?, d'où vient la matière à l'origine des cristallisations ?⁴⁰⁶. »

Ces questions, très pertinentes, ont été abordées grâce à une série de projets de doctorat parrainés par l'ANDRA, traitant de différents aspects de la géochimie de ces minéraux. Dans l'un d'eux une étude couplée sur les inclusions fluides et les propriétés des isotopes stables des calcites a été effectuée⁴⁰⁷. Bien que cette étude ait fourni une importante quantité de données géochimiques, elle n'a pas résolu la question de l'origine des minéraux. Les résultats de l'étude peuvent être formulés comme suit: (a) les eaux qui ont causé la minéralisation n'étaient pas diagénétiques; elles contenaient une importante quantité d'eau continentale météorique; (b) l'origine des fluides (eaux de surface, eaux situées en profondeur) est inconnue; (c) le mode du mouvement de l'eau (ascendant ou

⁴⁰⁴ Ayt Ougougdal et al., 1996.

⁴⁰⁵ ANDRA Référentiel Géologique Tome 3, 2001, p. 31. C'est nous qui soulignons.

⁴⁰⁶ Lahuitier et al., 2002, p. 36.

⁴⁰⁷ Buschaert, 2001.

descendant) et la raison de la circulation sont inconnus; et (d) l'époque de la circulation est indéterminée.

Les données géochimiques obtenues semblent être quelque peu contradictoires : d'une part, les valeurs $\delta^{18}\text{O}$ de la calcite sont nettement plus négatives que celles des carbonates marins, suggérant de ce fait une implication des eaux continentales météoriques. D'autre part, les valeurs $\delta^{13}\text{C}$ de la calcite sont positives, semblables à celles du stratum rocheux, ce qui n'est pas cohérent avec les sources de carbone en surface et peut être attribué à l'origine locale du carbone (des roches encaissantes, avec des rapports eau-roche faibles), ou aux sources situées en profondeur. De plus, la salinité des paléo-eaux est élevée (concentration env. 2,6 % en masse), de sorte qu'elle implique des sources de sels sur le passage des fluides. Une source possible est l'halite et les saumures de la formation triasique de Keuper au bas de la succession des couches sédimentaires.

Une autre étude s'est intéressée aux isotopes du Sr dans les calcites des forages de Bure ainsi que dans plusieurs occurrences régionales⁴⁰⁸. Une partie des minéraux étudiés a montré que les valeurs du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ étaient considérablement plus radiogéniques que les valeurs marines correspondantes. Il en a été conclu que les minéraux ne pouvaient pas avoir pu être déposés par des eaux (marines) diagénétiques, et qu'elles n'avaient pas non plus été formées par la dissolution-reprécipitation des roches carbonatées avoisinantes. Les minéraux ont été déposés par une eau de type "exotique" qui est probablement entrée en contact et a réagi avec les roches triasiques sous-jacentes (celles-ci ont des valeurs de rapport radiogénique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$). A l'échelle régionale, les valeurs les plus radiogéniques en Sr ont été mesurées dans la calcite trouvée dans le graben de Gondrecourt.

A la suite de ces études plusieurs hypothèses (ou variantes de ces hypothèses) ont été proposées: (a) la circulation superficielle de l'eau continentale infiltrée dans le bassin par des zones de failles et ensuite son déplacement latéral; (b) l'infiltration directe des eaux souterraines dans la macro- et microporosité des calcaires; (c) la montée de l'eau des zones profondes à travers le système régional de failles suivie par un mouvement latéral à partir des failles le long des formations perméables carbonatées. Les ciments de calcite déposés par ces eaux ont engendré une importante réduction de la porosité effective de ces roches carbonatées.⁴⁰⁹

A ce jour, l'époque à laquelle la circulation s'est produite demeure indéterminée. Selon l'interprétation sur l'origine des minéraux, on la situe soit à l'établissement du graben du Rhin (post-Oligocène⁴¹⁰) soit à l'activité magmatique alcaline associée (Pliocène inférieur ou Oligocène supérieur⁴¹¹). Le bilan des études en 2004 a été résumé comme suit : *"dans l'état actuel des connaissances, aucun argument fort ne permet de résoudre la question."*⁴¹²

⁴⁰⁸ Maes, 2002.

⁴⁰⁹ Buschaert et al., 2004.

⁴¹⁰ Maes, 2002.

⁴¹¹ Buschaert et al., 2004.

⁴¹² Buschaert et al., 2004, p. 1213.

Il est important d'insister à nouveau ici sur le fait que, bien que la plupart des minéraux secondaires qui ont été étudiés provenaient des roches carbonatées situées au-dessus et en dessous de la formation hôte, les traces de(s) événement(s) responsable(s) de leur dépôt ont également été trouvées dans les argilites de la couche Oxfordienne.

« Formation Oxfordienne riche en argile: Aucune cavité macroscopique remplie par de la sparite n'a été trouvée dans la formation riche en argile. Les seuls éléments qui ont été identifiés à cet égard sont (i) à la profondeur de 356 m, une fracture minuscule (quelques dizaines de μm d'épaisseur) dont les dimensions ne se prêtent pas à une analyse globale (bulk analysis), qui a donné une valeur pour le rapport $\delta^{18}\text{O}$ de 21,8 ‰ par SIMS [spectrométrie de masse des ions secondaires] et (ii) des cavités microscopiques remplies de calcite dans un deuxième échantillon, avec des résultats isotopiques semblables (tableau 4) Ces données impliquent que, bien que la totalité de la fraction carbonatée (25-30 % en masse des roches) dans la formation riche en argile n'ait pas subi de changement isotopique suite à l'événement de cimentation/recristallisation identifié dans les calcaires, des empreintes subtiles (microfissures) de cet événement sont localement présentes."⁴¹³

En conséquence, quelle que soit l'origine des fluides et le mécanisme de leur migration, il semble que la migration elle-même ne s'est pas limitée aux roches carbonatées relativement perméables mais que, dans une certaine mesure, les argilites "imperméables" de la formation hôte ont aussi joué un rôle. Par conséquent, une autre hypothèse peut être ajoutée à la liste : une migration verticale des fluides, localisée dans le temps et l'espace, directement à travers la formation des argilites du Callovo-Oxfordien.

6.4.2.2 L'hypothèse principale de l'ANDRA concernant les implications hydrogéologiques des minéraux secondaires

Selon le Programme Scientifique de l'ANDRA pour 2002-2005 :

« Un ensemble d'études sera mené dans le cadre de thèses, d'actions GdR Forpro ou en partenariat ANDRA/BRGM. Il est focalisé sur la caractérisation et l'interprétation des distributions des rapports isotopiques – dans les cristallisations de fractures et dans la roche environnante – des éléments marqueurs des périodes de percolation afin de valider l'hypothèse d'une absence de circulation de fluides dans ces discontinuités aux échelles de temps retenues pour les analyses de sûreté. »⁴¹⁴

Comme il ressort de la citation ci-dessus, l'ANDRA semble n'avoir proposé qu'une seule hypothèse de travail, et des efforts de recherche ne visant qu'à sa confirmation. Nous

⁴¹³ Buschaert et al., 2004, pp. 1210-1211, c'est nous qui soulignons.

⁴¹⁴ ANDRA, 2002-2005, p. 23, c'est nous qui soulignons.

remarquons que cette approche est potentiellement risquée et non conforme à la "méthode d'hypothèses de travail multiples" ⁴¹⁵. Les dangers d'une approche à "hypothèse unique" ont été soulignés par Schumm :

« Quand une seule hypothèse est produite et qu'une tentative est faite pour démontrer son exactitude, elle devient 'l'hypothèse principale', qui domine la pensée de l'investigateur et peut amener à une erreur grave. La meilleure méthode consiste à développer autant d'explications que possible pour un phénomène. Pendant le processus de la collecte de données, ces hypothèses sont modifiées ou éliminées jusqu'à ce qu'une solution soit développée, ou peut-être jusqu'à ce que des explications ou hypothèses multiples soient combinées pour obtenir une solution ou une théorie composée. » ⁴¹⁶

L'hypothèse principale de l'ANDRA est bien plus problématique parce qu'elle postule les implications des minéraux pour la performance du site d'enfouissement (plus particulièrement, l'absence de circulations au cours des échelles de temps qui nous concernent) avant (a) d'établir sans équivoque l'origine des minéraux et des fluides formant les minéraux, et (b) de déterminer la chronologie de la circulation.

6.4.3 Statut de la recherche et projets de l'ANDRA pour la recherche sur les minéraux secondaires.

6.4.3.1 Couverture spatiale des échantillons

La couverture spatiale des échantillons utilisés dans les études des minéraux secondaires est résumée dans le tableau 1 (ce tableau est basé sur les documents disponibles au moment de la préparation de ce rapport). Il est évident que la plupart des données disponibles à ce jour proviennent d'un ou deux forages, plus de quelques échantillons pris à des affleurements caractérisant une surface d'environ 1600 km². Par conséquent, même si les données acquises jusqu'à maintenant sont utiles pour comprendre les processus impliqués dans le dépôt des minéraux, les données ne suffisent pas pour le travail de caractérisation du site.

⁴¹⁵ Chamberlin, 1890. , , , , Le géologue Thomas Chrowder Chamberlin, 1843-1928 a été président de l'Université du Wisconsin, directeur du Walker Museum à l'Université de Chicago, président de l'American Association for the Advancement of Science, et le fondateur et le rédacteur en chef du Journal of Geology. Chamberlin a fait son intervention sur "La méthode des hypothèses de travail multiples" devant la Society of Western Naturalists en 1889, et il a été publié dans Science en 1890 (v. 15, p. 92-96) et le Journal of Geology en 1897 (v. 5, p. 837-848). De façon à faire progresser le fondement scientifique dans la prise de décision, Chamberlin a recommandé des essais rigoureux sur de multiples hypothèses de travail. L'article de Chamberlin a inspiré un tel respect que Science en a repris la publication dans son intégralité en 1965 (v. 148, p. 754-759). La méthode est actuellement considérée par de nombreux chercheurs comme un important outil pratique pour rendre la recherche plus productive et efficace (par ex., Platt, 1964, Twenley et al., 1981, Schumm, 1991. Le texte de l'article de Chamberlin est consultable sur <http://www.accessexcellence.org/RC/AB/BC/chamberlin.html>.

⁴¹⁶ Schumm, 1991, p. 11.

Approach, method, technique	Local scale		Regional scale (~1600 km ²)		Analytic resolution	Source
	Boreholes	Number analyses	Number of locations	Number analyses		
Stable isotopes (C and O)	HTM102	28	11	24	Mostly low (5-10 mg); few analyses at high resolution (10-20 µm)	Buschaert (2001), Buschaert et al. (2004)
	EST103/106	5				
Fluid inclusions – temperatures	HTM102 EST103/106	6	-	-		Buschaert (2001)
Fluid inclusions – temperatures	HTM102	6 (from 33 sections)	-	-		Ayt Ougougdal et al. (1997)
Fluid inclusions – temperatures		Several (from 18 sections)				
Fluid inclusions – salinities	HTM102	2				Ayt Ougougdal et al. (1997)
Fluid inclusions – salinities	HTM102 EST103/106	6	-	-		Buschaert (2001)
Sr isotopes	HTM102	25	ca. 22	41	Low, 5 mg from a larger ground sample	Maes (2002)
	EST103/106	4				
REE and trace element analyses	HTM 102	~240 analyses from 29 samples	-	-	High, 30x30 to 100x100 µm	Lecocq (2002)

6.4.3.2 Recherche future/prévue

Les projets pour la recherche future/de recherche à venir sont définis dans le Programme scientifique de l'ANDRA pour 2002-2005 sous les rubriques suivantes : **II.2. Fluides actuels et interactions fluides roches / II.2.1. Identification des différents événements diagenétiques, conséquences en terme de minéralogie et texture**⁴¹⁷. Dans la section **II.2.1.2. Etat actuel des connaissances**, deux thèses consacrées à la migration des eaux dans les calcaires oxfordiens, ainsi que dans des fractures à l'échelle du secteur sont brièvement mentionnées "*pour préciser les processus de diagenèse et en dater, si possible les différentes phases.*" Dans la section **II.2.1.3. Programme de recherche, jalons et principaux livrables** les buts de la recherche sont énoncés en termes très vagues, comme par exemple "*L'élaboration du modèle reconstituant l'histoire*

⁴¹⁷ ANDRA, 2002-2005, pp. 18-19.

géologique et géochimique postérieure au Callovo-Oxfordien avec ses conséquences en terme de relation liquide-solide ...". Là encore, nous estimons que l'imprécision des buts et l'absence de priorités pour la recherche ne sont pas adaptées à un processus potentiellement perturbateur. Le document présente la fin de l'année 2003 comme une date butoir pour le développement du modèle mentionné ci-dessus; son extrapolation vers le futur et l'évaluation des conséquences des processus inclus dans le modèle doivent être achevées fin 2004⁴¹⁸. Cependant, l'analyse des données présentées dans ce chapitre suggère que l'ANDRA n'a pas encore élaboré une compréhension correcte des processus de la migration qui conduisent au dépôt des minéraux secondaires. Nous soutenons que tout modèle général qui n'inclut pas ces processus importants serait nécessairement insatisfaisant, et d'une utilité limitée.

Les projets spécifiques, tels que présentés dans ANDRA (2002-2005), se limitent à deux thèses traitant (1) des échanges géochimiques entre minéraux et fluides du Callovo-Oxfordien, et (2) les couplages entre les caractéristiques du régime et conditions d'écoulement et la géométrie de la porosité. Ce programme de recherches, ne nous semble pas adéquat. Il n'apporte aucun projet spécifique de recherche sur les minéraux secondaires. Par exemple, la question de l'ancienneté des calcites épigénétiques n'est même pas mentionnée. L'origine des minéraux et la phénoménologie des processus moteurs ne sont pas suffisamment comprises pour justifier la perte de la dynamique de la poursuite de ces études ou même leur arrêt complet, comme semble le laisser entendre le programme de recherche.

Entre temps des contacts informels avec l'ANDRA laissent à penser que des activités sont en cours. Par exemple, dans les commentaires de notre travail dans la version préliminaire du rapport de l'IEER, l'ANDRA a indiqué que « *toute fissure reconnue en forage est systématiquement analysée* » et que des progrès substantiels ont été accomplis dans la datation Uranium-Plomb (U-Pb) de la calcite secondaire. Malheureusement, nos questions écrites, soumises à l'ANDRA en juillet 2004, se rapportant à des projets de recherches spécifiques, sont restées sans réponse. Nous estimons qu'en refusant de présenter de manière claire et transparente son programme de recherche détaillé et de mettre à la disponibilité du public les résultats de ses recherches l'ANDRA ne peut que desservir sa cause.

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

Dans cette section nous analyserons quelques aspects techniques des données disponibles sur les minéraux secondaires. Cette discussion technique est nécessaire pour justifier certaines de nos recommandations présentées ci-dessous.

6.4.4.1 La question de la résolution des analyses isotopiques

³¹ ANDRA, 2002-2005, p. 19.

Au cours de la lecture des documents techniques de l'ANDRA nous avons noté que, dans beaucoup de cas, les analyses des isotopes stables de la calcite avaient une faible résolution spatiale. La majeure partie des données a été obtenue à partir d'échantillons relativement grands, de 5 à 10 mg, ce qui est tout à fait rudimentaire pour une étude de genèse minéralogique (particulièrement si l'on tient compte du fait que les occurrences minérales sont généralement très petites). Le test de la méthode *in situ* pour des analyses de $\delta^{18}\text{O}$ (définition spatiale de 10-20 μm) faites par des chercheurs de l'ANDRA a donné des résultats encourageants. Cet aspect est illustré par la comparaison des résultats "conventionnels" ou "bulk" avec ceux des données *in situ* obtenus à partir de la méthode de micro-sonde ionique (fig. 6.1). Il apparaît que la calcite de géodes et fractures, analysée à une échelle suffisamment détaillée, manifeste une variabilité des valeurs $\delta^{18}\text{O}$ qui peut atteindre environ 6,5‰, tandis que les analyses conventionnelles sur 28 échantillons différents font apparaître une variabilité globale de seulement 2,2‰ (zone grisée de la figure 1). Par conséquent, bien qu'une analyse conventionnelle ait fourni une information importante aux premiers stades de la recherche, elle devient clairement insatisfaisante au stade de l'étude de genèse détaillée⁴¹⁹.

6.4.4.2 Etudes sur les inclusions fluides des minéraux de basses températures

Il ressort du tableau 1 que le nombre de mesures sur les températures des inclusions fluides obtenues les 8 dernières années est assez réduit - de l'ordre d'une douzaine seulement. Nous sommes conscients du fait que l'aspect de faible température de la calcite rend le travail difficile. En fait, le réchauffement accidentel des échantillons pendant leur manipulation, leur découpage, ou même le transport peut amener à la perte totale d'inclusions mesurables. Ce problème a été constaté et résolu grâce au développement d'un strict protocole d'Assurance Qualité, pour le projet Yucca Mountain Thermochemistry⁴²⁰.

⁴¹⁹ Pour une certaine raison les résultats des analyses SIMS *in situ* ne sont ni discutés ni interprétés dans les revues scientifiques mises à notre disposition sur ce sujet. (Buschaert 2001; Buschaert et al. 2004).

⁴²⁰ Le projet Yucca Mountain Thermochemistry (1999-2001) visait à déterminer les températures de la formation des eaux qui ont déposé des minéraux secondaires dans les roches choisies pour l'évacuation des déchets nucléaires de haute activité dans le sud du Nevada, aux Etats-Unis. Wilson et al., 2003

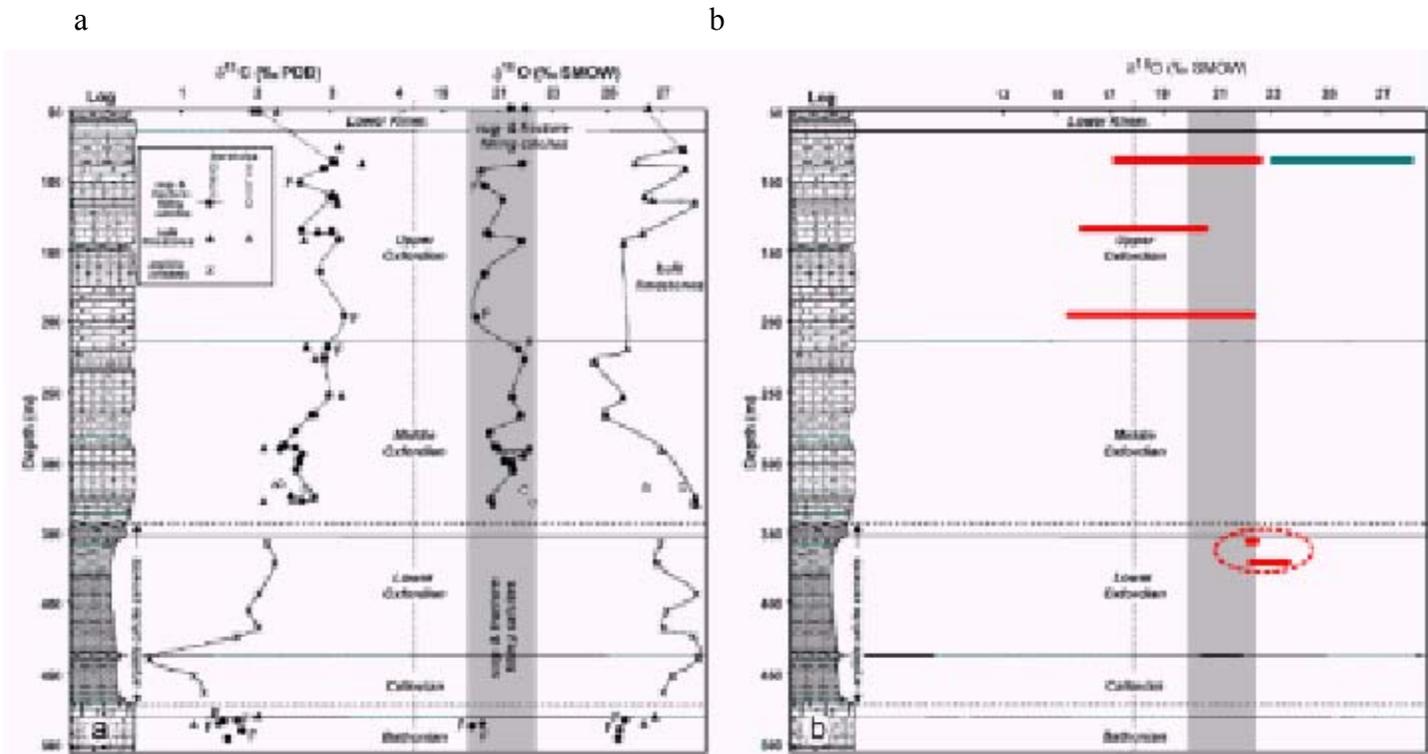


Figure 6.1 : Comparaison des valeurs $\delta^{18}\text{O}$ mesurées par des méthodes “conventionnelles” (bulk) (noir et blanc, données de Buschaert 2001 et 2004) et des valeurs obtenues par la méthode SIMS in situ (rouge et bleu, ce rapport IEER). Les données présentées dans Buschaert et al. (2004) sont représentées sur le graphe de Buschaert (2001). Rouge : fracture de calcite, bleu : calcaire.

Note : en plus des calcaires du Bathonien, de l'Oxfordien et du Kimmeridgien, de la calcite « isotopiquement légère » a été trouvée dans les argilites du Bas Oxfordien

Nous faisons confiance aux scientifiques chargés de cette recherche pour l'ANDRA pour prendre toutes les précautions nécessaires en vue d'éviter toute perte de donnée résultant d'une mauvaise manipulation des échantillons. Malheureusement les documents que nous avons en notre possession⁴²¹ ne contiennent pas de description de ces précautions, bien que, dans des communications récentes, l'ANDRA indiquait qu'elles avaient été suivies⁴²². Nous recommandons que ces précautions soient formulées sous forme de procédures strictes d'assurance qualité, qui régissent l'acheminement complet d'un échantillon depuis le point de collecte sur le terrain jusqu'à l'étape dans le laboratoire. L'exécution par l'ANDRA de cette mesure relativement simple pourrait lui éviter une éventuelle remise en cause de la qualité de ses données à l'avenir. Notre expérience dans l'élaboration d'un protocole d'assurance qualité pour le projet "Thermochronologie de Yucca Mountain" indique que quelques mesures qui, dans d'autres circonstances, auraient été considérées comme excessives (par exemple la mise en place de thermographes dans les colis dans lesquels des échantillons sont transportés, de l'installation de découpage et de polissage au laboratoire), peuvent dans ce cas être justifiées.

6.4.4.3 Les leçons de l'expérience de Yucca Mountain – les études sur les isotopes stables et les inclusions fluides

La planification de la recherche sur la calcite secondaire du site de Bure peut tirer profit d'un examen du déroulement d'études semblables effectuées à différents emplacements envisagés pour le stockage géologique des déchets nucléaires. Un problème, très semblable à celui que nous analysons dans ce chapitre, s'est présenté à Yucca Mountain dans le Nevada, le site proposé pour l'enfouissement des déchets nucléaires de haute activité aux Etats-Unis. Là aussi, des minéraux secondaires (principalement de la calcite) ont été découverts dans les tufs rhyolitiques du Miocène et on a tenté de comprendre leur origine et leurs implications hydrogéologiques en utilisant les méthodes d'isotopes stables et d'inclusions fluides.

Au début, par beaucoup d'aspects, les études d'inclusions fluides et des isotopes de la calcite secondaire de Yucca Mountain ont ressemblé à celles menées par l'ANDRA à Bure. En premier lieu, il y avait une certaine pénurie d'échantillons, parce que toute la roche disponible pour des analyses ne provenait que de 4 ou 5 forages. En deuxième lieu, des méthodes d'analyses isotopiques "conventionnelles" de faible résolution spatiale ont été utilisées (échantillons de plusieurs mg). Les premières études ont indiqué l'existence des deux lithofaciès avec des propriétés isotopiques radicalement différentes (fig. 6-2). Le lithofaciès "profond" a été interprété comme le produit d'un événement d'altération hydrothermale vieux de 10,5 millions d'années, tandis que l'origine "de l'eau météorique"

⁴²¹ Ayt Ougougdal et al., 1996, Buschaert, 2001, Buschaert et al., 2004

⁴²² Dans son évaluation de la version préliminaire de ce rapport l'ANDRA indiquait que : "... les inclusions fluides ont été recherchées sur lame épaisse, mais aussi sur cristaux clivés de calcite (n'ayant subi aucune préparation) directement pris des carottes et conservés dans des conditions préservant l'intégrité des inclusions fluides. Ce type de prélèvement exclut tout échauffement lors d'une préparation inadéquate susceptible de provoquer l'homogénéisation des inclusions ..."

a été attribuée au lithofaciès "peu profond"⁴²³. En tout, plusieurs dizaines de mesures de $\delta^{18}\text{O}$ et de $\delta^{13}\text{C}$ ont été obtenues.

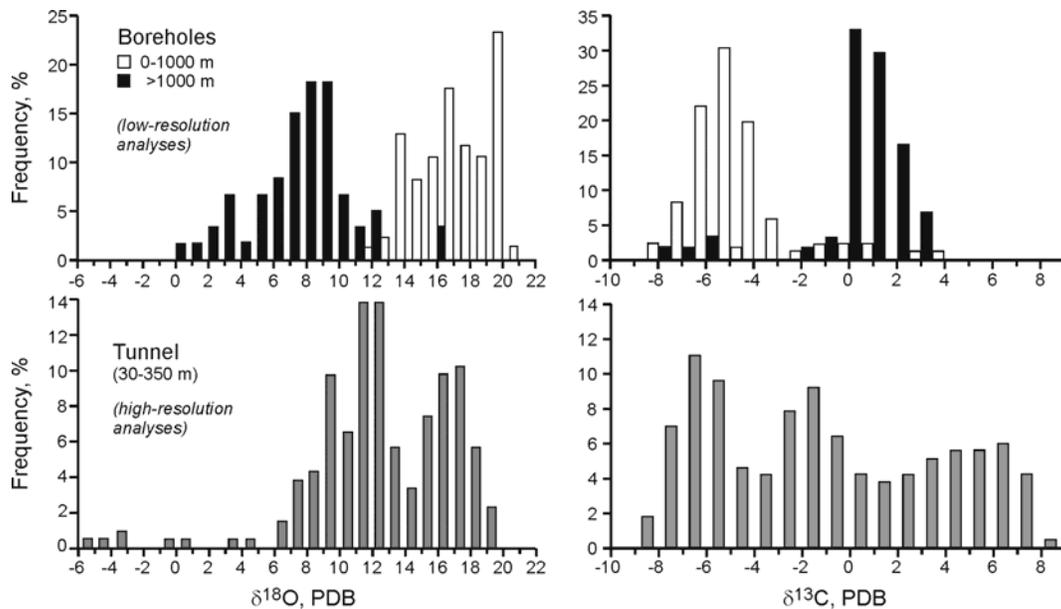


Fig. 6.2. Résultats pour les isotopes stables de la calcite secondaire de Yucca Mountain au Nevada, Etats-Unis. Les graphiques du haut énumèrent les données obtenues d'échantillons prélevés à 4 forages profonds au moyen d'une technique "conventionnelle" (c'est-à-dire que plusieurs mg de calcite sont analysés). Les données, acquises entre 1989 et 1995 semblent clairement démontrer la présence de deux faciès de calcite : (1) grande profondeur (profondeur > 1000 m, caractérisé par un "léger" $\delta^{18}\text{O}$ et un "lourd" $\delta^{13}\text{C}$; noir) et (2) faible profondeur (profondeur < 1000 m, "lourd" $\delta^{18}\text{O}$ et "léger" $\delta^{13}\text{C}$; blanc). Les données représentées dans les graphes du bas ont été acquises entre 1994 et 2001 d'échantillons prélevés dans le tunnel ESF de 7,8 km de long (profondeur entre 30 et 350 m) à l'aide d'une technique beaucoup plus raffinée (<200 μg). La calcite de "faible profondeur", prélevée dans le tunnel ESF, présente un éventail de valeurs dans lequel se trouvent les deux catégories "faible profondeur" et "grande profondeur" précédemment identifiées. Dans beaucoup de cas, l'éventail complet des valeurs des isotopes a été mesuré à travers des couches minérales d'une épaisseur d'environ 1 mm. Les données ont été rassemblées à partir du U.S. DOE (1993) pour les données du forage n=145; Dublyansky (2001) pour les échantillons de calcites du tunnel ESF n = 128f

À partir de 1995, quand le creusement d'un tunnel de 7,8 km de long, l'Exploratory Studies Facility (ESF), a commencé, beaucoup plus d'échantillons ont été disponibles. Par ailleurs, des techniques plus sélectives d'analyse isotopique ont été utilisées, permettant une résolution spatiale d'environ 100-200 μm . Le nombre de mesures publiées à ce jour dépasse 2000. Maintenant que les échantillons provenant du ESF sont étudiés avec une résolution spatiale beaucoup plus fine, ils révèlent que la gamme étendue des valeurs isotopiques, englobant aussi bien les gammes caractéristiques du

⁴²³ For example, NAS-NRC, 1992.

lithofaciès "profond" que du "peu profond", peuvent être trouvées dans des cristaux particuliers qui peuvent atteindre 1 millimètre environ. Ainsi, certaines interprétations initiales ont dû être abandonnées, et de nouvelles ont été proposées⁴²⁴.

L'ANDRA semble actuellement se trouver dans une situation semblable à celle du DOE américain pour ses études sur Yucca Mountain dans le début des années 90. Au site de Bure, la calcite étudiée ne provient que de quelques forages, la roche de cavités souterraines de grandes dimensions n'est pas disponible et la résolution spatiale d'analyse est faible. En attendant, il existe des éléments préliminaires suggérant que beaucoup plus d'informations sur son origine pourraient être obtenues à partir de la calcite secondaire si la résolution spatiale des analyses était augmentée (voir figure 6.6).⁴²⁵

Les résultats des inclusions fluides de l'ANDRA rappellent également les premières études sur Yucca Mountain aux Etats-Unis. En 1993, les chercheurs du DOE américain faisaient état de sept mesures des températures d'homogénéisation de la calcite prélevée à partir de deux forages. En 1998 ils ont annoncé que la calcite des tufs rhyolitiques de Yucca Mountain ne contiennent que des inclusions aqueuses monophasées liquides et provient donc du dépôt des eaux météoriques à température ambiante s'infiltrant vers le bas depuis la surface⁴²⁶. Quand une quantité plus importante de minéraux a été mise à jour dans le tunnel du EFS et a été l'objet d'une étude rigoureuse, les premiers résultats se sont révélés erronés. Des températures d'homogénéisation pouvant atteindre jusqu'à 85-90 °C ont été mesurées dans les échantillons provenant du EFS⁴²⁷. L'absence de découverte d'inclusions fluides biphasées lors des premières expérimentations du DOE s'expliquait par une mauvaise manipulation des échantillons qui avait provoqué l'homogénéisation accidentelle des inclusions⁴²⁸.

L'exemple de Yucca Mountain souligne la nécessité pour le programme de recherche de l'ANDRA sur les minéraux secondaires d'augmenter le nombre d'échantillons à étudier et la résolution des analyses des isotopes stables. La présentation des résultats des études d'inclusions fluides, doit contenir une description explicite des mesures prises pour éviter la perte accidentelle des données au cours de la manipulation et de la préparation des échantillons.

6.5 Hydrocarbures gazeux des argilites du Callovo-Oxfordien

6.5.1 Isotopes et compositions moléculaires des gaz

Des gaz extraits des carottes des argilites du Callovo-Oxfordien ont été étudiés du point de vue de leurs compositions moléculaires et isotopiques. La composition isotopique du carbone du CH₄ (méthane) extrait de 7 carottes a été mesurée. Les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ pour le méthane vont de -53 à -43 ‰ PDB (plus une observation aberrante à -61

⁴²⁴ Dublyansky, 2002, Whelan et al., 2002.

⁴²⁵ Ion microprobe data; Buschaert 2001.

⁴²⁶ Roedder and Whelan, 1998.

⁴²⁷ Dublyansky, 1998, Dublyansky et al., 2001, Wilson et al., 2003.

⁴²⁸ Whelan et al., 2002.

‰). En outre, des quantités "significatives" d'alcane à plus haut poids moléculaire (C₂ à C₄) ont été notées. Sur la base de ses propriétés isotopiques, le méthane des argilites est interprété comme d'origine thermogénique. Si l'on tient compte du passé thermique de la formation Callovo-Oxfordienne, le gaz ne pouvait pas avoir été formé *in situ* : *"Ces valeurs, avec la présence de quantités importantes d'alcane à poids moléculaire plus élevé (C₂ à C₄) associés au CH₄, suggèrent que le méthane adsorbé dans les argilites étudiées est d'origine thermogénique. Puisque la température maximum d'enfouissement dans les argilites C-O n'a pas excédé 50 °C environ, la nature thermogénique du méthane laisse supposer qu'il provient d'une source extérieure et qu'il a migré plus tard dans les argilites. Cette explication concorde avec la présence d'accumulations de gaz naturel dans les environs (à peu près 30 kilomètres) de l'endroit où les échantillons ont été prélevés."*⁴²⁹. Une telle conclusion semble être justifiable, comme l'illustre la [fig. 6-3](#). Il est également important de souligner que le site de Bure est situé dans les limites du bassin houiller lorrain. ([fig. 6-4](#)).

Outre les propriétés isotopiques du méthane, les valeurs des isotopes du carbone ont été mesurées pour les alcanes C₂ et C₃. Les nouvelles données ont conforté l'interprétation évoquée plus haut :

« les signatures isotopiques de tous les hydrocarbures mesurés indiquent clairement un gaz d'origine thermogénique (le gaz d'origine bactérienne, outre le fait qu'il est quasi exclusivement constitué de méthane, présente des $\delta^{13}\text{C}$ plus négatifs que -60). D'autre part, on ne voit aucune évidence de biodégradation des hydrocarbures présents, un tel phénomène affectant principalement le propane qui devrait présenter des $\delta^{13}\text{C}$ plus lourds (moins négatifs). Ces informations montrent que le gaz présent dans ces roches est allochtone, et a pu migrer depuis une roche-mère profonde (où les températures sont suffisantes pour engendrer des hydrocarbures thermogéniques) jusqu'aux argilites prélevées⁴³⁰. »

⁴²⁹ Girard et al., 2002, p. A274; c'est nous qui soulignons.

⁴³⁰ Huiban et al., 2003; c'est nous qui soulignons.

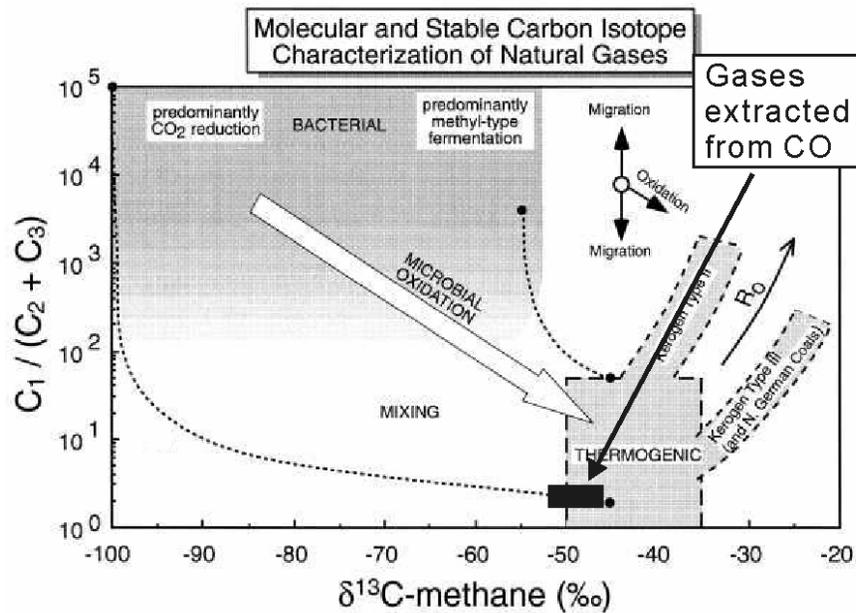


Fig. 6.3. Valeurs des isotopes et des rapports moléculaires des hydrocarbures des argilites du Callovo-Oxfordien (rectangle noir) sur le graphe adopté de Whiticar (1999). Pour les gaz du Callovo-Oxfordien, les données sont de Gaucher et al. (2001) et de Huiban et al. (2003). Réimprimé, avec quelques modifications de *Chemical Geology*, Vol.161, Whiticar M.J., Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane, pp. 291-314, 1999, avec la permission de Elsevier.

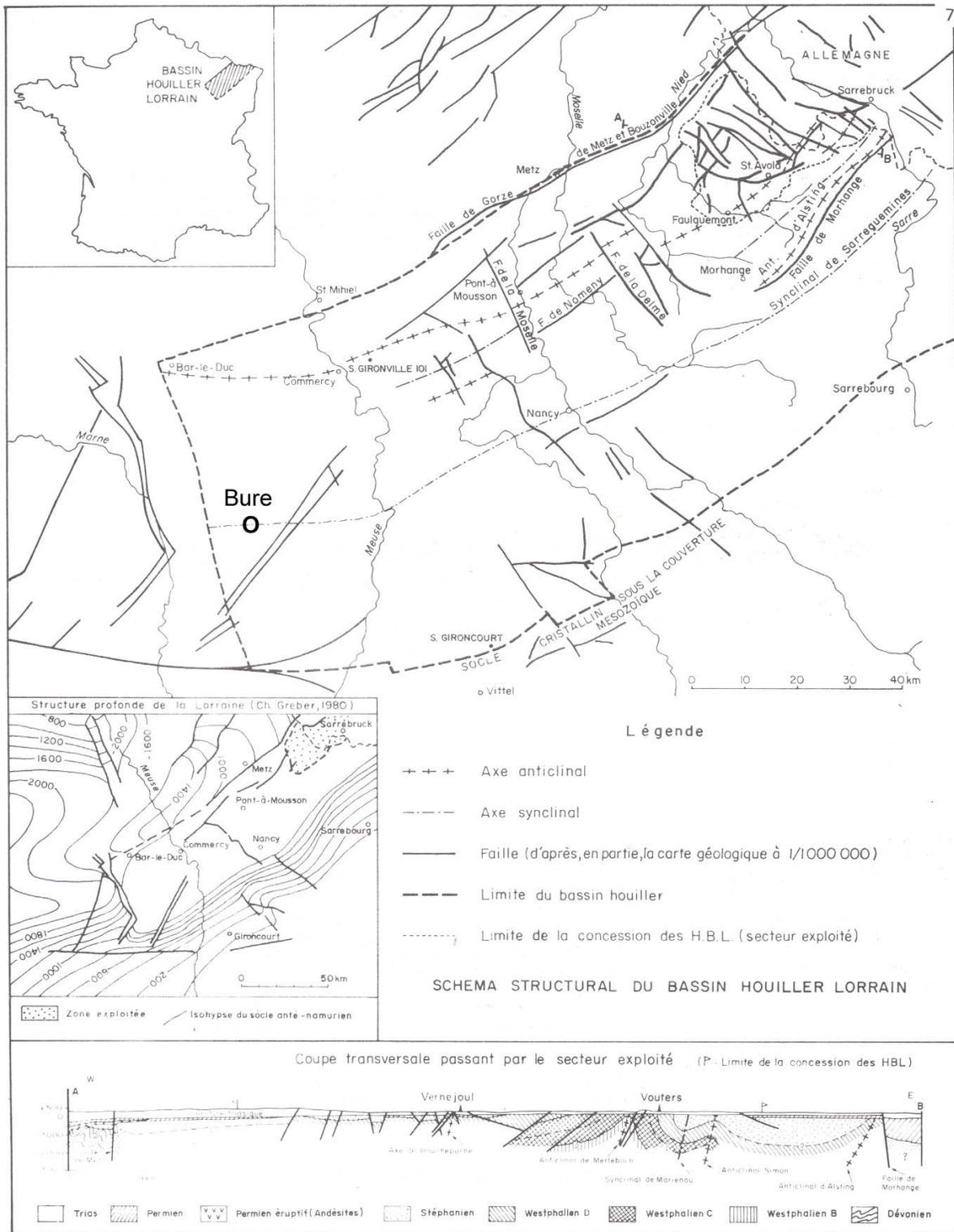


Fig. 2. — Schéma structural du bassin houiller lorrain

Fig. 6.4. Schéma structural du bassin houiller lorrain (Donsimoni, 1981)

6.5.2 Signification des données

Le modèle conceptuel de l'ANDRA considère les argilites du Callovo-Oxfordien comme une unité rocheuse, fondamentalement étanche du point de vue de la migration des fluides⁴³¹. Cependant, comme pour les données sur les minéraux secondaires analysées ci dessus, les compositions isotopiques et moléculaires des hydrocarbures gazeux adsorbés suggèrent que ces hypothèses ne sont pas nécessairement valides: il semble bien qu'à un moment, dans son passé géologique, la formation du Callovo-Oxfordien a été assez perméable pour permettre la migration de gaz venant de l'extérieur (vraisemblablement, de couches plus profondes de la croûte terrestre), dans les argilites. Il est donc important, de comprendre la phénoménologie mise en jeu et de déterminer les dates de la migration. Nous ne pensons pas qu'il soit possible d'évaluer la signification des processus de paléo-migration qui en découlent, du point de vue de la prévision des performances du système du site de stockage, avant que soient clairement établis l'origine des hydrocarbures, les éléments moteurs de la migration, ses mécanismes et le moment où elle est intervenue.

En outre, la compréhension du mécanisme et des causes de la migration des gaz dans (à travers ?) la formation du Callovo-Oxfordien peut également être utile dans le contexte de la question de la génération et de la migration des gaz liés au fonctionnement du site d'enfouissement, une question qui jusqu'ici n'a pas été traitée de façon suffisamment détaillée par l'ANDRA⁴³².

6.5.3 Les projets de recherche de l'ANDRA sur les hydrocarbures gazeux dans la formation du Callovo-Oxfordien

Dans les documents mis à notre disposition, nous n'avons trouvé aucune hypothèse expliquant le processus de migration des hydrocarbures ou l'évaluation du moment où celle-ci aurait pu se produire. Nous avons noté que l'ANDRA, par l'intermédiaire de ses sous-traitants et ses partenaires, mène des études sur les différentes propriétés géochimiques des hydrocarbures (par exemple, dans son projet ISOGAZ). La recherche semble être digne d'intérêt et de haute qualité. Cependant, des programmes spécifiques pour la recherche sur les hydrocarbures ne sont pas clairement formulés dans les documents mis à notre disposition ; ainsi, sans avoir une vue d'ensemble, il n'est pas possible d'évaluer si les programmes sont adaptés.

⁴³¹ Par exemple, ANDRA Référentiel Géologique Tome 1, 2001, Ch.II, p. 12.

⁴³² OECD- NEA, 2003, p. 11, 36.

6.6 Conclusion concernant la pertinence et l'exhaustivité du programme de l'ANDRA

Nous partons de l'hypothèse pour notre analyse que l'objectif global du programme de recherche de l'ANDRA vise à acquérir une base de connaissance suffisante pour émettre un avis sur la capacité du site de Bure à accueillir une installation de stockage de déchets radioactifs. Pour atteindre le niveau de connaissances qui permettrait d'émettre des recommandations cohérentes sur le caractère approprié du site, plusieurs niveaux intermédiaires doivent d'abord être atteints.

Pendant les premières étapes les indices géologiques, minéralogiques et géochimiques des processus (événements) doivent être étudiés, et la nature et l'origine de ces processus doivent être compris (interprétés). L'interprétation de la nature et de l'origine de ces processus est ordinairement approchée en construisant plusieurs modèles phénoménologiques des processus, et puis en envisageant leur cohérence avec les données (la méthode d'hypothèses multiples de travail)⁴³³. Le résultat de cette étape devrait fournir un modèle phénoménologique défendable pour le processus concerné.

Aux étapes ultérieures, une fois que l'origine des processus est établie, le degré de développement du processus au sein du domaine d'étude doit être documenté dans tous les détails. À ce stade, des données spatiales (3-D) et temporelles suffisamment détaillées (de datation) doivent être obtenues.

L'étape suivante se caractérise par l'incorporation des connaissances obtenues dans le modèle global de la performance du site (évaluation de la performance). A moins que les processus étudiés soient jugés tout à fait inoffensifs ou sans conséquences du point de vue de la sûreté du confinement des déchets, un jugement éclairé sur le caractère approprié d'ensemble du site ne sera possible que quand cette dernière étape sera achevée.

À partir de l'analyse de la documentation dont nous avons disposé, nous concluons que l'effort engagé par l'ANDRA pour comprendre l'origine des minéraux semble être généralement solide (bien qu'un certain nombre d'améliorations pourraient être suggérées concernant la méthodologie utilisée ou envisagée; voir ci-dessous à la section 6.7). Cependant, sur la base de l'analyse des documents qui ont été mis à notre disposition, nous concluons que la recherche est à peine parvenue à la fin de la première phase. Quoiqu'un certain nombre d'hypothèses de travail ait été proposé sur l'origine des minéraux, la vérification des hypothèses n'est pas terminée, de sorte qu'il n'existe actuellement aucun modèle conceptuel défendable expliquant l'origine des minéraux et la phénoménologie des processus qui ont mené à leur dépôt.

Nous sommes très préoccupés par le fait que, dans tous les documents disponibles nous n'avons trouvé aucun projet de programme cohérent visant à clarifier la phénoménologie de la paléo-migration des fluides, comportant une caractérisation détaillée de ces processus dans la zone étudiée et finalement une évaluation des implications de ces processus pour la performance du laboratoire grâce à la modélisation.

⁴³³ Chamberlin, 1890.

Nous devons souligner que tout jugement vis-à-vis du caractère approprié du site de Bure ne peut être fait que quand l'étape de caractérisation est franchie, que les processus en question sont incorporés dans le modèle géologique (hydrogéologique) et que les résultats de la modélisation sont satisfaisants du point de vue de la performance attendue du site de stockage. Il reste beaucoup de recherches à mener afin d'acquérir les connaissances nécessaires pour conclure de façon définitive à l'adéquation du site de Bure.

6.7 Recommandations

6.7.1 Recommandation générale

Nous recommandons que les recherches sur les minéraux secondaires et les hydrocarbures gazeux dans les argilites du Callovo-Oxfordien et les roches carbonatées avoisinantes deviennent plus énergiques et ciblées. Le développement d'un programme spécifique pour la résolution de ce problème paraît justifié. L'objectif de ce programme de recherche doit être une compréhension qualitative approfondie et une caractérisation quantitative des processus impliqués. La réussite de la mise en œuvre de ce programme aiderait à la compréhension de l'importance des processus qui ont amené le système à un comportement « ouvert » dans le passé pour la sûreté et la performance de l'installation de stockage de déchets nucléaires prévue. Ceci permettrait ainsi une décision éclairée sur le fait que les processus concernés soient inclus dans le modèle géologique/hydrogéologique formel du site de Bure.

6.7.2 Développement d'un modèle conceptuel de la migration des paléo-fluides

En bref, nous recommandons une adhérence stricte au principe « du travail des hypothèses multiples »⁴³⁴. Une analyse attentive des données disponibles doit être entreprise et une liste exhaustive des hypothèses de travail alternatives expliquant l'origine des fluides qui ont déposé des minéraux secondaires et le caractère des processus qui ont régulé la circulation des fluides doit être établie. Cette liste servirait de point de départ pour les recherches à venir : des expériences visant à tester ces hypothèses doivent être conçues et effectuées. Les données acquises au cours de la phase de recherche ultérieure doivent être utilisées pour éliminer les hypothèses qui ne sont pas étayées par les données nouvellement acquises, ou pour modifier les hypothèses, de manière à ce qu'elles soient cohérentes avec la totalité des données disponibles.

Dans la mesure où l'objectif de cet exercice sera d'avoir, en fin de compte, une seule hypothèse (modèle conceptuel) qui explique de manière cohérente toutes les données disponibles, une attention particulière doit être portée à la conception des expériences susceptibles d'invalider les hypothèses de travail, de façon à ce que les hypothèses qui sont démenties par l'essai puissent être sans risque exclues de la liste.

⁴³⁴ Chamberlin, 1890, Schumm, 1991.

Un exercice similaire doit être entrepris en ce qui concerne les hydrocarbures gazeux trouvés dans les argilites du Callovo-Oxfordien.

6.7.3 Recommandations techniques relatives aux études sur les minéraux secondaires et les hydrocarbures gazeux

6.7.3.1 Minéraux secondaires

1. Plus d'efforts doivent être investis dans les études d'inclusions liquides. La mise en place de protocoles stricts d'assurance qualité pour la manipulation, la préparation et l'entreposage des échantillons est recommandée. Le respect de ces protocoles doit être démontré dans la présentation des résultats, de façon à ce qu'aucune ambiguïté ne demeure sur la qualité des données.⁴³⁵
2. La chimie et, éventuellement, les propriétés isotopiques des gaz emprisonnés dans les inclusions demandent à être étudiées. Elles pourraient élucider des liens génétiques ou des rapports temporels entre la migration des fluides aqueux à l'origine de la formation de minéraux et les hydrocarbures. La spectrométrie de masse tétrapolaire semble être une méthode appropriée pour une étude préliminaire⁴³⁶. La possibilité d'appliquer des techniques modernes et plus précises, doit également être envisagée dans les installations des partenaires scientifiques de l'ANDRA (par exemple la technique de GC-C-IRMS)⁴³⁷.
3. Les résultats préliminaires des études de $\delta^{18}\text{O}$ à l'aide d'une microsonde ionique suggèrent la possibilité de variations importantes (plusieurs ‰) dans certains échantillons. On pourrait s'attendre à des variations semblables pour C. Cette information, potentiellement très précieuse pour la reconstruction génétique, doit être établie. Nous recommandons l'utilisation de la technique de LA-GC-IRMS⁴³⁸.
4. Le résultat préliminaire sur les mesures δD sur les eaux des inclusions liquides de la calcite a été mentionné dans une des thèses parrainées par l'ANDRA⁴³⁹. Nous pensons que cette voie de recherche pourrait s'avérer extrêmement importante. Si ceci n'est pas déjà fait, nous recommandons qu'une technique analytique appropriée soit élaborée, qui tiendrait compte de la caractérisation non seulement de l'hydrogène, mais également de la composition isotopique de l'oxygène des eaux libérées par les inclusions liquides. Des progrès importants dans ce domaine ont été récemment rapportés⁴⁴⁰.

⁴³⁵ Les procédures de qualité assurance développées pour le Yucca Mountain Thermochronology Project à l'Université du Nevada peut être consulté sur le site web: <http://hrcweb.nevada.edu/qa/>.

⁴³⁶ See e.g., Newman et al., 1996.

⁴³⁷ Gas Chromatography-Combustion- Isotopic Ratio Mass-Spectrometry.

⁴³⁸ Laser Ablation-Gas Chromatography-Isotopic Ratio Mass-Spectrometry; Sharp and Cerling, 1996.

⁴³⁹ Buschaert, 2001, p. 7-224.

⁴⁴⁰ Dennis et al., 2001, Sharp et al., 2001.

5. Dans les documents mis à notre disposition nous n'avons malheureusement pu trouver que très peu de résultats des études des isotopes la chaîne de désintégration de l'uranium (c'est-à-dire, de l'uranium 238 au plomb 206 et de l'uranium 235 au plomb 207) dans la calcite secondaire. La seule information disponible, provenant d'une thèse récente parrainée par l'ANDRA, est que le système uranium 234/238 dans plusieurs échantillons provenant de forages de l'ANDRA présentait un équilibre séculaire, indiquant un âge supérieur à 500 000 ans⁴⁴¹. Ceci signifie que ces minéraux sont situés au delà de la plage de datation par la méthode U-Th. La méthode d'U-Pb pourrait donner des résultats intéressants, son évaluation est donc recommandée⁴⁴². De plus, la faisabilité de certaines techniques non traditionnelles de datation pourrait être explorée^{443,444}.

6. Des recherches doivent être effectuées sur des échantillons de calcite secondaire associée avec des événements connus de « cross formational flow »⁴⁴⁵ avec la même palette de techniques. Ces échantillons fourniraient une référence utile pour les signatures géochimiques des fluides situés en profondeur dans le bassin de Paris.

L'ensemble des méthodes déjà utilisées par l'ANDRA, complété par les méthodes énumérées ci-dessus, devrait permettre de déterminer le caractère du processus de circulation liquide qui a conduit au dépôt des minéraux secondaires au site de Bure.

6.7.3.2 Hydrocarbures

Nous comprenons que des études sur les diverses propriétés géochimiques des hydrocarbures de la formation du Callovo-Oxfordien sont en cours (par exemple, à travers le projet ISOGAZ). Puisque la documentation détaillant le programme de recherches ne nous a pas été communiquée, il est difficile d'évaluer si les programmes de recherches sont satisfaisants. La recherche qui a été effectuée jusqu'ici semble être appropriée et de haute qualité (par exemple détermination des pressions partielles et les valeurs isotopiques du carbone dans le méthane et les alcanes de poids moléculaires plus lourds), bien que nous constatons que quelques problèmes techniques restent à résoudre (par exemple, différentes proportions de C₁-C₂-C₃ mesurées par différentes méthodes⁴⁴⁶). Des études sur les valeurs isotopiques de l'hydrogène des hydrocarbures (par exemple, [fig. 6.5](#)) fourniraient un type d'information potentiellement important pour le déchiffrement de l'origine des gaz d'hydrocarbures. Nous n'avons pas pu déterminer si l'ANDRA a un programme pour obtenir ces données; à ce jour, aucune donnée sur le δD des hydrocarbures n'est disponible. Nous soulignons également que l'information serait plus utile si les valeurs δD et C étaient obtenues à partir des mêmes échantillons de gaz. En outre, il serait judicieux d'effectuer une comparaison des propriétés isotopiques des

⁴⁴¹ Deschamps, 2003.

⁴⁴² Dans son examen de la version préliminaire de ce rapport l'ANDRA précisait qu'il y a des tentatives d'utilisation de la technique de datation U-Pb et que les premiers résultats sont encourageants. Ils suggèrent des âges de dépôt de calcite comparables à l'âge du graben de Gondrecour. Nous considérons qu'il s'agit d'un pas dans la bonne direction et nous saluons l'effort de l'ANDRA sur cette question. they are

⁴⁴³ E.g., Sm-Nd system; Peng et al., 2003.

⁴⁴⁴ E.g., Sm-Nd system; Peng et al., 2003.

⁴⁴⁵ E.g., Worden and Matray, 1995.

⁴⁴⁶ Gaucher et al., 2002, BRGM, 2003.

hydrocarbures des carottes prélevées à Bure avec celles provenant d'autres endroits du bassin lorrain.

Pour résumer, un effort concerté et ciblé est nécessaire pour déterminer l'origine (la provenance) des hydrocarbures, ainsi que le mode et la durée de leur migration dans la formation du Callovo-Oxfordien.

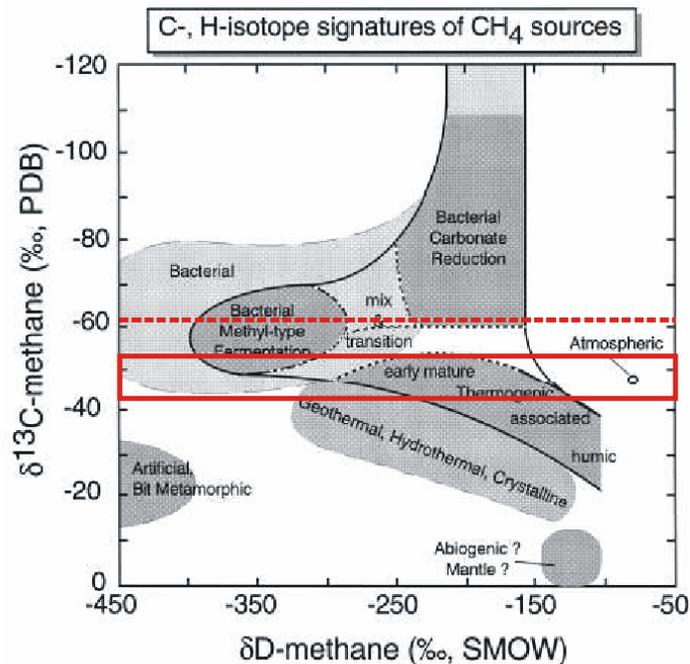


Fig. 6.5. Les valeurs $\delta^{13}\text{C}$ mesurées pour le méthane des argilites du Callovo-Oxfordien sont représentées sur le graphe adopté de [Whiticar \(1999\)](#). Puisqu'il n'y a pas de données disponibles sur la valeur δD du méthane, les données se rapportant à Bure sont représentées graphiquement comme un champ (rectangle) avec une observation aberrante représentée par des pointillés. Les valeurs du δD du CH_4 des argilites du Callovo-Oxfordien pourraient permettre de démarquer l'origine de ce gaz. Réimprimé, avec quelques modifications de *Chemical Geology*, Vol.161, Whiticar M.J. Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane, pp. 291-314, 1999, avec la permission de Elsevier.

6.7.4 Caractérisation 3-D à grande échelle

(Les recommandations présentées dans cette section n'ont pas à être suivies si : (a) l'origine et les causes de la migration des fluides sont connues, et (b) il est démontré, au-delà de tout doute raisonnable, que ces processus n'ont pas d'importance du point de vue de la sûreté et de la performance de l'installation de stockage envisagée.)

L'ensemble des méthodes employées par l'ANDRA, complétées par les méthodes énumérées ci-dessus, doit être appliqué à autant d'occurrences de minéraux secondaires que possible dans la zone d'étude. Toutes les carottes disponibles doivent être examinées

et échantillonnées. Et naturellement, tous les matériaux qui deviennent disponibles au cours du creusement des puits et des galeries souterraines doivent être étudiés. Le but serait d'obtenir une image tridimensionnelle des propriétés géochimiques des minéraux à partir de laquelle pourrait être déduite la caractérisation tridimensionnelle de la migration des paléo-fluides.

De même, des données "régionales" sur la géochimie et la chimie isotopique des gaz d'hydrocarbures trouvés dans le Bassin lorrain devraient être obtenues et comparées aux données des argilites du Callovo-Oxfordien.

Le temps nécessaire à la réalisation de ce programme est difficile à évaluer. De diverses manières il doit être réglé par le rythme de l'avancement dans le creusement des galeries et les forages. Il est clair, cependant, que ce travail demandera d'importants investissements aussi bien en termes de temps de travail que de personnel affecté à ces tâches.

Annexe 6-1 : Informations supplémentaires concernant l'origine de la calcite secondaire : la calcite du graben de Gondrecourt

NOTE

Les données présentées dans cette Annexe ont été recueillies par le Dr Dublyansky à sa propre initiative. Ce travail a été effectué en dehors du cadre du contrat IEER-CLIS.
--

Pendant notre visite du site de Bure en mars 2004, nous avons pu observer un affleurement spectaculaire à la limite orientale de la structure du Fossé de Gondrecourt. À l'affleurement, les veines complexes et clairement épigénétiques de calcite sont présentes dans les calcaires Oxfordiens (fig. 6-6). Cette calcite a été déposée très probablement en profondeur sous un exutoire anciennement actif (paléo-source). Le calcaire en contact avec les veines se présente sous des formes lisses de dissolution, indiquant le développement du karst phréatique. Ainsi, à cet endroit, il y a une manifestation évidente d'une montée relativement récente (Oligocène, si cette activité est liée à l'activation du graben de Gondrecourt, ou plus récente) des eaux. La comparaison de la géochimie de cette calcite, pour laquelle le processus de déposition est évident, avec les propriétés respectives de la calcite autour du site de Bure, pourrait être instructive.

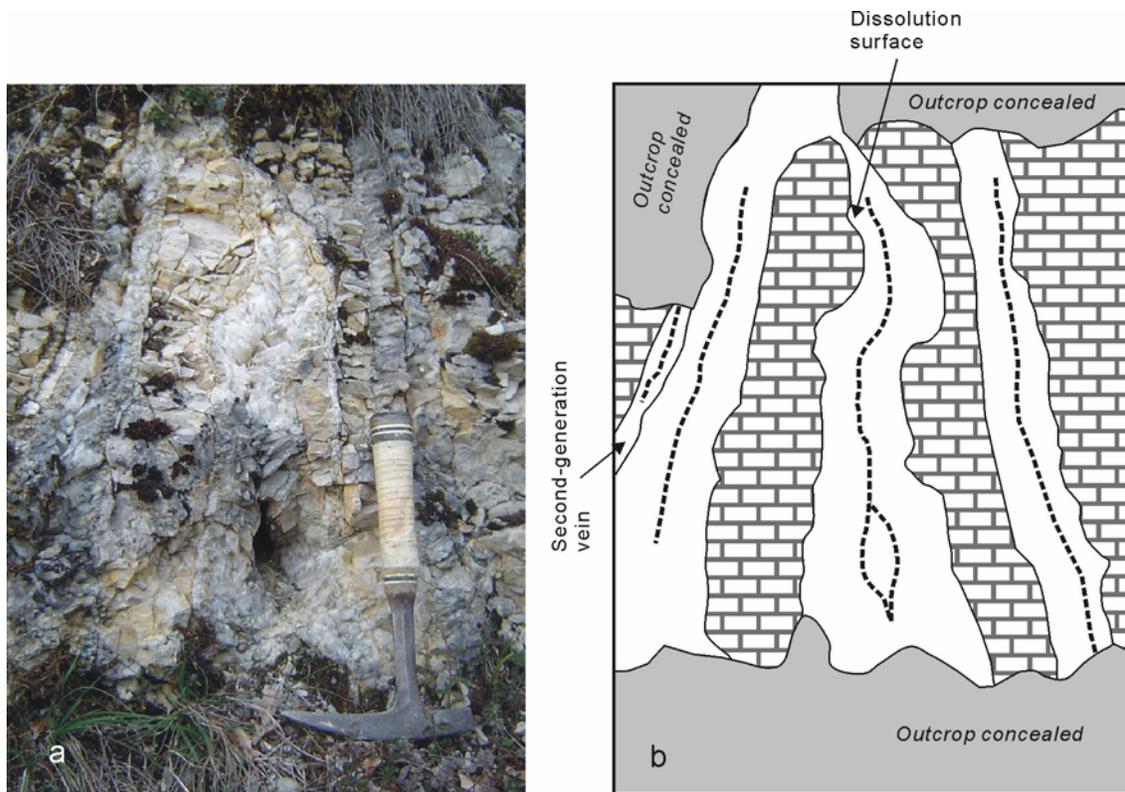


Fig. 6.6. Photo et schéma explicatif de l’affleurement de calcite secondaire à la limite Est du fossé de Gondrecourt, sur la départementale D16, à 500 mètres du village de Augeville. Cet affleurement est décrit dans le DPRE (2001; pp. 7-8 et la Planche 3). Le calcaire Oxfordien est fracturé; la forme des ouvertures est façonnée par la dissolution chimique (karst phréatique). Les veines de calcites sont formées par des cristaux d’un blanc laiteux. Les agrégats ordinairement présentent des zones créées par l’enrichissement de l’argile en matières particulières. La croissance des cristaux s’est effectuée à partir de la paroi des cavités vers leurs centres, où des filons centraux ou même des cavités ouvertes peuvent être observés. Ce genre d’occurrences de calcite représente ordinairement les parties profondes de paléo-sources, en général modérément chaudes ou tièdes. Photo and graphic by Yuri Dublyansky.

Nous avons obtenu quelques données de reconnaissance pour les isotopes de carbone et d'oxygène d'un échantillon prélevé à l'affleurement. Huit analyses d'échantillons de calcite obtenus d'un profil de quatre-point le long de l'axe de croissance d'un cristal d'environ 5 cm de long (environ 0,2 milligrammes de roche ont été utilisés pour dupliquer deux analyses à chaque point) ont donné des valeurs remarquablement uniformes, entre $\delta^{18}\text{O} = 21,2$ et $21,3$ ‰ SMOW et entre $\delta^{13}\text{C} = 1,8$ et $2,0$ ‰ PDB⁴⁴⁷. Sur le diagramme reprenant les caractéristiques isotopiques des carbonates du site de Bure (Figure 6.7), nos données obtenues du Fossé de Gondrecourt se situent près du vug (petite cavité ronde dans la roche) et des veines de calcite secondaires analysés des forages. Ainsi, l'existence du lien de même origine entre ces calcites secondaires pourrait être

⁴⁴⁷ Des analyses ont été effectuées à l’Université de Rome sur le spectromètre de masse MAT 272 équipé d’un système d’analyse automatique des échantillons de carbonates.

considérée comme une hypothèse de travail légitime. Cette hypothèse est cohérente avec les interprétations proposées plus tôt par les chercheurs de l'ANDRA⁴⁴⁸.

L'hypothèse est renforcée par le fait que la calcite du Fossé de Gondrecourt et la calcite de la fracture du forage HTM102 ont révélé des rapports "radiogéniques" $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ semblables (0,707772;⁴⁴⁹). ce qui est interprété comme un indice de l'équilibrage des fluides de formation minéraux avec les roches Triasiques sous-jacentes (ces dernières ont les signatures "radiogéniques" du Sr de 0,70652 à 0,70811)⁴⁵⁰.

Au cours de nos observations (relativement brèves), nous n'avons trouvé aucune inclusion biphasée vapeur-gaz. Toutes les inclusions étaient monophasées, liquide aqueux, laissant supposer des températures de dépôt de moins de 30-50°C environ. Nous avons obtenu une mesure isotopique préliminaire de l'hydrogène contenu dans l'eau génératrice de minéraux, extraite des inclusions fluides⁴⁵¹. La valeur, $\delta\text{D} = -49,5\%$ SMOW (Standard Mean Ocean Water), est comparable à celle rapportée par l'ANDRA.⁴⁵² La tentative de reconstitution des propriétés isotopiques des paléo-fluides qui ont déposé la calcite dans le fossé de Gondrecourt, dans les coordonnées $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$, est indiquée dans la figure 6.8. Il est important de souligner que la position exacte des propriétés isotopiques de l'eau génératrice de minéraux, relativement à la Meteoric Water Line, dépend très étroitement de la température, parce que le $\delta^{18}\text{O}$ des paléo fluides doit être calculé à partir du $\delta^{18}\text{O}$ de la calcite, et le fractionnement est fonction de la température. Dans notre cas, la température est mal délimitée puisque aucune donnée numérique d'inclusion fluide n'est disponible. Cette ambiguïté pourrait être surmontée si δD et $\delta^{18}\text{O}$ étaient mesurés à partir des inclusions liquides en utilisant une technique spéciale (voir la section 6.7)

⁴⁴⁸ E.g., Maes, 2002.

⁴⁴⁹ Maes, 2002, p. 234, Fig. V-30.

⁴⁵⁰ Maes, 2002, p. 234, Fig. V-30.

⁴⁵¹ L'analyse a été effectuée à l'Université de Rome sur le spectromètre de masse Finnigan Delta XL. La préparation comportait un broyage de l'échantillon sous vide, une concentration cryogénique des gaz rejetés; une désorption thermique à 150 °C, et une séparation cryogénique de l'eau (voir Dennis et al. 2001) pour la description de la technique d'extraction). L'eau a ensuite été réduite sur du Zn et de l'hydrogène évolué, et analysée.

⁴⁵² $\delta\text{D} = -50-60 \%$; Buschaert, 2001, p. 7-224.

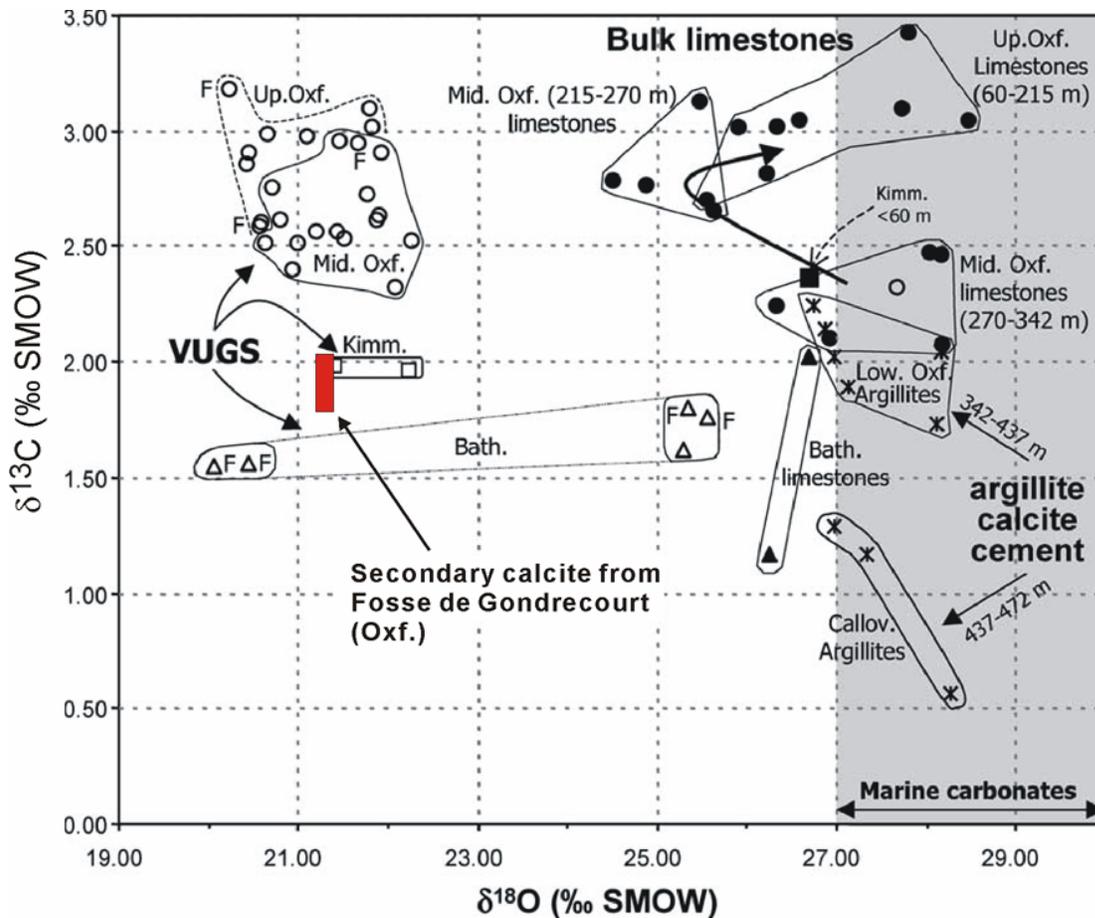


Fig. 6.7. Résumé de la représentation graphique des $\delta^{18}\text{-}\delta^{13}\text{C}$ pour les roches carbonatées, les ciments, ainsi que les calcites secondaires dans les fractures et cavités (Buschaert 2001) comparé aux données isotopiques obtenues à partir d'un échantillon de calcite secondaire hydrogénique recueilli au Fossé de Gondrecourt (Fig. 6.6 c-dessus). Le rectangle rouge contient huit mesures provenant de quatre sous-échantillons analysés à partir d'un cristal de calcite d'une longueur de 5 cm environ.

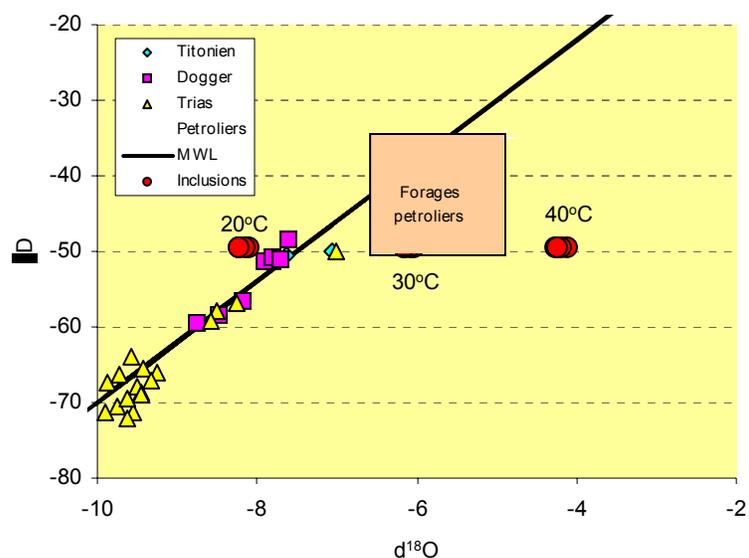


Fig. 6.8. Evaluation de la composition isotopique des eaux à l'origine des minéraux dans la fracture de Gondrecourt (cercles rouges). $\delta^{18}\text{O}$ est calculé à partir de $\delta^{18}\text{O}_{\text{cat}}$ en supposant des températures de 20, 30 et 40 °C. A titre de comparaison, la World Meteoric Water Line, ainsi que les données isotopiques présentées pour les eaux des aquifères régionaux et des forage pétroliers (ANDRA, 1999, Tome 2, Tableau 4.2-02) sont inclus.

6.8 References

- ANDRA BET 2001 ANDRA (2001) *Recherches pour le stockage des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue. Bilan des études et travaux 2001*. [2002]
- ANDRA BET 2002 ANDRA (2002) *Recherches pour le stockage des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue. Bilan des études et travaux*. 392 p. (Section Les paléo circulations par l'étude des colmatages : Apports des thèses 2002, pp. 211-212)
- ANDRA
Référentiel
Géologique Tome
1, 2001 ANDRA (2001) *Référentiel Géologique du site de Meuse/Haute-Marne*, Tome 1, Contexte et objet. Identification: A RP ADS 99-005/B, Émetteur: Direction Scientifique, Date d'origine. Janvier 1999. Rév. B: 27/07/2001.
- ANDRA
Référentiel
Géologique Tome
2, 2001 ANDRA (2001) *Référentiel Géologique du site de Meuse/Haute-Marne*. Tome 2. La connaissance à l'échelle régionale. Émetteur: Direction Scientifique. Date d'origine : Janvier 1999. ANDRA identification: A RP ADS 99-005/B. Rev. B. Dates : 27/07/2001.
- ANDRA ANDRA (2001) *Référentiel Géologique du site de Meuse/Haute-Marne*.

- Référentiel Géologique Tome 3, 2001- Tome 3. La connaissance à l'échelle du secteur. Émetteur: Direction Scientifique. Date d'origine : Janvier 1999. ANDRA identification: A RP ADS 99-005/B. Rev. B. Dates : 18/07/2001.
- ANDRA 2002-2005 ANDRA (2002-2005). *Projet HAVL-Argile Programme Scientifique 2002-2005*. 127 p.
- Ayt Ougougdal et al. 1996 Ayt Ougougdal M., Boiron M.C., Cathelineau M. (1996) *Paléothermicité des calcaires de l'Est de la France : Forage de la Haute Marne (Cirfontaine-en-Ornois). Rapport final*. Contrat No. ABM 05 AAO. 54 p. ANDRA identification B RP 0CRE 96-005. Émetteur: Direction Scientifique, Service Géologie-Géoprospective. Date d'origine: Janvier 1996. [Septembre 1996].
- BRGM 2003 BRGM (2003) *Projet ISOGAZ : Caractérisation isotopique des gaz émis par les argilites du Callovo-Oxfordien. Rapport d'avancement (phase 2)*, BRGM/RP-52834-FR. 74 p
- Buschaert et al. 2004 Buschaert S., Fourcade S., Cathelineau M., Deloule E., Martineau F., Ayt Ougougdal M., Trouiller A. (2004) Widespread cementation induced by inflow of continental water in the eastern part of the Paris basin: O and C isotopic study of carbonate cements. *Applied Geochemistry*, **19**, 1201-1215.
- Buschaert 2001 Buschaert S. (2001) *Origine, âge et processus physico-chimiques des circulations de fluides dans les fractures : Exemple de socle sous couverture (Vienne) et de formations riches en argiles (Gard, Est)*. Thèse présentée pour l'obtention du titre de Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I. Collection les Rapports ANDRA. Inconsecutive pages.
- Chamberlin 1890 Chamberlin T.C. (1890) The method of multiple working hypotheses. *Science*, **15**, 92-96 (Reprinted 1965, *Science*, **148**, 754-759). On the Web at <http://www.accessexcellence.org/AB/BC/chamberlin.html>.
- Dennis et al. 2001 Dennis P.F., Rowe P.J., Atkinson T.C. (2001) The recovery and isotopic measurement of water from fluid inclusions in speleothems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **65** (6), 871-884.
- Deschamps 2003 Deschamps P. (2003) *Traçage de la mobilité des radionucléides naturels en milieu sédimentaire profond à l'aide des déséquilibres radioactifs ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) : application aux formations mésozoïques de l'est du bassin de Paris*. Thèse Université du Québec à Montréal – Université Paris Sud. 117 p.
- Direction de la Direction de la Technologie (2003) *Stratégie et Programmes des Recherches sur la gestion des déchets radioactifs à haute activité et à vie*

- Technologie 2003 *longue (au titre de l'article L542 du code de l'environnement, issu de loi du 30 décembre 1991). Edition 2003. [Paris ?] Ministère délégué à la Recherche et aux nouvelles technologies. (Chapitre 4, section 4.2.2. – Le projet HAVL Argile). pp. 70-105.] On the Web at <http://www.recherche.gouv.fr/technologie/energie/spr2003.pdf>.*
- Donsimoni 1981 Donsimoni M. (1981) – *Le bassin houiller Lorrain: Synthèse géologique*, Mém BRGM, 117, Orléans, France, Editions BRGM, 100 p., 21 fig., 21 tab., 15 "planches hors texte".
- DPRE 2001 DPRE (2001) “*Examen microstructural préliminaire de l'environnement régional du laboratoire souterrain de Bure.*” Références : DPRE / 01-18. Title from running title.
- Dublyansky et al. 2001 Dublyansky Y., Ford D., and Reutski V. (2001) Traces of epigenetic hydrothermal activity at Yucca Mountain, Nevada: preliminary data on the fluid inclusion and stable isotope evidence. *Chemical Geology* **173**, 125-149.
- Dublyansky et al. 2003 Dublyansky Y.V., Smirnov S.Z., and Pashenko S.E. (2003) Identification of the deep-seated component in paleo fluids circulated through a potential nuclear waste disposal site: Yucca Mountain, Nevada, USA. *Journal of Geochemical Exploration* **78-79**. 39-43.
- Dublyansky 1998 Dublyansky Y.V. (1998) *Fluid Inclusion Studies of Samples from the Exploratory Study Facility, Yucca Mountain, Nevada*. Institute for Energy and Environmental Research, Takoma Park, MD, USA. December. 49 p.
- Dublyansky 2001 Dublyansky Y.V. (2001) *Paleohydrology at Yucca Mountain by coupled stable isotopic and fluid inclusion studies of secondary minerals*. Report Submitted to the Agency for Nuclear Projects, State of Nevada, May 2001. Part II. 80 p + Appendices
- Dublyansky 2002 Dublyansky Y.V. (2002) Extreme crystal-scale variability of $\delta^{13}\text{C}$ in hydrothermal calcite from Yucca Mountain, Nevada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **66**. Special Supplement. Abstracts of the 12th Annual V.M. Goldschmidt Conference, Davos, Switzerland, August 18-23, 2002, p. A198.
- Gaucher et al. 2002 Gaucher E., Lassin A., et Crouzet C. (2002) *Pression partielle en CO₂ et en alcanes légers des roches du Callovo-Oxfordien*. BRGM/RP-51390-FR. [Orleans?] BRGM, décembre 2001. [revision 2, juillet 2002] 56 p.
- Girard et al. 2002 Girard J.-P., Flehoc C., Gaucher E., Prinzhofer A., and Chappellaz J. (2002) Isotopic study of CO₂ and CH₄ out-gassed from argillites investigated for radioactive waste repository, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **66**,. Special Supplement. Abstracts of the 12th Annual V.M. Goldschmidt Conference, Davos, Switzerland, August 18-23, 2002, p. A274.
- Girard J.P. et Flehoc C. (2000) *Project Géotherm. Développements méthodologiques en géochimie des isotopes stables pour la*

caractérisation des fluides et paléofluides dans les systèmes géologiques. Rapport final. BRGM/RP-50610-FR. 92 p.

- Huiban et al. 2003 Huiban Yvon, Noirez Sonia, et Prinzhofer Alain (2003) Mise au point de mesures chimiques et isotopiques de traces d'hydrocarbures C1-C3 dans des échantillons de gas à faible pression. Annex 1, Rapport d'avancement de l'équipe IFP of *Projet ISOGAZ : Caractérisation isotopique des gaz émis par les argilites du Callovo-Oxfordien. Rapport d'avancement (phase 2)*, by J.P. Girard, C. Fléhoc, E. Gaucher, A. Prinzhofer, Y. Huiban et S. Noirez, Rév. 1. BRGM/RP-52834-FR. ANDRA; BRGM, Décembre, pp. 27-35.
- Lathuitliere et al. 2002 Lathuitliere B., Malartre F., et Hibsich C. (2002) Modalités de développement de la plate-forme carbonatée oxfordienne autour du site de l'Est : implications en (paleo)hydrogéologie et chronologie de la diagenèse. In: *GdR FORPRO – Rapport final des actions 2000.III et 2002.I (2002/15 Rf)*, pp. 35-38: CNRS, Centre national de la recherche scientifique & ANDRA, 24/02/2003.
- Lecocq 2002 Lecocq D. (2002) *Signature géochimique de paleocirculations aqueuses dans la calcite de remplissage de fractures de massifs argileux peu perméables et de leurs encaissants : Exemples pris sur les sites de Bure, Tournemire et Suisse du Nord*. Thèse pour obtenir le grade de Docteur d'École des Mines de Paris. Rapport ANDRA D.RP.0ARM.02-005.A. 188 p.
- Maes 2002 Maes P. (2002) *Circulation de fluides et interactions eau/roche passées et actuelles dans la pile sédimentaire du site de Meuse/Haute-Marne : apport des isotopes du Sr et conséquences*. Thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur de l'Université Montpellier II. Collection les Rapports ANDRA. 308 p.
- Mazurek et al. 2003 Mazurek Martin, Pearson F. Joe, Volckaert Geert, and Bock Helmut (2003) *Features, Events and Processes Evaluation Catalogue for Argillaceous Media*. Radioactive Waste Management. NEA4437. Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-Operation and Development, Paris, France, 2003. 379 p. On the Web at <http://www.nea.fr/html/rwm/reports/2003/nea4437-FEP.pdf>.
- NAS-NRC 1992 NAS/NRC (1992) *Ground Water at Yucca Mountain: How High Can It Rise? Final Report of the Panel on Coupled Hydrologic/Tectonic/Hydrothermal Systems at Yucca Mountain*. Panel on Coupled Hydrologic/Tectonic/Hydrothermal Systems at Yucca Mountain, Board on Radioactive Waste Management, Commission on Geosciences, Environment, and Resources, National Research Council. National

- Academy Press, Washington D.C. 231 p.
- Newman et al. 1996 Newman B.D., Norman D.I., Gundimeda N., Levy S.S. (1996) Understanding the genesis of nonmarine calcite deposits through quadrupole mass spectrometric analysis of fluid inclusion gases. *Chemical Geology* **132**. 205-213.
- OECD-NEA 2003 OECD-NEA (2003), *The French R&D Programme on Deep Geological Disposal of Radioactive Waste, An International Peer Review of the "Dossier 2001 Argile"*, Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Co-Operation and Development, Paris, France. On the Web at <http://www.nea.fr/html/rwm/reports/2003/nea4432-andraeng.pdf>. French version on the Web at <http://www.nea.fr/html/rwm/reports/2003/nea4588-andrafr.pdf>.
- Peng et al. 2003 Peng J.-T., Hu R. -Z., Burnard P. G. (2003) Samarium–neodymium isotope systematics of hydrothermal calcites from the Xikuangshan antimony deposit (Hunan, China): the potential of calcite as a geochronometer. *Chem. Geol.*, **200** (1-2), 129-136.
- Platt 1964 Platt, J.R. (1964) Strong inference. *Science* **146**, 347-353.
- Roedder et Whelan 1998 Roedder Edwin et Whelan J.F. (1998) Ascending or descending water flow through Yucca Mountain tuffs? – Fluid Inclusion Evidence. In PACROFI VII: Pan-American Conference on Research on Fluid Inclusions, University of Nevada, Law Vegas, Department of Geoscience, Division of Continuing Education, Las Vegas, Nevada, USA, June 1-4, 1998. *Program and Abstracts*, edited by David A Vanko and Jean S. Cline. NBMG Open-File Report 98-4. Nevada Bureau of Mines and Geology, Reno, NV. p. 56.
- Schumm 1991 Schumm Stanley.A. (1991) *To Interpret the Earth: Ten ways to be wrong*. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- Sharp et al. 2001 Sharp Z.D., Atudorei V., Durakiewicz T. (2001) A rapid method for determination of hydrogen and oxygen isotope ratios from water and hydrous minerals. *Chemical Geology* **178**, 197-210.
- Sharp et Cerling 1996 Sharp Z.D. et Cerling T.E. (1996) A laser GC-IRMS technique for in situ stable isotope analyses of carbonates and phosphates. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **60** (15), 2909-2916
- Trouillier and Lebon 1999 Trouillier, A.,Lebon, P. (1999) La demarch scientifique de l'ANDRA dans l'Est de la France. Actes de Journees Scientifiques NRS/ANDRA, Bar-le-Duc, 20 et 21 oct.1997. EDP Sciences, Paris, 35-58. (3). As cited in Buschaert 2001.
- Tweney et al. 1981 Tweney, R.D., Doherty, M.E., Mynatt, C.R.(1981) *On Scientific Thinking*. Columbia University Press, New York.
- U.S. DOE 1993 U.S. DOE (U. S. Department of Energy) (1993) Transmittal Letter of December 20, 1993 “Second Installment of Data Reported in U. S.

- Geological Survey (USGS) Monthly Reports” from Nelson, R.M. to R.R. Loux (Agency for Nuclear Projects, State of Nevada).
- UCCSN 2004 UCCSN (2004) Quality Assurance Program. University and Community College System of Nevada, Las Vegas. On the Web at <http://hrcweb.nevada.edu/qa>.
- Whelan et al. 2002 Whelan J. F., Paces J. B., Peterman Z. E. (2002) Paragenetic Relations and Evidence for Secondary Mineral Formation in Unsaturated-zone Tuffs at Yucca Mountain, Nevada. *Appl. Geochem.* **17**, 735–750.
- Whiticar 1999 Whiticar Michael J. (1999) Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane, *Chemical Geology* **161**, 291–314.
- Wilson et al. 2003 Wilson Nicholas S.F., Cline Jean., and Amelin Yuri V. (2003) Origin, timing, and temperature of secondary calcite–silica mineral formation at Yucca Mountain, Nevada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **67**(6), 1145–1176.
- Worden et Matray 1995 Worden R.H. et Matray J.-M. (1995) Cross formational flow in the Paris Basin. *Basin Research* **7**, 53-66.

Chapitre 7. Sismologie et déformation : considérations concernant la recherche sur le site

Gerhard Jentzsch et Horst Letz

Conclusions principales

L'évaluation de l'aléa sismique par l'ANDRA est sérieusement déficiente, de plus elle comporte des éléments spéculatifs. En règle générale l'aléa sismique est caractérisé par le *séisme maximal physiquement possible* (et non pas le séisme maximal observé), par l'estimation d'une *période de mouvements forts* et d'un *spectre de réponses* incorporant les conditions du site, ainsi que par la quantification des majorations appliquées. Il n'apparaît pas que des travaux à cet effet aient été menés à bien.

Il nous a paru que l'ANDRA s'appuie trop sur les mesures de laboratoire et que la caractérisation de la région autour de Bure manque de données suffisantes et d'interprétation. Beaucoup de travail a été accompli, par contre – comme nous l'avons démontré – un examen attentif conclut à l'absence d'interprétations solides. Il en va de même pour la représentation des épencentres des cartes. Sans tableaux, il est impossible d'évaluer le fichier des séismes et de le comparer avec les fichiers des pays avoisinants. Le zonage sismique n'est pas satisfaisant et d'importants séismes récents ne sont pas présents.

Les lacunes présentes dans les travaux de l'ANDRA sur la sismologie et les déformations peuvent être résumées comme suit :

- Trop d'informations présentées par l'ANDRA ne sont pas suffisamment structurées et évaluées. Il manque certaines références pour les informations données. Nous citerons comme exemple la carte gravimétrique de Bouguer qui est présentée, mais qui est sans rapport avec les travaux, bien qu'il y ait de nombreuses applications possibles.
- Pour l'estimation du confinement à long terme des déchets nucléaires, la déformation verticale est un sujet crucial, cependant la carte s'y rapportant fait défaut.
- Le traitement des failles autour du site présente de graves lacunes. Au lieu de présenter les résultats des observations, seules des spéculations sur les activités (notamment sur *le fossé de Gondrecourt*) sont offertes. Dans ce cas les mesures auraient dues être faites sur de nombreuses années avant de pouvoir en tirer des conclusions.
- La nature incomplète du fichier des séismes et l'absence de tableau des événements sismiques utilisés, ainsi que l'absence d'analyse des séismes historiques, constituent une lacune grave dans le rapport sismologique de l'ANDRA.

- Les paramètres utilisés pour la caractérisation de l'aléa sismique ne sont pas donnés. Outre l'intensité du séisme maximum historiquement vraisemblable et de l'intensité du séisme majoré de sécurité il est également nécessaire d'indiquer la période de mouvement fort et la probabilité d'occurrence (au-delà d'un certain seuil), ainsi qu'une discussion et une quantification des paramètres majorants.
- L'absence d'un spectre de réponse représente une lacune importante. Dans ce cas les propriétés du site entrent explicitement en compte et sont également importantes pour la détermination du séisme d'intensité maximum possible. .

Toutes ces questions et le traitement de la faible sismicité donnent l'impression que l'aléa sismique est significativement sous estimé.

Recommandations

Un réseau de surveillance sismique adapté au site de Bure avec un seuil d'enregistrement d'une magnitude de 0,5 ou inférieure à 0,5. La période d'enregistrement devrait se faire sur un an minimum (plus de préférence).

La surveillance des mouvements de l'écorce terrestre à l'aide de différents types de mesures (comme par exemple un nivellement précis, technique de déformation-contrainte et tiltomètre)

La dérivation d'un catalogue de séismes complet et une discussion des entrées récentes et historiques (tableau et graphe).

Une comparaison avec les catalogues des pays voisins et leur homogénéisation.

Un zonage réaliste des séismes et une discussion des résultats.

La dérivation d'une carte de l'aléa sismique

Une discussion des propriétés souterraines se rapportant au spectre de réponse.

Une dérivation et une discussion des spectres de réponse (horizontal et vertical)

Une dérivation de tous les paramètres mentionnés plus haut.

Une évaluation détaillée des incertitudes.

7.1 Objectifs

7.1.1 Généralités

L'objet de ce chapitre est l'étude et l'évaluation critique des travaux de recherche de l'ANDRA sur l'évaluation du risque sismique et, une question qui lui est directement liée, la déformation néotectonique causée par les systèmes de failles géologiques qui

prévalent et le champ de contraintes dans l'écorce terrestre. Cet examen sera fait en utilisant la Règle fondamentale de sécurité⁴⁵³ comme cadre de référence et fera largement référence aux normes internationales.

La visite du laboratoire de Bure s'est avérée très utile. De nombreux travaux ont déjà été achevés et présentés dans de nombreux rapports et publications. Nous avons fait une lecture des documents pertinents, mais il est probable que vu la limite de temps et l'insuffisance des données cette analyse sera loin d'être complète et n'arrivera pas au degré de précision qui aurait été souhaitable. Par conséquent cette analyse pourra comporter des lacunes.

7.1.2 Réglementation française sur la sûreté - conditions aux limites pour évaluer le travail de l'ANDRA

La réglementation française en matière de sûreté exige un concept multibarrière qui englobe : le colis de déchets, la barrière ouvragée, et la barrière géologique naturelle.⁴⁵⁴ Alors que toutes les barrières devraient empêcher les radionucléides de quitter le site de stockage pendant la période de confinement, la barrière géologique naturelle a deux fonctions supplémentaires : la première consiste à garantir un environnement physique et chimique stable pour les barrières artificielles sur des périodes de temps géologiques, la deuxième consiste à garantir une protection contre l'intrusion humaine et les effets naturels de surface comme l'érosion et la glaciation.

En ce qui concerne la barrière géologique la Règle définit des

- (i) *Critères essentiels* qui requièrent la stabilité du site pour une durée de 10.000 ans et des conditions hydrogéologiques favorables, particulièrement l'exigence d'une circulation lente de l'eau (faible gradient hydraulique, faible perméabilité...) et des
- (ii) *Critères importants* qui requièrent des propriétés mécaniques, chimiques et géochimiques adéquates. La règle exige également le respect d'une épaisseur minimale de la zone superficielle de 150 m à 200 m pour éviter la mise à découvert du site de stockage par l'érosion.

7.1.2.1 Période de confinement prévue

La RFS III.2.f distingue deux périodes :⁴⁵⁵

- (i) la première, au moins égale à 10 000 ans, pour la stabilité prévisible de la barrière géologique et
- (ii) une deuxième qui s'étend au-delà de 10 000 ans, pendant laquelle l'efficacité des barrières géologiques et ouvragées est considérablement réduite. Raynal⁴⁵⁶ traite de cette

⁴⁵³ Règle N° III.2.f

⁴⁵⁴ Règle N° III.2.f

⁴⁵⁵ Règle N° III.2.f

question et mentionne un chiffre « aux alentours » de 100 000 ans pour l'évaluation des événements géologiques, à condition qu'aucune faille nouvelle n'apparaisse.

Le paragraphe 1.2 de l'Annexe 2 de la Règle III.2.f exige de prendre en considération les événements naturels pendant une période de 100 000 ans. Toutefois, la Règle III.2.f recommande une dose limite de 0,25 mSv comme guide pour les études pour une période indéfinie au-delà de 10 000 ans. Dans la pratique, cela signifie que la dose maximale quel que soit le moment où elle se manifeste, ne peut excéder le maximum prévu par la réglementation. Concrètement cela nécessite de pousser les études jusqu'à environ un million d'années. Ceci veut dire que les investigations dans le cadre du paragraphe 2.3 de l'Annexe 2 (Activité sismique) doivent être effectuées en gardant à l'esprit l'échéance la plus éloignée d'un million d'années. **Ceci tient au fait que l'activité sismique peut avoir une incidence sur les caractéristiques hydrogéologiques qui peuvent, à leur tour, avoir une influence sur la dose d'irradiation.** Ces considérations englobent également les changements climatiques et la néotectonique. Il est donc clair que la période de 10 000 ans est bien trop courte pour la période de confinement et, qu'une période de 100.000 ans semble même insuffisante à cette fin.

7.1.2.2 La question des aléas sismiques

Comme mentionné ci-dessus, la RFS III.2.f ne fournit pas de protocole à suivre pour évaluer l'aléa sismique. Elle n'exige même pas une carte des aléas sismiques en général. L'activité sismique n'est traitée que comme situation hypothétique. L'aléa sismique devrait être caractérisé par rapport à la situation tectonique.

Raynal⁴⁵⁷, une fois encore, donne un peu plus d'informations et indique que pour la dernière étape, la Règle requiert que les changements dans le comportement du site de stockage soient surveillés dans le temps:

«Compte tenu de l'étalement dans le temps de la période d'exploitation du stockage et des perturbations induites durant cette période, il apparaît indispensable de prévoir une instrumentalisation adaptée pour le suivi de l'évolution des paramètres relatifs au site et aux ouvrages. Cette instrumentation devra être mise en place dès que possible, de façon à assurer un suivi des ouvrages et du site non seulement pendant mais aussi avant la période d'exploitation du stockage

Il conviendra de suivre notamment ;

- • ;
- • les mouvements sismiques ;
- • l'évolution thermique du milieu et ses effets (contraintes, déplacements, fracturation...).»⁴⁵⁸

⁴⁵⁶ Raynal, 1996

⁴⁵⁷ Raynal, 1996

⁴⁵⁸ RFS III.2.f, Annexe 1

Néanmoins ce passage se rapporte davantage aux effets induits par les travaux de construction qu'à la question des propriétés géologiques de la région tout entière. Seul le passage : « *de façon à assurer un suivi des ouvrages et du site non seulement pendant mais aussi avant la période d'exploitation du stockage* », indique la nécessité de commencer le suivi bien avant le début des travaux de construction, et donc de surveiller le comportement de la zone.

7.1.2.3 La question de l'activité tectonique (contrainte, déformation, et érosion)

La RFS III.2.f prend en compte l'érosion à la suite d'un soulèvement ou d'une glaciation. Par conséquent, pour éviter toute perturbation du site de stockage il est recommandé que l'épaisseur de la zone superficielle soit de l'ordre de 150 m à 200 m.

Bien que la période de confinement mette en jeu des périodes géologiques, l'évaluation du comportement du site de stockage à partir du seul passé géologique est incomplète. Des modèles informatiques pour l'étude de l'implantation et l'exploitation d'un site de stockage allemand ont mis en évidence que :

- (i) la perturbation induite par la température atteindra son maximum environ 300 ans après le début de la mise en place (en supposant que la mise en place des déchets sera achevée en 50 ans),
- (ii) la contrainte et la déformation maximum des formations encaissantes se produiront entre 500 et 2000 ans environ. Il est même probable que des petites perturbations adiabatiques de température dans les formations encaissantes se produiront 8 000 ans plus tard. Ces déformations pourront conduire à des ruptures dans les formations encaissantes, particulièrement dans l'EDZ, avec, pour conséquence l'ouverture de voies de passage pour l'eau.⁴⁵⁹

Par conséquent, il est essentiel dans le cadre d'un programme de caractérisation de comprendre les activités tectoniques historiques et actuelles. Cette compréhension ne peut être acquise que par une campagne de mesures :

- de l'activité microsismique par un réseau sismique local
- des déformations verticales par un réseau de nivellement (le GPS n'est pas encore assez précis)
- des changements d'inclinaison par des clinomètres de forage installés sur un profil situé au-dessus des failles et des grabens suspectés (tels que *le fossé de Gondrecourt*) ou sous forme d'un petit réseau.

En conclusion, Raynal (1996)⁴⁶⁰ décrit le caractère du travail comme suit : *Il convient de noter que la validation de l'approche complexe décrite ci-dessus implique une période expérimentale qui ne peut pas être écourtée, suivie de l'interprétation des résultats des essais, cela se traduit par un programme très tendu.* Il est donc clair que la date du 31

⁴⁵⁹ Jentzsch, 2002

⁴⁶⁰ Raynal, 1996

décembre 2005 pour la remise du rapport final de l'ANDRA, ne laisse pas assez de temps pour fournir des arguments complets, pour analyser les résultats et pour développer une base des connaissances nécessaires pour arriver à une décision sur un futur site de stockage.

7.2 Programme de recherche de l'ANDRA

7.2.1 Vue d'ensemble

Il apparaît que les travaux de l'ANDRA sont - conformément à la réglementation de sûreté - tout d'abord orientés vers les études de laboratoire. Des échantillons de roche provenant des forages et des échantillons d'eau sont analysés pour déterminer leurs propriétés mécaniques et chimiques. Le Dossier 2001 Argile résume toutes les activités qui sont principalement concentrées sur l'exploration de la roche hôte (argile) et les colis de déchets.⁴⁶¹ La recherche sur le milieu géologique porte sur l'hydrologie et la stabilité des installations souterraines.

Des campagnes sismiques de réflexion (2-D et 3-D) ont été effectuées pour caractériser la structure géologique, et pour établir la cartographie de surface des failles géologiques. En ce qui concerne l'aléa sismique seules des hypothèses sont présentées. Cependant, l'énorme quantité d'informations fournie par les rapports, est mal structurée. Par conséquent les informations importantes ne sont pas mises en évidence et courent le risque d'être dissimulées.

Un exemple a trait à la sismicité naturelle. Ici, les Figures. 5.3-03 et 5.3-06 indiquent les épicentres des tremblements de terre de la région (rayon de 200 kilomètres environ), et la carte de la sismicité historique pour toute la France complétée par des événements récents enregistrés par des instruments de mesure. Cette carte englobe également une partie de l'Espagne, de l'Italie, de l'Allemagne et du Luxembourg/de la Belgique (et même un bout du sud-est de la Grande-Bretagne). Dans cette carte, les bassins néogènes sont représentés en couleur, ainsi que le secteur d'étude du modèle sismotectonique. Plusieurs tremblements de terre importants sont indiqués : Remiremont (1682 ; $I_0 = VIII$, magnitude locale estimée $ML = 6.0$, 1984, $ML = 4.8$); Besançon (1828; $I_0 = VIII$). Les distances par rapport au site de Bure sont d'environ 100 kilomètres (Remiremont) et de 140 kilomètres (Besançon). Le tremblement de terre de Bâle (1356; $I_0 = IX$, estimé $ML = 6.7$) ainsi qu'un certain nombre d'événements plus près du Graben du Rhin se trouvent dans un rayon de 200 kilomètres, l'un des critères de sûreté pour les installations nucléaires en Allemagne (KTA, 1990).⁴⁶² Pour ce qui concerne la carte régionale de la France de l'Est l'information fournie indique des événements supérieurs à 2,5 ($ML \geq 2,5$), observés depuis 1962. Dans la région près du site, seul un événement de $ML=2,2$ a été observé (15 septembre 1999). L'ANDRA en conclut que la sismicité naturelle est très faible; elle déclare aussi qu'il aurait pu y avoir quelques petites manifestations qui seraient passées inaperçues - mais cet argument est futile. Le fait qu'il n'existe pas d'observations pourrait être lié à l'absence de mesures suffisantes. Cela ne veut pas dire que les événements

⁴⁶¹ ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.A

⁴⁶² KTA, 1990

recherchés ne se sont jamais produits. Par conséquent rien ne vient justifier la conclusion que la zone autour de Bure est pratiquement asismique.

Le commentaire de l'ANDRA sur notre travail préliminaire se rapportant à la disponibilité d'observations sismiques sur internet ne répond pas à la question suivante : notre rôle consiste à évaluer le programme de recherche de l'ANDRA dans lequel les observations sismiques ont une place prépondérante. Les présentations des réseaux sismiques nationaux sur internet ne sont utiles que s'il est indiqué comment les données sont utilisées pour la caractérisation du risque sismique.

Il est probable que le catalogue de sismicité historique contient des événements en France antérieurs à 1682. Le catalogue de sismicité allemand remonte aux alentours de l'année 800. Nous notons à ce sujet que l'explication de la Figure. 5.3-06 contient même une erreur : concernant l'événement historique de Remiremont ($I_0 = VIII$) le rapport déclare *L'étude du séisme historique ...a permis de calculer une valeur de magnitude macrosismique de 6.0* alors qu'il faudrait lire *de magnitude microsismique*. Cette erreur a une importance cruciale. Une fois encore, les chiffres et l'analyse présentés sont très loin d'être complets.

7.2.2 Activité tectonique

La déformation et l'aléa sismique sont traités dans le rapport de l'ANDRA (1998).⁴⁶³ Il existe également des données sismiques et microtectoniques détaillées dans une publication de 2001 en trois volumes de l'ANDRA.⁴⁶⁴ Cette publication traite tout particulièrement de la sédimentologie et de la microtectonique notamment de la cartographie des failles et de leur caractérisation. Pour faire une évaluation complète de ces données une investigation sur le terrain de plusieurs semaines serait nécessaire et sort du cadre de notre mandat de revue. Bien que dans ces rapports l'ANDRA ait présenté un grand nombre de données elle n'a, en revanche, fournit aucune interprétation de la chronologie des étapes des déformations. Bien que l'histoire tectonique déduite à partir des périodes ou des régions exhibant une extension ou une compression semble plausible, une évaluation définitive n'est pas possible dans ce rapport. Il est également plausible que la cartographie des accidents structuraux soit complète mais, une fois encore, une conclusion définitive sur ce sujet sort du cadre de notre mission. Nous notons que l'ANDRA suggère la nécessité de mener des travaux supplémentaires sur les modèles géotectonique et sismotectonique.⁴⁶⁵

ANDRA 1998 décrit l'évolution tectonique et l'état actuel, comme la profondeur du Moho, la disposition et l'orientation des failles, et la distribution des failles pléistocènes identifiées avec des ruptures au travers de la surface. Dès le résumé de ce rapport, les auteurs recommandent vivement d'installer un réseau local de stations sismiques, et d'employer des mesures GPS pour surveiller les mouvements actuels. En fait il n'existe qu'un seul sismographe pour enregistrer la sismicité sur le site. En novembre 2002 trois

⁴⁶³ ANDRA, 1998

⁴⁶⁴ ANDRA Cartographie 2001

⁴⁶⁵ ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt. A, p. 67.

stations supplémentaires ont été installées autour du site de Bure à des distances entre 20 et 40 kilomètres.⁴⁶⁶ Ces distances sont trop éloignées pour permettre la localisation de petits séismes locaux avec une précision suffisante. Il existe des dispositifs GPS sur le site, mais les mesures effectuées ne sont utiles que pour surveiller des effets locaux pendant les travaux de construction.

Dans la section 7.3.4 il est fait référence au travail de Lenotre et al. (1994),⁴⁶⁷ qui interprètent les résultats de nivellement par mesures successives en France. Malheureusement, ils ne reproduisent pas cette carte, et ne font mention que de quelques soulèvements et subsidences dans la zone environnante plus vaste, se bornant à déclarer qu'il n'existe aucun indice de mouvements néotectoniques sur le site..

La sismicité est traitée dans la section 7.3.5. Ici, le rapport fournit quelques informations supplémentaires. Le catalogue de sismicité de Godefroy et al. (1990) est employé.⁴⁶⁸ Ce fichier est succinctement décrit. Cependant l'ANDRA ne fournit pas de tableau à partir duquel il serait possible de faire une évaluation détaillée de ce catalogue. Puisque le fichier utilisé pour cette étude contient également des entrées de pays voisins, une comparaison de ces entrées avec les fichiers, par exemple d'Allemagne aurait été nécessaire.

ANDRA 1998 ne présente que des tracés des épïcêtres avec les dates des plus grands événements, référencés par une mesure de qualité (A, B, C, D), mais sans plus d'analyse ou de tableaux plus spécifiques. Par conséquent, il est difficile de comparer cette information à celle des fichiers sismiques des pays voisins.

Les failles actives sont discutées, en intégrant même les résultats paléosismiques de Camelbeek et Meghraoui.⁴⁶⁹ On donne également une évaluation des ruptures localisées en surface qui proviennent des tremblements de terre pléistocènes, dont l'importance atteint deux mètres. Mais il est impossible de tirer des conclusions spécifiques pour le site de Bure, parce que les données locales sont absentes.

Des contraintes horizontales sont données dans les rapports ANDRA.⁴⁷⁰ Dans certaines illustrations, la contrainte locale s'aligne sur le champ de contrainte dominant (tout comme les ovalisations par ruptures des parois des forages), mais les cartes détaillées indiquent de nombreuses directions de vecteurs de contrainte.⁴⁷¹ Les résultats de la forte charge horizontale de contrainte se manifestent clairement dans les carrières locales : lors d'une visite du groupe organisée par IEER en mars 2004 nous avons visité plusieurs

⁴⁶⁶ D'après une information publique (www.andra.fr/popup.php3?id_article=303) de septembre 2004. Des détails supplémentaires (arrangement, carte, caractéristiques, résultats) ne sont pas fournis mis à part la référence aux 5 stations du réseau national de l'Est de la France, qui supplémentent les trois stations autour de Bure, et le lien vers le site de l'Université de Strasbourg. Aucune information ne nous avait été fournie lors de notre visite de Mars 2004, bien que cette question ait été pressément posée.

⁴⁶⁷ Lenotre et al., 1994, cité dans ANDRA 1998

⁴⁶⁸ Godefroy et al., 1990, cité dans ANDRA 1998

⁴⁶⁹ Camelbeek et Meghraoui, 1996 et 1998)

⁴⁷⁰ ANDRA, 1998; ANDRA Référentiel Géologique Tome 2, 2001 ; ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.A

⁴⁷¹ ANDRA Cartographie, 2001, vol.2, fig. 60

carrières et une saignée impressionnante à travers les couches supérieures le long d'une route nouvellement construite. Nous avons pu identifier un réseau de diaclases et de failles distantes d'environ 5 à 10 mètres et disposées perpendiculairement entre elles (voir Annexe 3). Parce qu'elles communiquent avec la surface, ces ouvertures sont des voies de passage évidentes pour la migration descendante des eaux. Parmi ces failles, certaines, comme par exemple une faille examinées dans le graben de Gondrecourt auraient pu servir de passage à la migration ascendante de l'eau. (Voir Annexe 6.1 du chapitre 6 de ce rapport) De plus, l'identification d'un réseau de diaclases et de failles est crucial pour comprendre l'hydrogéologie du site. Pour une discussion sur ce sujet voir le, chapitre 5 de ce rapport.

Le fossé de Gondrecourt est un graben à l'est du site dans la direction NNE - SSW, à une distance de 5 à 7 kilomètres environ, au sud-est. Sa largeur ne dépasse pas 2 kilomètres, mais sa longueur est supérieure à 30 kilomètres. Les déplacements verticaux dérivés des campagnes sismiques de réflexion sont de l'ordre de 50 m à 100 m. Le Dossier 2001 Argile indique que l'activité sismique proche est très faible.⁴⁷² Mais, puisqu'il n'existe pas de réseau sismique avec un seuil de détection inférieur à $ML \leq 2,5$, cela n'est vrai que pour des magnitudes de tremblement de terre supérieures à 2,5. Le Référentiel Géologique du site Meuse/Haute-Marne, Tome 2⁴⁷³ indique dans le chapitre 5, page 23 que : « Toutefois, la configuration des réseaux sismologiques existants, avec le faible nombre et la disposition des stations en service, en particulier l'absence de station à l'ouest du secteur Meuse/Haute-Marne, ne permet pas une localisation précise des épicentres de ces séismes détectés dans cette région. Il subsiste de ce fait, une incertitude portant [...] sur :- la détectabilité : possibilité d'une microsismicité non détectée, ... ». Dans la mesure où il n'existe pas de mesure de magnitudes inférieures à 2,5 il n'est pas justifié de déclarer qu'il n'existe pas d'activité néotectonique. L'absence de mesures précises de nivellement du Graben, qui pourraient révéler des mouvements relatifs au réseau des diaclases, montre qu'il est nécessaire de poursuivre la recherche avant de pouvoir faire une telle affirmation.

Plus précisément, une affirmation au sujet de l'activité néotectonique ne peut se faire que sur la base d'une surveillance avec un réseau sismique local. Ici, nous nous référons au site de Gorleben, en Allemagne, où cinq stations (composante verticale seulement) sont installées sur le périmètre d'un cercle entourant le site (diamètre d'environ 25 kilomètres) dans des forages de 300 m de profondeur. Il y a aussi une station avec 3 composantes au centre du site. Les capacités de détection du réseau sismographe pour des événements sismiques dans le pentagone sont évaluées à une valeur pouvant descendre jusqu'à $ML = 0,5$. Avec ce réseau il a été possible non seulement d'obtenir d'excellents enregistrements de tremblements de terre en Allemagne du nord, mais aussi de montrer que la zone autour de Gorleben est presque asismique, du moins pendant la période de surveillance.

La station sismique existant sur le site de Bure et la station sismique du réseau sismique régional à une distance de 15 kilomètres environ, sont loin de suffire pour enregistrer tous les événements qui se produisent et pour les analyser par rapport à la structure souterraine

⁴⁷² ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A, p. 67

⁴⁷³ ANDRA Référentiel Géologique Tome 2, 2001

et aux failles qui les provoquent. Par conséquent, il n'est pas possible de déclarer que la zone est asismique avant d'avoir fait les mesures nécessaires.⁴⁷⁴

Notre évaluation préliminaire de la situation sur ces questions nous permet de conclure que le fossé de Gondrecourt semblerait être la faille régionale la plus importante. Il resterait à vérifier cette conclusion à l'aide de mesures approfondies, dont des mesures précises de nivellement sur une durée suffisamment longue répétées tous les deux à cinq ans, ainsi que des mesures sismiques dans la région. La surveillance de la dynamique récente peut être faite par des tiltomètres de forages dans la vicinité du fossé. NAGRA a effectué ce type de mesures dans son laboratoire suisse de Grimsel. (avec la collaboration de GRS -- Gesellschaft fuer Reaktorsicherheit).

Le rejet de la faille du fossé de Gondrecourt est orientée presque parallèlement à la direction principale de la contrainte d'extension de l'Europe centrale, mesurée dans la région du Rhin et du sud de l'Allemagne. La direction générale en Europe centrale consiste en une extension NE-SW (environ) et une compression NW-SE (environ). Les cartes de l'ANDRA indiquent différentes directions de contrainte d'extension (NW-SE, NE-SW et même E-W)⁴⁷⁵ Ces différentes contraintes d'extension peuvent conduire à différentes directions de mouvements de rejet. Tout semble donc indiquer que la région est caractérisée par une charge de contrainte/déformation relativement forte. Ce n'est donc pas une région asismique calme.

7.2.3 Aléa sismique

Il manque une robuste évaluation du risque sismique, comparable à celles menées avec des techniques de pointe dans d'autres pays. Les documents fournis par l'ANDRA (dont il est fait mention ci-dessus) ne contiennent pas de fichiers sismiques ou un tableau des événements qui sont considérés. Par conséquent le caractère exhaustif des cartes d'épicentres ne peut pas être évalué. Nous pouvons seulement conclure que l'affirmation selon laquelle la zone de Bure est asismique est avancée sans preuves adéquates.

Des mesures utilisant des techniques de pointe, effectuées sur une période de temps relativement courte, doivent être complétées par une étude de la sismicité historique. Une évaluation de l'aléa sismique maximum doit pouvoir se baser sur un fichier sismique complet, avec notamment la sismicité historique (en termes d'intensité ressentie, échelle de MSK) et les événements enregistrés fournissant les magnitudes locales ML. Il est possible d'utiliser des formules empiriques pour convertir des intensités en magnitudes et vice-versa. Il est aussi possible d'utiliser des formules empiriques pour déterminer l'accélération et la période de mouvements forts pour les plus grands événements. Ici, une évaluation des incertitudes est cruciale. Dès lors que l'événement maximal observé est

⁴⁷⁴ Nous sommes conscient de l'existence de réseaux nationaux sismiques. Cependant ils sont de peu d'utilité en ce qui concerne le site de Bure même. Pour cela ils devraient être intégrés à l'évaluation du site de Bure..

⁴⁷⁵ ANDRA Cartographie 2001 v. 2, Les figures 76 à 82 indiquent ces différentes directions.

toujours inférieur à l'événement maximal possible, nous devons appliquer certaines règles. Afin de déterminer l'événement maximal possible il est nécessaire de procéder d'abord à un zonage sismique. Ensuite, la répartition fréquence-magnitude et la valeur « b » dérivées pour différentes zones sismogènes servent de base pour des évaluations supplémentaires. Enfin, un examen du caractère prudent de l'évaluation permettra de juger quand, et avec quelle probabilité, un tel événement peut être attendu.

Le résultat est une carte d'aléa sismique qui indique des zones de différentes intensités pour la région Est de la France avec une probabilité d'un dépassement de 10 % dans les 100 ans. Encore une fois, en appliquant certaines règles prenant en compte la situation tectonique et les zones sismogènes, il est possible à partir de cette carte de déterminer le séisme maximum historiquement vraisemblable, pour un site donné, et par conséquent des paramètres additionnels comme par exemple ceux de l'accélération et de la période de mouvement fort. Il incombe aux règles nationales de définir le tremblement de terre de conception et le tremblement de terre de sûreté⁴⁷⁶. Dans certains pays, ils sont traités séparément et pas dans d'autres (c'est le cas de l'Allemagne). La réglementation française mise à notre disposition ne donne pas une définition de ces tremblements de terre en spécifiant des valeurs comme l'accélération au sol ou la période de mouvements forts. Les rapports de l'ANDRA ne traitent pas non plus de cette question.

En ce qui concerne l'étude fournie par l'ANDRA il s'y trouve une carte de zonage sismique (compilée par Godefroy).⁴⁷⁷ Par contre il n'y a pas de tableau présentant les événements sismiques ni le fichier utilisé. De plus, il n'y a aucune discussion détaillée des incertitudes mises en jeu. La délimitation de la zone dans la figure. 7-3 et la caractérisation sont quelques peu contradictoires. Par exemple, la figure. 7-3 montre que la zone D1 (Massif Brabant-Midland) contient au moins deux événements d'intensité VII à VIII, mais, dans le texte, seule la faible sismicité de $I_0 < IV$ est soulignée.

Dans notre cas, la zone d'intérêt, D2, apparaît comme couvrant la totalité du bassin parisien, de la Manche au Graben du Rhin. Cette approche n'est pas logique, puisque dans l'Est l'activité sismique observée au moyen d'instruments est plus élevée à l'est qu'à l'ouest de cette zone. C'est pourquoi une subdivision de cette zone en deux zones aurait permis une meilleure représentation des données.

De plus, *le fichier sismique complet n'a pas été utilisé*. Les tremblements de terre dans le Graben du Rhin, à la fois historiques et mesurés, ne sont pas tous pris en compte. Par exemple le tremblement de terre historique de Sarrelouis en 1691 ($I_0 = VI$, $ML = 5.1$; ressenti sur une zone d'un rayon de 200 kilomètres), bien au centre de la moitié orientale de la zone D2, n'est pas inclus (comparaison avec le fichier allemand des séismes, Leydecker).⁴⁷⁸ Nous avons consulté les fichiers internationaux et avons trouvé plusieurs événements enregistrés dépassant $ML = 4.0$ et aussi des événements historiques qui n'avaient pas été inclus (voir l'annexe 5). **Le caractère incomplet du fichier, l'absence**

⁴⁷⁶ Le séisme maximum historiquement vraisemblable (SMHV) n'interrompra pas l'opération du site de stockage alors que le séisme majoré de sécurité (SMS) posera des problèmes bien que d'une ampleur telle à ne pas permettre le relâchement des radionucléides.

⁴⁷⁷ Godefroy et al., 1993 en ANDRA, 1998, fig. 7-3, voir Annexe 4;

⁴⁷⁸ Leydecker, 1997

d'un tableau ainsi que d'une discussion relative aux tremblements de terre historiques constituent de sérieuses lacunes pour le rapport sismologique de l'ANDRA.

Vu les **deux tremblements de terre dans les Vosges des 22 février 2003, et 23 février 2004, de magnitudes ML = 5,7 et ML = 5,5 (USGS) respectivement**, à des distances du site de 101 kilomètres et de 134 kilomètres, nous sommes amenés à juger que, jusqu'à maintenant, le risque d'un tremblement de terre est sous-estimé.

Avant de prendre en compte certaines lois d'atténuation il devrait être clair que les tremblements de terre observés pris comme le séisme maximum historiquement vraisemblable (S.M.H.V.) doivent être déplacés à la frontière tectonique entre les zones sismogènes. Ceci se traduit habituellement par une distance beaucoup plus petite entre le site du stockage et l'épicentre potentiel que celle observée au départ.

Les auteurs du rapport sismique expliquent la loi d'atténuation et leur manière d'évaluer les séismes maximaux historiquement vraisemblable à partir des événements historiquement observés.⁴⁷⁹ Mais, comme nous l'avons indiqué ci-dessus, les faits importants sont mélangés avec ceux de moindre importance. Puisque les faits importants ne sont pas mis en valeur les conclusions finales à en tirer ne sont pas évidentes. Plusieurs lectures sont parfois nécessaires pour clarifier les faits.

Au lieu de définir clairement les S.M.H.V. et les séismes majorés de sécurité (S.M.S.) et le fondement de sa décision, l'ANDRA analyse plusieurs événements historiques comme le tremblement de terre de Bâle (1356), qui n'est pas pertinent pour le site parce qu'il n'appartient pas à la tectonique du Graben du Rhin ; les dommages sévères peuvent être causés par d'extrêmes effets sur le site.⁴⁸⁰ A partir des analyses, nous interprétons son résultat final comme suit:

Séisme maximum historiquement vraisemblable (S.M.H.V.) I = IV (rapport)
Séisme majoré de sécurité (S.M.S.) I = V (rapport)

Ordinairement, la discussion de l'aléa sismique est complétée par la présentation d'un spectre de réponses qui comporte l'effet de la charge sismique sur les travaux de construction de surface et souterrains. Ces spectres sont employés par des ingénieurs du génie civil pour mettre en œuvre les travaux de construction en conséquence. Ce spectre de réponses doit être obtenu sur la base des conditions locales. La structure et les caractéristiques souterraines ainsi que le séisme potentiel maximum doit être pris en compte. Dans le cas où il n'existe pas assez d'événements enregistrés, la façon d'y pallier serait d'employer les sismogrammes d'autres sites similaires ou même un spectre existant pour des sites semblables. Pour la période de construction, il est absolument indispensable d'utiliser un tel spectre pour la construction, parce qu'il fournit les accélérations maxima ainsi que la gamme de fréquences qui peuvent être rencontrées.

⁴⁷⁹ ANDRA, 1998

⁴⁸⁰ Fäh et al., 1997. Ce tremblement de terre a été causé par le front Alpin. Il n'appartient pas à la tectonique du Graben du Rhin ; de plus de nouvelles données révèlent que de forts effets locaux sur le site ont pu donner lieu à une surestimation de la magnitude de cet événement.

Dans le cas de Bure nous n'avons pas trouvé de spectres de ce type. Leur absence a représenté un obstacle majeur pour notre évaluation.

7.3 Discussion – évaluation

7.3.1 Généralités

Dans les sections précédentes, nous avons discuté et évalué le travail de l'ANDRA dans le contexte de la réglementation française. Certains aspects seront repris ici, si cela s'avère nécessaire. Nous analyserons et porterons un jugement sur le travail de l'ANDRA dans le contexte de la réglementation française ainsi que dans un contexte plus large. Nous n'avons pas fait appel à d'hypothétiques "meilleures normes" parce que ceci pourrait traduire notre seule opinion et serait donc trop subjectif. En revanche, nous avons essayé de voir si des incohérences existaient entre les affirmations énoncées et les données soutenant ces affirmations. Dans une deuxième étape, nous appliquerons quelques normes générales qui ont été développées par les participants impliqués dans la recherche et l'étude d'un site de stockage en formation géologique.

De plus, nous envisagerons la globalité du concept et apporterons quelques recommandations non seulement sur la détermination de l'aléa sismique, mais également sur la stabilité tectonique de la région autour du site.

7.3.2 Caractère pénalisant de l'évaluation de risque de l'ANDRA

La règle III.2.f exige que les incertitudes soient explicitement calculées pour la période inférieure à 10 000 ans et que des calculs majorants soient réalisés pour la période ultérieure. En général, il existe deux façons d'adopter une approche prudente. On peut estimer explicitement les incertitudes et arriver à une limite supérieure de confiance de 90 pour cent, 95 pour cent, 99 pour cent pour un séisme futur envisagé. Ou bien un certain degré de pessimisme peut être aussi obtenu en ajoutant un demi ou même un degré à l'intensité (Echelle MSK). Mais dans ce cas, les éléments permettant de connaître la quantité ajoutée doivent être cités. Une quantification numérique est nécessaire pour assurer un principe de prudence et permettre une évaluation correcte des résultats.

Ce point est discuté par les participants engagés dans la recherche et l'étude d'un site de stockage en formation géologique pour l'application de certaines méthodes contraignantes. Par exemple, il faut soit utiliser le fractile de 84 pour cent du spectre soit la moyenne et y ajouter 1 degré MSK.

Dans le cas de Bure la définition du séisme majoré de sécurité peut servir de mesure de prudence. Mais, puisque la base de données n'est pas complète et pas transparente, les résultats donnés ne peuvent pas être considérés comme pénalisants. L'affirmation indiquant que $I = V$ pour l'analyse de sûreté n'est pas démontrée de manière convaincante.

7.3.3 Période de confinement

Comme mentionné dans la section 7.1.2.1, la Règle III.2.f spécifie deux périodes pour lesquelles le confinement est estimé. Pour la première période de 10 000 ans ou moins, la meilleure estimation de dose doit être fournie, en précisant les incertitudes. Ceci signifie que tous les paramètres et les facteurs pertinents, notamment la sismicité, doivent être étudiés de façon suffisamment détaillée pour préciser les incertitudes. Pour la période ultérieure s'étendant jusqu'à un million d'années, des estimations prudentes doivent être faites. Ceci signifie que la recherche doit être capable de faire apparaître que la situation géologique du site restera vraisemblablement très stable et prévisible pour cette période. Plus précisément, ceci nécessite une évaluation non seulement de la sismicité de la zone mais aussi de la déformation à long terme.

7.3.4 Activité tectonique

La sismicité et la déformation fournissent une image de l'activité tectonique récente, tandis que la cartographie géologique fournit des connaissances sur le passé géologique, permettant un certain degré de prédiction sur le futur développement.

En plus des problèmes mentionnés ci-dessus nous pouvons dire que les affirmations figurant dans le Dossier 2001 Argile ne sont pas toutes étayées par des données.⁴⁸¹ Les données indiquent que la région Meuse/Haute-Marne a un taux faible de sismicité et de déformation. Cela reste cependant à être mesuré. Sinon l'affirmation « *La région Meuse/Haute-Marne se présente comme une région à très faible taux de déformation et à très faible sismicité potentielle* »⁴⁸² relève d'une certaine spéculation. Il est vrai qu'il est difficile d'évaluer l'aléa sismique sur une très longue période, à l'échelle de temps géologiques. Nous pouvons néanmoins nous servir de la sismicité historique et de la paléo-sismicité afin d'évaluer ce problème. Une analyse de la sismicité historique est importante, mais il faut garder à l'esprit que, dans le cas de la sismicité actuelle: « *La sismicité historique ne peut de fait pas être représentative de la sismicité à long terme.* »⁴⁸³ Ceci doit être pris en compte afin de ne pas sous-estimer l'aléa sismique. Là encore, à la lumière des événements récents, il faut souligner l'importance d'installer des réseaux locaux de surveillance se composant de stations sismiques, de points précis de nivellement et de clinomètres de forage.

Dans ce contexte, nous rappelons le travail de Lenotre et al.,⁴⁸⁴ qui interprètent les résultats du nivellement en France. Il existe donc des données mais dans ANDRA 1998, la carte n'est ni présente, ni analysée. Au lieu d'une analyse de ces résultats dans le contexte de la situation tectonique locale, l'ANDRA ne mentionne que quelques soulèvements et affaissements dans une zone alentour plus vaste, et se borne à conclure qu'il n'existe aucun indice de mouvements néotectoniques sur le site.

⁴⁸¹ ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.A

⁴⁸² ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.A, p. 67

⁴⁸³ ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.A, p. 67

⁴⁸⁴ Lenotre et al., 1994, cité dans ANDRA 1998

Au lieu d'une information complète et de résultats quantitatifs, l'ANDRA se contente d'énoncer sans assez de preuve que "... les données récentes sur la néotectonique et la paléosismicité permettent de confirmer l'**hypothèse** d'une absorption de la plus grande partie des contraintes tectoniques en limite du domaine peu déformé que constitue l'Est de la France par les déformations survenant dans le Graben du Rhin inférieur, les structures ardennaises, le fossé alsacien et le Nord du massif central. ». L'ANDRA continue également sur cette base insuffisante de données, et déclare que "*En première approche, les études et observations disponibles concourent ainsi à montrer que les effets en profondeur, sur la barrière géologique comme sur les installations, devraient être peu perceptibles vu la très faible sismicité proche, la distance aux sources sismogènes régionales et la profondeur de la couche hôte.*" (Italique, ANDRA; gras, c'est nous qui soulignons).⁴⁸⁵

Il semble que l'ANDRA admet que son rapport sismologique n'est pas complet puisqu'elle souligne que : « *Le modèle géodynamique et sismo-tectonique reste à consolider. Afin de compléter les données disponibles, de nouveaux appareils seront installés sur le secteur, en parallèle au dispositif national d'enregistrement des séismes. Ils apporteront des informations, permettant de préciser les niveaux de sismicité à prendre en compte dans la conception des ouvrages. Ils seront à différencier d'une part entre installations de surface et ouvrages en profondeur, d'autre part entre les différentes phases de vie d'un éventuel stockage.* »⁴⁸⁶

Ceci a été écrit avant ou en 2001, mais notre visite de mars 2004 ne nous a pas permis d'avoir confirmation de l'exécution effective de cette recommandation. Ce travail expérimental demandera au moins un an.

7.3.5 Evaluation de l'aléa sismique

Le catalogue sismique de Godefroy et al.⁴⁸⁷ utilisé dans les rapports de l'ANDRA contient des entrées macrosismiques remontant à 6 à 7 siècles, ce qui est suffisant. Il contient aussi des entrées microsismiques de mesures prises entre 1962 et 1997, indiquant des événements de magnitudes $ML \geq 2,5$ (les italiques sont de l'ANDRA).⁴⁸⁸ Puisque le fichier utilisé pour cette étude contient également des entrées de pays voisins, une comparaison de ces entrées avec les fichiers, par exemple de l'Allemagne aurait été nécessaire. Etant donné qu'aucun tableau ou carte n'est présenté, il n'est pas possible de faire une évaluation de qualité.

Habituellement, pour un projet de ce genre, la sismicité locale est surveillée de près. A Bure une seule station sismique est installée sur le site. Puisqu'un minimum de trois (de préférence quatre) stations est nécessaire pour localiser un événement, l'enregistrement

⁴⁸⁵ ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.A, page 67

⁴⁸⁶ ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.A, page 67

⁴⁸⁷ Godefroy et al., 1990

⁴⁸⁸ Dans ANDRA, 1998

de cet événement n'est pas suffisant pour permettre de déterminer sa localisation. Il semblerait que cette station ne serve qu'à détecter la microsismicité liée à la construction des puits et les galeries. Avec cet équipement il est impossible de surveiller le site et le secteur environnant et de détecter des activités tectoniques locales.

Nous soulignons que toutes les hypothèses sur la sismicité de la zone doivent être prouvées. La consultation des fichiers régionaux de tremblement de terre ne suffit pas pour pouvoir déclarer qu'il n'y a pas eu d'événements. De plus, les petits événements fournissent des informations très détaillées sur les mouvements tectoniques dans la structure sous-jacente.

Dans le rapport sismologique ANDRA 1998 l'intensité du *séisme maximal historiquement vraisemblable (S.M.H.V)* et celle du *séisme majoré de sécurité (S.M.S)* diffèrent d'un degré.⁴⁸⁹ Nous comprenons que (p. 74) l'endroit du tremblement de terre choisi comme S.M.H.V. est déplacé au sein de son secteur sismogène pour se situer à la limite du secteur aussi près que possible du site. Cette approche est acceptable, parce qu'elle respecte la norme internationale. **En conséquence, au sujet du zonage appliqué, le tremblement de terre manquant de Sarrelouis (1691) devrait être déplacé dans la zone sismogène juste sous le site de Bure.** Si la règle proposée dans le rapport est suivie, le séisme majoré de sécurité aurait alors une intensité $I_0 = VII$. Cette valeur ne caractérise absolument pas une région asismique.

Pour illustrer cette conclusion nous nous rapportons à l'étude relative au site de Gorleben. En raison d'un tremblement de terre historique dans la région le tremblement de terre de référence a aussi été déterminé à $I_0 = VII$.⁴⁹⁰

Nos réflexions nous amènent à ne pas souscrire aux conclusions de l'ANDRA qui établissent le séisme maximum historiquement vraisemblable pour le site Bure à $I = IV$ et $I = V$ pour le séisme majoré de sécurité. L'absence de spectres de réponse est une lacune grave. **Cette lacune, et le traitement de la basse sismicité donnent l'impression que l'aléa sismique est significativement sous-estimé.** Vu les données actuellement disponibles et la nature des incertitudes, notre conclusion préliminaire est que les deux valeurs doivent être majorées de deux degrés :⁴⁹¹

Séisme maximum historiquement vraisemblable (S.M.H.V.) : $I = VI$
Séisme majoré de sécurité (S.M.S. : $I = VII$).

L'augmentation de deux degrés que nous suggérons aurait pour conséquence de changer radicalement la conception du laboratoire et les hypothèses de séisme maximum historiquement vraisemblable et de séisme majoré de sécurité avancées par l'ANDRA. Par conséquent, l'aléa sismique doit être estimé suivant les normes précisées dans cette étude, suivant des procédures internationalement admises. Les valeurs basses de l'ANDRA ne sont pas justifiées par les résultats fournis. De plus, la recherche pourrait

⁴⁸⁹ ANDRA, 1998

⁴⁹⁰ Ahorner, 1989 ; Leydecker, 1997

⁴⁹¹ ANDRA, 1998

indiquer la nécessité de changer les valeurs pour S.M.H.V. et S.M.S. mais il est improbable que ces travaux supplémentaires confirmeraient les chiffres de l'ANDRA.

7.3.6 Activité tectonique et barrière géologique

La réglementation française de sûreté, comme nous l'avons déjà indiqué, contient également le concept multi-barrières. Outre la barrière technique (colis de déchets) et la barrière géotechnique (matériaux de remblayage autour des conteneurs) la roche hôte et la roche sus-jacente servent de barrières géologiques contre l'intrusion venant de la surface résultant des événements naturels et des activités humaines. Le rôle de la barrière géologique est primordial en ce qu'elle doit garantir, dans l'éventualité d'une défaillance des barrières ouvragées, que le retour potentiel des radionucléides à la biosphère sera suffisamment retardé pour ne pas dépasser la limite de dose de 0,25 mSv par an. Par conséquent, la barrière géologique doit se caractériser par une circulation d'eau horizontale et verticale diffusive réduite au minimum. Comme l'analyse en détail le chapitre 5, cela signifie que les perméabilités et les gradients hydrauliques doivent être très faibles.

Deux facteurs doivent être considérés :

- les propriétés physiques et chimiques et les dimensions de la roche hôte doivent être adéquates pour piéger et retarder les radionucléides, et
- les caractéristiques des couches sus-jacentes doivent pouvoir empêcher toute pénétration d'eaux souterraines dans la roche hôte (sans parler de l'intrusion humaine).

Par conséquent, l'efficacité des barrières géologiques devrait non seulement être testée grâce à des expériences sophistiquées de laboratoire, mais également avec des scénarios à plusieurs échelles. Il faut étudier la question des propriétés mécaniques et les conditions des contraintes et champs de contrainte sous lesquelles la roche hôte et les couches sus-jacentes se prêtent à la formation de voies de transfert pour l'eau, et quelles capacités « d'auto-cicatrisation » existent. Les conditions aux limites pour la réponse sont naturellement le champ de contrainte prévalent et l'existence de sources dans la région, c'est-à-dire le transport de l'eau de profondeurs plus importantes à la surface. De plus, les fissures et les diaclases ainsi que les calcites présentes dans la couche superficielle doivent être prises en compte.

La perméabilité globale est le paramètre crucial, et non pas les valeurs obtenues par des sondes dans des conditions de laboratoire. La zone de confinement de la roche doit se composer de types de roches caractérisées par une perméabilité **globale** inférieure à 10^{-10} m/s. La valeur avancée de 10^{-12} m/s reste à prouver définitivement, ce qu'il sera difficile de faire in situ. Pour mettre en évidence ce problème, nous rappellerons qu'une valeur de 10^{-12} m/s correspond à un mouvement d'environ 3 mètres en 100.000 ans. Mais une valeur de 10^{-10} m/s correspond à une distance de 300 mètres. Les mesures de laboratoire et des

résultats obtenus sont présentées de façon plus approfondie dans le chapitre 5 de ce rapport

La question de la migration des radionucléides et de la recherche s'y rapportant est traitée dans d'autres chapitres, en particulier dans le chapitre 5. Dans le contexte de cette discussion il est important de souligner que la sismicité et la déformation sont des indicateurs de la situation tectonique de contrainte. La distribution des failles géologiques doit être interprétée également en termes de formation des voies de transfert de l'eau. Ceci vaut également pour l'EDZ (excavation damaged zone) et les matériaux de remblai, pour lesquels la contrainte tectonique et les ondes sismiques pourraient affaiblir la roche déjà endommagée (voir le chapitre 2 de ce rapport).

Finalement, Raynal traite de la modélisation de ces critères et aborde simultanément les propriétés mécaniques et thermiques.⁴⁹² Malheureusement, la plupart des travaux de ce type se trouvent dans des rapports non publiés. Nous ne pouvons par conséquent nous référer qu'à nos travaux publiés qui indiquent qu'une modélisation couplée s'impose. Il faut toutefois remarquer que cette approche n'est pas encore généralisée (Jentzsch, 2001; 2002 ; cité dans AkEnd, 2002).⁴⁹³

7.4 Recommandations détaillées

Notre étude a mis en évidence plusieurs lacunes qui demandent à être rectifiées. Dans cette section, nous n'abordons que les sujets de *l'activité tectonique* et de *l'évaluation de l'aléa sismique*.

7.4.1 Carte des mouvements verticaux.

Cette carte existe sans doute, mais les rapports de l'ANDRA ne présentent aucune figure ou tableau. L'affirmation selon laquelle aucun mouvement vertical n'a été observé ne suffit pas. Elle doit être prouvée. L'ANDRA doit fournir une carte et des données accompagnées d'une analyse à l'appui de ses affirmations.

Nivellement par mesures successives sur le site et sur les failles géologiques distinctes

Des mouvements verticaux sur le site devraient non seulement être détectés par des mesures GPS répétées, mais également par des nivellements en raison de leur résolution plus élevée. Ces mesures devraient se faire sur le site ainsi qu'aux alentours sur des failles distinctes.

Mesures supplémentaires pour détecter des mouvements de surface à long terme

Une partie du travail de surveillance devrait porter sur la déformation, particulièrement dans une région caractérisée par un important champ de contrainte. Des mesures

⁴⁹² Raynal, 1996

⁴⁹³ Jentzsch, 2001; 2002 ; cité dans AkEnd, 2002

d'inclinaison de forage du type de ceux réalisés dans la mine expérimentale de Grimsel (granit, Suisse) et dans la mine de Konrad (roches sédimentaires, en Allemagne) pourraient permettre d'évaluer cette déformation. L'ANDRA a récemment fait ce type de forage et devrait en extraire les informations nécessaires.

Modélisation numérique du champ de contrainte prévalant/dominant

La structure géologique (connue à partir du profil sismique de réflexion et de la modélisation recommandée de l'anomalie de Bouguer [gravité]) et le champ connu de contrainte fournissent d'excellentes conditions pour la modélisation de la dynamique récente. Ceci pourrait aider non seulement à découvrir les évolutions récentes et à prévoir les futures mais aussi à étudier les conditions qui pourraient conduire à des voies de transfert de l'eau dans la profondeur du site de stockage. Cette opération demanderait un essai à grande échelle sur les propriétés de l'Argilite du site de Meuse/Haute-Marne.

7.4.2 Évaluation de l'aléa sismique

Réseau de surveillance sismique adapté au site de Bure

Un réseau sismique pertinent devrait être constitué d'au moins cinq stations de sismométrie à 3 composantes dans des forages (à une profondeur d'au moins 100 m pour éviter toute influence de la surface), dans un rayon de 10 à 15 kilomètres et d'une station à trois composantes à bande large sur le site. Le seuil d'enregistrement des tremblements de terre devrait être égal ou inférieur à la magnitude de 0,5. Ce système permettra la localisation d'un événement par plus de 3 stations. Un tel réseau aurait déjà dû fonctionner bien avant le démarrage des travaux sur le site de Bure pour fournir des données fiables. Malheureusement cela n'a pas été fait. Nous soulignons qu'il ne suffit pas de transposer la configuration du réseau de Gorleben ou de tout autre site. La zone autour du site de Bure possède de nombreuses failles géologiques. En ce qui concerne le champ de contrainte et de ses variations nous recommandons vivement d'installer plus de stations, particulièrement celles à 3 composantes. Le temps de surveillance nécessaire pour obtenir des résultats fiables **est au moins d'un an.**

Compléter le fichier sismique et l'analyse des entrées sismiques historiques et nouvelles (tableau et graphe)

Le fichier sismique pour la France doit être complété, et la source et la plausibilité des entrées historiques pertinentes pour déterminer les séismes maximaux historiquement vraisemblables et les séismes majorés de sécurité doivent être particulièrement discutées. L'évaluation de l'emplacement, des intensités et des magnitudes calculées doit être rendue transparente. Les événements enregistrés (après 1962) doivent être inclus et discutés en relation avec les failles existantes.

Comparaison avec les fichiers des pays voisins

Une fois complété, le fichier sismique devra être comparé aux fichiers des pays voisins. Les entrées identiques, devront être discutées du point de vue de leurs paramètres et, le cas échéant, devront être interprétées différemment. A l'étape finale, toutes les informations doivent être cohérentes.

Zonage sismique réaliste et analyse.

Le zonage sismique doit être remanié en fonction des entrées du fichier sismique. La décision devrait se faire sur une base quantitative en utilisant des paramètres sismiques.

Carte d'aléa sismique

Une carte d'aléa sismique donne la répartition des différentes intensités, de l'intensité maximum et de la fréquence de réapparition pour une certaine probabilité. L'analyse de cette carte, en association avec les propriétés locales du terrain, permettrait de déduire l'accélération maximum ainsi que la période de mouvements forts (effets de site). Ce sont les conditions aux limites pour les travaux de surface ainsi que pour les travaux des ouvrages souterrains (prise en compte de la réponse souterraine légèrement différente).

Évaluation détaillée des incertitudes

Toutes les erreurs doivent être discutées. C'est le plus important par rapport à la discussion du caractère prudent des résultats.

Analyse des propriétés souterraines relative au spectre de réponse

Les couches géologiques sus-jacentes devraient être caractérisées (au minimum pour : le sol meuble, le milieu et la roche). Elles régissent le spectre de réponse; par conséquent, elles jouent un rôle important pour la détermination de la charge sismique des travaux de construction sur le site.

Dérivation et discussion des spectres de réponse (horizontaux et verticaux)

Les spectres de réponse sont nécessaires pour définir la charge sismique pour les ouvrages au-dessus et au-dessous de la surface.

7.4.3 Généralités

Une discussion sur le caractère prudent des résultats.

Le caractère prudent des résultats doit être transparent et quantifié. Sinon les résultats ne peuvent pas être employés en conséquence. Il y a différents concepts, et les conseillers scientifiques doivent tirer leurs conclusions sur ceux qu'ils choisissent.

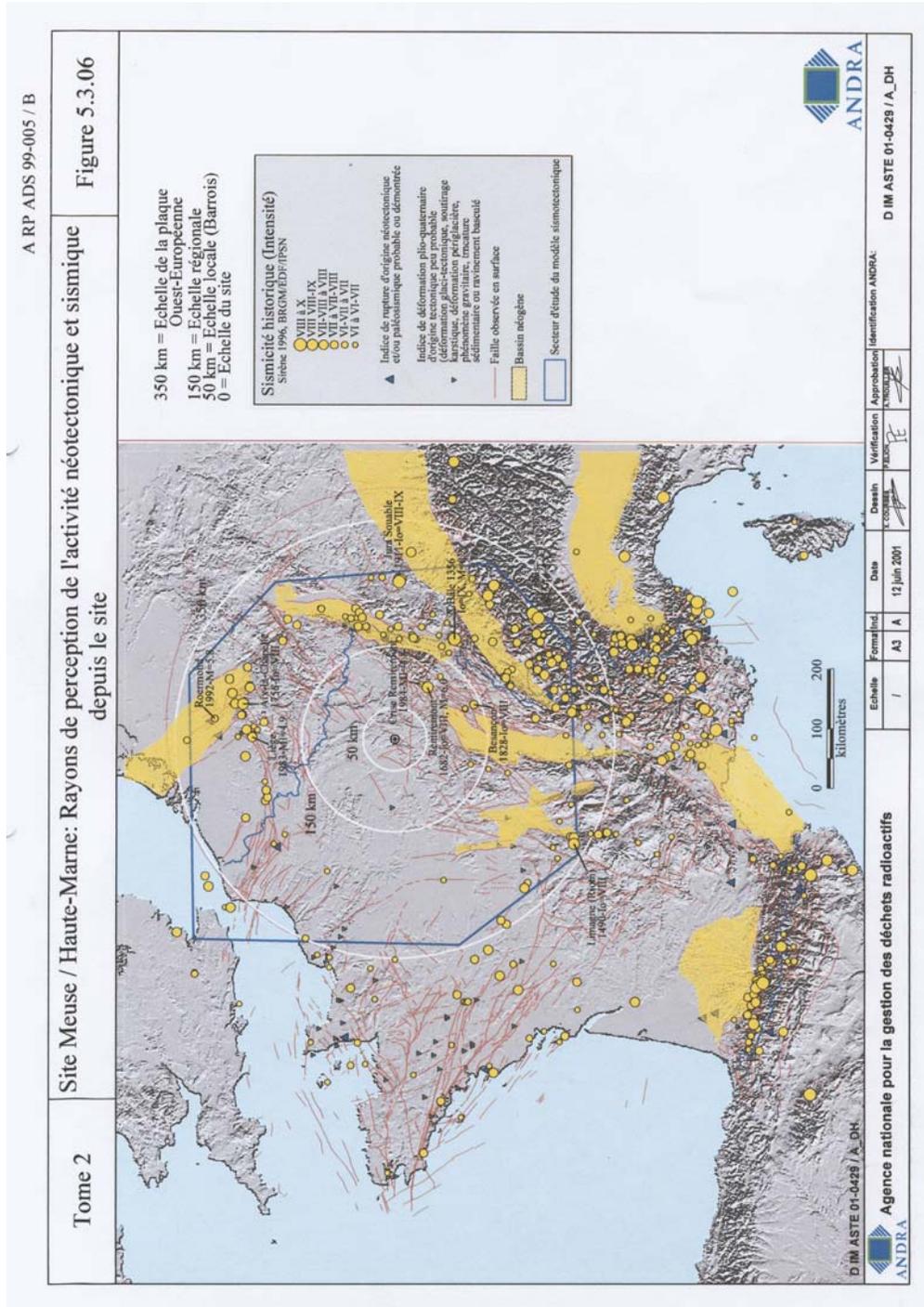
Analyse des champs gravitationnels et magnétiques

Le champ gravitationnel peut être utilisé en association avec le champ magnétique pour la modélisation numérique de l'écorce, comme entrée pour une modélisation dynamique de la répartition de la contrainte et de la fatigue. Mais aucune indication pour un tel travail n'a pu être trouvée. L'ANDRA devrait procéder à une telle analyse.

7.5 Figures

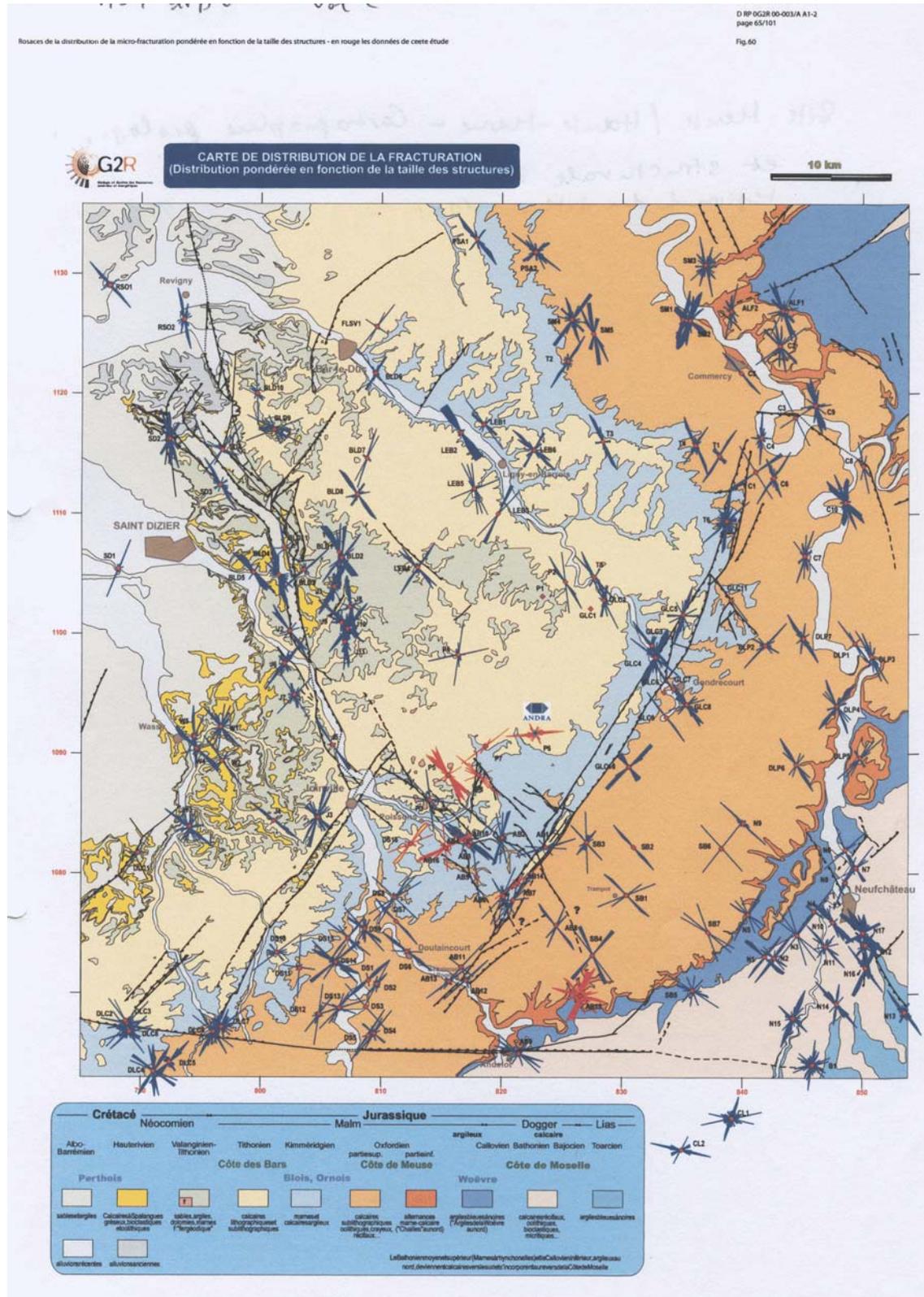
Annexe 1: Séismes historiques et enregistrés pour toute la France

Figs. 5.3-06 (ANDRA Référentiel Géologique Tome 2, 2001) Cette carte indique les epicenters des tremblements de terre situés dans la région de Bure (rayon de 200 km environ), et la sismicité historique pour toute la France et les régions voisines..



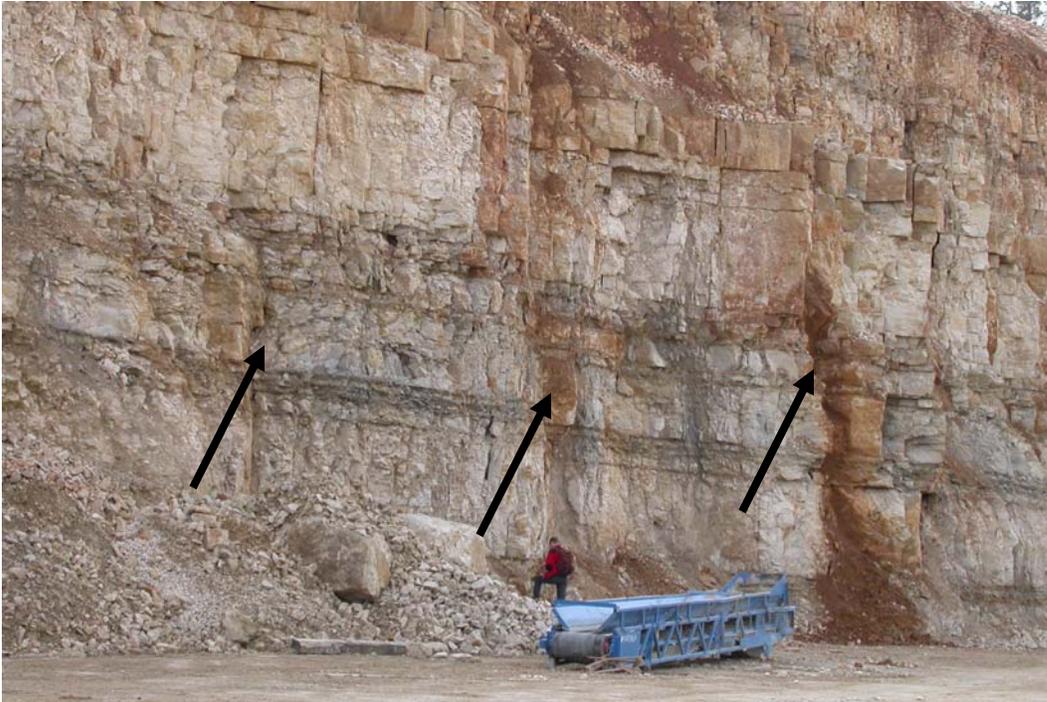
Annexe 2: Carte de contraintes de l'Est de la France

Carte de distribution de la fracturation (ANDRA, Cartographie 2001, Fig. 60).



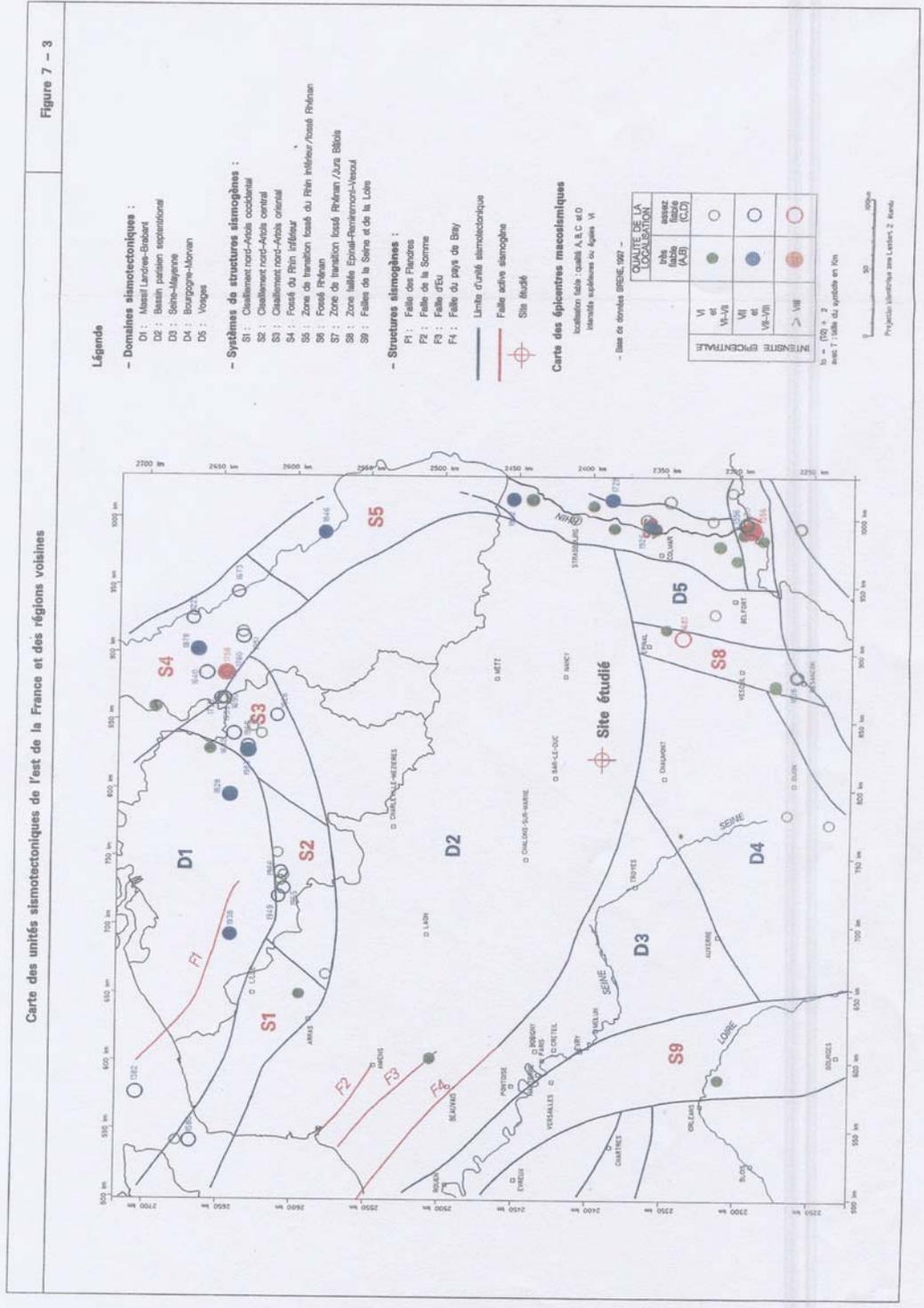
Appandage 3: Diaclases verticales causées le champs de contrainte locale

Photos prises le 18 mars 2004 dans une carrière et au bord d'une route près de Bure faisant apparaître des diaclases, voies de passage pour l'eau (indiquées par les fleches); les diaclases correspondent au champ de contrainte régional comme dérivées les mesures de forage (Photos prises par Gerhard Jentzsch)



Annexe 4: Carte de zonage sismique Carte des unites sismotectoniques de l'est de la France et des régions voisines (ANDRA, 1998, Fig. 7-3)

D RP 0ANT 98-044/A 67/99



Annexe 5: Séismes historiques et enregistrés autour de la région de Bure

A: Enregistrés, ML ≥ 4.0; B: Les événements historiques en gras ne sont pas pris en compte par l'ANDRA (voir la remarque plus bas)

A: Circle Center Point Latitude: 48.485N Longitude: 5.355E
 Radius: 200.000 km,
 Catalog Used: PDE
 Magnitude Range: 4.0 - 9.9
 Circle Search Earthquakes= 22
 Data Selection: Historical & Preliminary Data

CAT	YEAR	MO	DA	ORIG TIME	LAT	LONG	DEP	MAGNITUDE	DIST
									km
PDE	1973	04	20	122421	49.42	6.03	0	4.30 mb GS	114
PDE	1974	05	21	074235.70	47.69	7.69	33	4.30 MLSTU	195
PDE	1974	07	01	012638	49.42	6.03	0	4.30 mb GS	114
PDE	1980	07	15	121720.10	47.70	7.51	22	4.20 mb GS	182
PDE	1980	07	15	125444.50	48.04	7.46	10	4.10 MLGRF	163
PDE	1980	07	22	224622.50	47.87	7.67	10	4.20 MLGRF	185
PDE	1984	12	22	021817.61	48.13	6.46	22	4.10 MLLDG	91
PDE	1984	12	24	164451.30	48.11	6.46	18	4.10 MLLDG	91
PDE	1984	12	29	110234.67	48.10	6.49	22	5.00 MLGRF	94
PDE	1984	12	29	140157.84	47.89	6.47	10	4.30 MLFUR	106
PDE	1984	12	29	140205.03	47.96	6.46	21	4.00 MLKBA	100
PDE	1984	12	29	145412.79	48.13	6.47	21	4.20 MLLDG	91
PDE	1984	12	31	232652.41	48.08	6.46	22	4.10 MLLDG	93
PDE	1985	01	02	183925.68	48.08	6.48	19	4.00 MLLDG	94
PDE	1985	02	28	213259.82	47.66	7.30	10	4.10 MLVKA	171
PDE	1987	12	11	022558.46	47.33	7.02	21	4.00 MLGRF	178
PDE	1997	11	17	170921.58	47.61	7.53	33	4.00 MLGRF	189
PDE	1999	09	11	011257.50	49.48	6.69	2	4.00 MLLDG	147
PDE	2000	06	14	022518.40	49.29	6.40	10	4.00 MLFUR	117
PDE	2001	06	21	195549	49.15	6.87	1	4.20 MLLDG	133
PDE	2003	02	22	204103.42	48.34	6.57	10	5.70 MLGRF	91
PDE-W	2004	02	23	173121.10	47.27	6.27	17	5.50 MLLDG	151

B: Circle Center Point Latitude: 48.485N Longitude: 5.355E
 Radius: 200.000 km
 Catalog Used: NOAA
 Circle Search Earthquakes= 4
 Data Selection: Significant Earthquakes World Wide (NOAA)

CAT	YEAR	MO	DA	ORIG TIME	LAT	LONG	DEP	MAGNITUDE	DIST
									km
NOAA	1003				47.00	6.00			172
NOAA	1391	03	23		47.40	7.20			183
NOAA	1610	11	29		47.50	7.50			193
NOAA	1682	05	12		48.00	6.50			100

Leydecker, 1997, near Saarlouis:

1691 02 19 07 49.25 6.50 Io = 6.0 137
(est.)

Remark: We found only Tableau 8.1 in (ANDRA, 1998, p.79) D RP 0 ANT 98-044/A 79/99 with six events. The Figures 6-1 and 6-2 in (ANDRA, 1998, p.53) D RP 0 ANT 98 044/A 53/99 and

...54/99 showing epicentre distribution in Eastern France cannot be compared to the table because the data used are not given as a separate table. Therefore, it is not possible to evaluate these figures except for the marked events in the tables above. The same holds true for the data used for Figures 5.3.06 and 5.3-03 in (ANDRA Référentiel Géologique Tome 2, 2001) A RP ADS 99-005 / B

7.5 References

Ahorner, 1989	Ahorner, L., 1989. Seismologisches Gutachten Gorleben. Report for the Physical-Technical Federal Agency, Braunschweig (Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig)
AkEnd, 2002	AKEnd: Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte des BMU, 2002. Auswahlverfahren für Endlagerstandorte – Empfehlungen des AKEnd. Abschlussbericht, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Referat RS III 4 (A), 260 S. (Working group Siting Criteria of the Federal Ministry of the Environment)
ANDRA Cartographie, 2001	ANDRA, 2001. Site Meuse / Haute-Marne : – Cartographie géologique et structurale de l'environnement régional du site. Volume 1. Texte. Volume 2. Figures et planches hors texte. Volum 3. Fiches de sites micro tectoniques, Identification: A RP 0G2R 00-003. Date d'origine : Avril 2001. Vol. 2. 100 p.
ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.A	ANDRA, 2001. The Dossier 2001 Argile: Progress report on feasibility studies & research into deep geological disposal of high-level, long-lived waste, Synthesis report [Part A]. December 2001 163 p. Sur internet : http://www.andra.fr/IMG/pdf/DOSSIER_2001_E.pdf . Pour la version française: Dossier 2001 Argile sur l'avancement des études & recherches relatives à la faisabilité d'un stockage de déchets à haute activité et à vie longue en formation géologique profonde - Rapport de synthèse. [Partie A]. Sur internet à http://www.andra.fr/IMG/pdf/DOSSIER_2001.pdf
ANDRA Ovalisation, 1997	ANDRA, 1997. Expertise relative à l'ovalisation de forages de la zone d'étude de l'est de la France. Identification: B RP 0ANT 96.128. Date d'origine. Juillet 1997. Rév. B: 07/1997.
ANDRA Référentiel Géologique Tome 2, 2001	ANDRA, 2001. Le Référentiel Géologique du site Meuse/Haute-Marne, Tome 2. 230 p. Référentiel Géologique Tome 2 (2001) Référentiel Géologique du site de Meuse/Haute-Marne, Tome 2, La connaissance à l'échelle régionale. Identification: A RP ADS 99-005/B, Date d'origine. Janvier 1999. Rév. B: 25/07/2001.
ANDRA, 1998	ANDRA, 1998. Site est – Actualisation de l'analyse sismotectonique, zonage de l'alea sismique regional sur le site de l'est de la France. Identification: D RP 0ANT 98-044, Date d'origine : Décembre 1998.100 p.
Camelbeek & Meghraoui, 1996	Camelbeek, T., and M. Meghraoui, 1996. Large earthquakes in northern Europe more likely than once thought. Eos Trans. Am. Geophys. Un. 77, No. 42, 405 - 409, October 15, 1996.
Camelbeek & Meghraoui, 1998	Camelbeek, T., and M. Meghraoui, 1998. Geological and geophysical evidence for large paleo-earthquakes with surface faulting in the Roer Graben (northwest Europe). Geophys. J. Int. 132, 347 - 362.
Décret n° 92-1391	Décret n° 92-1391 du 30 décembre 1992 relatif à l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs. (JO du 31 décembre 1992). NOR : INDE9200932D. On the Web at http://aida.ineris.fr/textes/decrets/text0655 . Decree 92-1391, 1992. Task of ANDRA
Décret n° 93-940	Décret n° 93-940 du 16 juillet 1993 portant application de la loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 sur la gestion des déchets radioactifs et relatif à l'autorisation d'installation

	et d'exploitation d'un laboratoire souterrain. (JO du 23 juillet 1993). Texte modifié par :Décret n° 2003-1264 du 23 décembre 2003 (JO du 28 décembre 2003). NOR : INDE9300545D. On the Web at http://aida.ineris.fr/textes/decrets/text0656 .
Fäh et al., 1997	Fäh, D., Rüttener, E., Noack, T., Kruspan, P. (1997). Microzonation of the city of Basel. Journal of Seismology, 1, 87-102.
Godefroy et al. 1990	Godefroy, P., J. Lambert, A. Levret, P. Vaskou, 1990. The French macroseismic data base « SIRENE. » Proc. Of the XXIIInd General Assembly of the European Seismological Commission, Barcelona (Spain), 17-22 sept. 1990, p. 377-382. As cited in ANDRA, 1998 and ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.A.
Godefroy et al. 1993	Godefroy, P., J.L. Blès, P. Combes, M. Cushing, J.Y. Dubiè, T. Granier, B. Grellet, and P. Vaskou, 1993. Seismogenic zones delineation: recent results in France. United States – France workshop on assessing earthquake hazards in the Central and Eastern United States and Western Europe, Memphis, Tennessee, May 5-6, p 103 – 120. As cited in ANDRA, 1998 and ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.A.
Jentzsch, 2001	Jentzsch, G., 2001. Vulkanische Gefährdung in Deutschland. Entwicklung eines Kriteriums zum Ausschluss von Gebieten für die weitere Untersuchung hinsichtlich der Eignung als Standort eines Endlagers für radioaktive Abfälle. Zuarbeit zum Bericht des AKEnd des BMU, 2002, 48 S. (Volcanic hazard in Germany. Development of criteria for the exclusion of areas from further evaluation regarding the suitability of a site as a repository of nuclear waste. Contribution to the report of AKEnd, 2002)
Jentzsch, 2002	Jentzsch, G., 2002. Temperaturempfindlichkeit der Gesteine. Zuarbeit zum Bericht des AKEnd des BMU, 2002, 28 S. (Temperature sensitivity of rocks. Contribution to the report of AKEnd, 2002)
KTA, 1990	Kerntechnischer Ausschuss (KTA, Hrsg), 1990. Sicherheitsregel KTA 2201, Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen, Teil 1: Grundsätze, Fassung 6/1990.
Lenotre et al. 1994	Lenotre, N., R. Blanchin, M. Delfau, and P. Thiery, 1994. Carte isocine de la France: comparaison des nivellements de 1 ^{er} et de 2 ^{ème} ordre. Rapport ANDRA n° 6A0 RP ANT 94-006. As cited in ANDRA, 1998.
Leydecker, 1997	Leydecker, G., 1997. Earthquake Catalog for the Federal Republic of Germany and adjacent areas for the years 800 - 1993. Computer file, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
Loi N° 91-1381	Loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs (1) NOR : INDX9100071L On the Web at http://www.clis-bure.com/cadres/c_references.html .
Raynal, 1996	Raynal, M., 1996. Status of research on geological disposal for high level radioactive waste in France. In: P.A. Witherspoon (Ed.), Geological Problems in Radioactive Waste Isolation: The Second World Wide Review. LBNL-38915. UC-814. Berkeley, CA: Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, September 1996. pages 95-104. Proc. Workshop during the 28th International Geological Congress, Washington, D.C.
Règle N° III.2.f	Règle N° III.2.f (10 juin 1991) Règles fondamentales de sûreté relatives aux installations nucléaires de base autres que réacteurs. Tome III: production, contrôle et traitement des effluents et déchets. Chapitre 2: Déchets solides.

Annexe 1

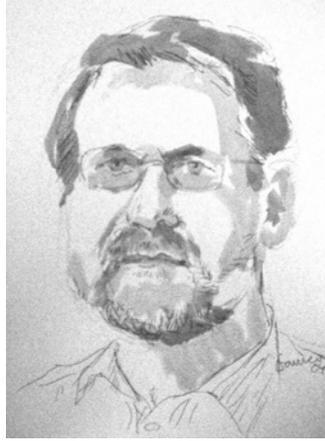
Curriculum Vitae des membres de l'équipe IEER et un relecteur présent à l'IEER 29-30
novembre 2004

Portraits par l'artiste attitré de l'équipe, George Danko

Dr. DETLEF APPEL



Dr. GERHARD JENTZSCH



Dr. HORST LETZ

Dr. MIKE THORNE



ANNIE MAKHIJANI



Dr. ARJUN MAKHIJANI

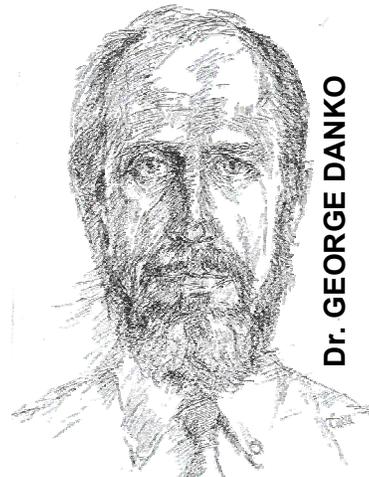


Dr. JAAK DAEMEN

Dr. ROD EWING



Dr. YURI DUBLYANSKY



Dr. GEORGE DANKO

Curriculum Vita of Arjun Makhijani

Education:

Ph.D. University of California, Berkeley, 1972, from the Department of Electrical Engineering. Area of specialization: plasma physics as applied to controlled nuclear fusion. Dissertation topic: multiple mirror confinement of plasmas.
M.S. (Electrical Engineering) Washington State University, Pullman, Washington, 1967. Thesis topic: electromagnetic wave propagation in the ionosphere.
Bachelor of Engineering (Electrical), University of Bombay, Bombay, India, 1965.

Current Employment:

1987-present: President and Senior Engineer, Institute for Energy and Environmental Research, Takoma Park, Maryland. (part-time in 1987).
February 3, 2004-present, Associate, SC&A, Inc., one of the principal investigators in the audit of the reconstruction of worker radiation doses under the Energy Employees Occupational Illness Compensation Program Act under contract to the Centers for Disease Control and Prevention, U.S. Department of Health and Human Services.

Professional Societies:

Institute of Electrical and Electronics Engineers and its Power Engineering Society
American Physical Society
Health Physics Society
American Association for the Advancement of Science

Official positions

Subcommittee on carbon-14 emissions from Yucca Mountain of the Radiation Advisory Committee, U.S. Environmental Protection Agency, 1992-1993
Radiation Advisory Committee, U.S. Environmental Protection Agency, 1992-1994
Technical Advisory Panel, Hanford high level waste tanks, early 1990s (ex-officio)
Consultant to the Office of Technology Assessment of the U.S. Congress

Consulting Experience, 1975-1987

Consultant on a wide variety of issues to various organizations including:

Tennessee Valley Authority
Lower Colorado River Authority
Federation of Rocky Mountain States
Environmental Policy Institute
Lawrence Berkeley Laboratory
Food and Agriculture Organization of the United Nations
International Labour Office of the United Nations
United Nations Environment Programme
United Nations Center on Transnational Corporations

The Ford Foundation
Economic and Social Commission for Asia and the Pacific
United Nations Development Programme

Some publications relevant to nuclear waste and radioprotection

Makhijani, A., K.M. Tucker, with Appendix by D. White, *Heat, High Water, and Rock Instability at Hanford*, Health and Energy Institute, Washington, D.C., 1985.

Makhijani, A., R. Alvarez, and B. Blackwelder, *Deadly Crop in the Tank Farm: An Assessment of Management of High-Level Radioactive Wastes in the Savannah River Plant Tank Farm*, Environmental Policy Institute, Washington, D.C., 1986.

Makhijani, A., *Release Estimates of Radioactive and Non-Radioactive Materials to the Environment by the Feed Materials Production Center, 1951-85*, Institute for Energy and Environmental Research, Takoma Park, 1988.

Makhijani, A., and B. Franke, *Addendum to Release Estimates of Radioactive and Non-Radioactive Materials to the Environment by the Feed Materials Production Center, 1951-85*, Institute for Energy and Environmental Research, Takoma Park, 1989.

Makhijani, A. and S. Saleska, *High Level Dollars Low-Level Sense: A Critique of Present Policy for the Management of Long-Lived Radioactive Waste and Discussion of an Alternative Approach*, Apex Press, New York, 1992.

Makhijani, A. and Annie Makhijani, *Fissile Materials in a Glass, Darkly: Technical and Policy Aspects of the Disposition of Plutonium and Highly Enriched Uranium*, IEER Press, Takoma Park, 1995.

Makhijani, A., H. Hu, K. Yih, eds., *Nuclear Wastelands: A Global Guide to Nuclear Weapons Production and the Health and Environmental Effects*, MIT Press, Cambridge, MA, 1995.

Fioravanti, M. and A. Makhijani, *Containing the Cold War Mess: Restructuring the Environmental Management of the U.S. Nuclear Weapons Complex*, Institute for Energy and Environmental Research, Takoma Park, October 1997.

Makhijani, A., Bernd Franke, and Hisham Zerriffi, *Preliminary Partial Dose Estimates from the Processing of Nuclear Materials at Three Plants during the 1940s and 1950s*, Institute for Energy and Environmental Research, Takoma Park, September 2000. (Prepared under contract to the newspaper *USA Today*.)

Makhijani, A. and Bernd Franke, *Final Report of the Institute for Energy and Environmental Research on the Second Clean Air Act Audit of Los Alamos National Laboratory by the Independent Technical Audit Team*, Institute for Energy and Environmental Research, Takoma Park, December 13, 2000.

Makhijani, Arjun, Hisham Zerriffi, and Annie Makhijani, "Magical Thinking: Another Go at Transmutation," *Bulletin of the Atomic Scientists*, March/April 2001.

Makhijani, A. and Michele Boyd, *Poison in the Vadose Zone: An examination of the threats to the Snake River Plain aquifer from the Idaho National Engineering and*

Environmental Laboratory Institute for Energy and Environmental Research, Takoma Park, October 2001.

Makhijani, A. and Sriram Gopal, *Setting Cleanup Standards to Protect Future Generations: The Scientific Basis of Subsistence Farmer Scenario and Its Application to the Estimation of Radionuclide Soil Action Levels (RSALs) for Rocky Flats*, Institute for Energy and Environmental Research, Takoma Park, December 2001.

Makhijani, A. and Michele Boyd, *Nuclear Dumps by the Riverside: Threats to the Savannah River from Radioactive Contamination at the Savannah River Site*, Institute for Energy and Environmental Research, Takoma Park, Maryland, forthcoming, March 2004.

Annie Makhijani

Education:

M.S. (Chemistry, with emphasis on Physical Chemistry) University of Maryland, College Park, Maryland, 1994. Research topic: the physical properties of nanostructures.

Bachelor of Science (Chemistry) University of Maryland, College Park, 1985.

Studied Hindi at the Institut des Langues Orientales in Paris (1980).

Bachelor of Arts (Psychology) Université de Tours, France (1972)

Employment:

- 1994-present: Project Scientist, Institute for Energy and Environmental Research, Takoma Park, Maryland.
- Staff Scientist, Institute for Energy and Environmental Research, Takoma Park, Maryland.
- Consultant for the White House Council on Environmental Quality (1979).
- French teacher, Alliance Française, Bombay, India (1977-1979)

Publications:

- Makhijani, Arjun and Annie Makhijani, *Fissile Materials in a Glass Darkly: Technical and Policy Aspects of the Disposition of Plutonium and Highly Enriched Uranium*, IEER Press, Takoma Park, 1995.
- Hisham Zerriffi and Annie Makhijani, *An Assessment of Transmutation as a Nuclear Waste Management Strategy*, Institute for Energy and Environmental Research, Takoma Park, 2000.

Some accomplishments

- Did research on the management of depleted uranium for the proposed Claiborne uranium enrichment plant in Louisiana (1996).
- Did research on the decommissioning of the Sequoyah uranium conversion plant in Oklahoma.
- Was responsible for some of the background research for the Institute for Energy and Environmental Research technical report: *Radiation Exposures in the Vicinity of the Uranium Facility in Apollo, Pennsylvania* (1998).

RESUME

JAAK J.K. DAEMEN

Education: Ph.D. Geo_Engineering, University of Minnesota, June 1975
Mining Engineer (Honors), University of Leuven, Belgium, July 1967

Registration: State of Arizona: Registered P.E. Civil Engineering (AZ 12158) and
Mining Engineering (AZ 12980)

Professional:

American Institute of Mining Engineers, American Society of Civil Engineers,
International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, American Society
for Engineering Education, International Society for Rock Mechanics, Royal Flemish
Engineering Association, Royal Belgian Society of Engineers and Industrialists,
American Geophysical Union, American Rock Mechanics Association.

Past Member, National Tunneling Committee, U.S. National Rock Mechanics Committee
and Committee on Geological and Geotechnical Engineering of the National Research
Council of the National Academy of Sciences; Reviewer for National Science
Foundation, Geotechnical Engineering Program; U.S. Geological Survey; Mining
Engineering, Society of Mining Engineers of AIME; International Journal of Rock
Mechanics and Mining Sciences; Water Resources Research; Canadian Geotechnical
Journal

Employment Record:

October 2001 - Present Professor, Mining Engineering, Mackay School of Mines,
University of Nevada, Reno.

July 1990 - Sept.2001 Professor and Chair, Mining Engineering, Mackay School of
Mines, University of Nevada, Reno.

September 1976 _ June 1990 Assistant and Associate Professor, University of Arizona,
Department of Mining and Geological Engineering.

Summer 1980, 1981 Visiting Associate Research Engineer, Research Associate,
University of California, Berkeley.

Summer 1977 Occidental Research Corporation. Investigations of roof control
problems, Island Creek Coal Company.

April 1975 - September 1976 Research Engineer, E. I du Pont de Nemours & Co.,
Potomac

River Development Laboratory, Martinsburg, West Virginia 2504.

Sept. 1967 - March 1975 Research Assistant, Teaching Assistant, Teaching Associate,
Research Fellow and Post_Doctoral Research Associate, Univ. of Minn, Minneapolis,
Department of Civil & Mineral Engineering.

Sponsored Research:

Mechanics of Fully Grouted Bolts in Bedded Mine Rock (United Engineering Foundation); Rock Mass Sealing (U.S. Nuclear Regulatory Commission); Numerical Analysis of the influence of Bench Stiffness on Rock Fragmentation in Surface Blasting (AZ MMRRRI); Ground and Air Vibrations Induced by Large Surface Blasts (Office of Surface Mining; U.S. Bureau of Mines); Mechanical Characterization of Welded Tuff (Center of Nuclear Waste Regulatory Analyses); Permeability-Strain Measurements in Rock Salt (Sandia National Laboratories); Sealing Studies for WIPP (SNL); Sealing Studies for Yucca Mountain, (SNL), Rock Movement Induced by Blasting (Placer Dome); Long Term Drift Stability (DOE).

Courses Taught:

University of Arizona: Rock Excavation Practice; Tunneling and Underground Construction; Surface Mining; Coal Mining; Geomechanics; Applied Geomechanics: Underground Construction; Advanced Geomechanics; Design of Underground Structures; Rock Fracture and Flow; Subsidence Engineering; Rock Dynamics: Drilling, Blasting; Key Block Theory; Boundary Element Analysis.
University of Nevada, Reno: MINE 210 Mining Methods; MINE 301 Coal Mining; MINE 380 Quarry Engineering; MINE 445 Rock Excavation; MINE 448 Rock Mechanics; MINE 658 Rock Mechanics for Underground Mining and Construction.

Consulting: Morrison_Knudsen, Inc.; Sandia National Laboratories; Anaconda Minerals Company; Golder Associates; E.I. du Pont de Nemours & Co.; Fluor Mining & Metals; Cia Minera Las Cuevas, San Luis Potosi; Engineers International, Inc.; Itasca Consulting Group, Inc.; Nuclear Waste Management Consultants, Inc.; GRC Consultants, Inc; Hargis and Associates, Inc.; Southwest Research Institute; Asarco Mining Co., Inc.; Getchell Gold , Inc.; Petroplug, Inc.; U.S. DOE, J.S. Redpath.

CURRICULUM VITAE OF DR. GEORGE DANKO

EDUCATION:

- Ph.D. (Candidacy Degree in Technical Sciences), 1985, Hungarian Academy of Sciences. Thesis: Measurement and Model-building for the Convective Heat Transfer Examinations.
- Dr. Tech. (Doctor's Degree in Fluid Dynamics), 1976, Department of Fluid Dynamics, University of Technology, Budapest. Thesis: Matrix Analysis of Hydraulic Transients in Pipeline Flow.
- M.S. Applied Math, 1975, Eotvos University of Sciences, Budapest
- M.S. Mechanical Engineering, 1968, University of Technology, Budapest

EMPLOYMENT HISTORY:

- 7/95-present Professor, Mining Engineering Department, Mackay School of Mines, University of Nevada, Reno.
- 8/90-6/95 Associate Professor, Mining Engineering Department, Mackay School of Mines, University of Nevada, Reno.
- 09/87-8/90 Lecturer in Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Nevada, Reno.
- 11/86-8/90 Research Associate, Mining Engineering Department, Mackay School of Mines, University of Nevada, Reno.
- 1/79-11/86 Associate Professor, Institute of Thermal Energy and Systems Engineering, University of Technology, Budapest.
- 8/78-1/79 Visiting Postdoctoral Associate, Department of Mechanical Engineering, University of Minnesota.
- 9/75-8/78 Fellow of Hungarian Academy of Sciences.
- 8/68-9/75 Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Technology, Budapest.

Selected recent publications relevant to nuclear waste disposal:

- Danko, G., (1999), "In Situ REKA Probe Measurements at Yucca Mountain," Proceedings, International Bureau of Mining Thermophysics, St. Petersburg, pp 1-12.
- Danko, G., (2000), "Coupled Convection-Diffusion Modeling with MULTIFLUX," Proceedings of the International Symposium on Hydrogeology and the Environment, Wuhan, China, pp 26-31.
- G. Danko, D. Bahrami, (2001), "Ventilation Analysis of a Cold Conceptual Repository using MULTIFLUX with NUFT," Proceedings, 9th International high-Level Radioactive Waste Management Conference, April 29th-May 3rd.
- G. Danko, D. Bahrami, and A. Adu-Acheampong, (2001), "In Situ Thermophysical Properties Measurements Under Hydrothermal Disturbances at DST," Proceedings, 9th International high-Level Radioactive Waste Management Conference, April 29th-May 3rd.

- G. Danko and D. Bahrami, (2002), "The Application of CFD to Ventilation Calculations at Yucca Mountain", Proceedings, WM 02' Conference, February 24-28, 2002, Tucson, AZ, Session 39B, Paper 12, Abs. 243, pp. 1-11.
- Danko, G., Shah, N., and Bahrami, D., (2002). "Evaluation of Lithophysal Conductivity, Diffusivity, and Porosity Measurements using the REKA Method," Proceedings, WM' 02 Conference, February 24-28, Tucson, AZ. pp. 1-13.
- Danko, G., Jain, A., (2002). "Parameter Identification of a Numerical Transport Code," Proceedings, WM' 02 Conference, February 24-28, Tucson, AZ. pp.1-7.
- Danko, G., and Bahrami, D., (2003). " Sensitivity Analysis of Ventilation Parameters and Site Input Properties," Proceedings, 10th Int. High-Level Radioactive Waste Management Conference, pp.1-8.
- Danko, G., and Bahrami, D., (2003). "Natural Ventilation of a Deep Geologic Nuclear Waste Storage Facility," Proceedings, 10th Int. High-Level Radioactive Waste Management Conference, pp.1-8.
- Danko, G., Shah, N., and Bahrami, D., (2003). "Monte Carlo Analysis of In Situ Lithophysal Properties Identification," Proceedings, 10th Int. High-Level Radioactive Waste Management Conference, pp.1-10.
- Danko, G., Shah, N., and Bahrami, D., (2003). "In Situ Thermophysical Properties Variation at DST, Yucca Mountain," Proceedings, 10th Int. High-Level Radioactive Waste Management Conference, pp.1-8.
- Danko, G., Bahrami, D., Leister, P., and Croise, J., (2003). "Temperature and Humidity Control for Underground Spent Fuel Storage," Proceedings, 10th Int. High-Level Radioactive Waste Management Conference, pp.1-8.

RODNEY C. EWING

Rod Ewing is a professor in the Department of Nuclear Engineering and Radiological Sciences at the University of Michigan, responsible for the program in radiation effects and nuclear waste management. He also holds appointments in Geological Sciences and Materials Science & Engineering and is an Emeritus Regents' Professor at the University of New Mexico in the Department of Earth and Planetary Sciences, where he was a member of the faculty from 1974 to 1997 and chair of the department from 1979 to 1984. He is also an *Adjungeret Professor* at the University of Aarhus in Denmark.

Ewing received a B.S. degree in geology from Texas Christian University (1968, summa cum laude) and M.S. (1972) and Ph.D. (1974, with distinction) degrees in mineralogy from Stanford University where he held an NSF Fellowship. His graduate studies focused on an esoteric group of minerals, metamict Nb-Ta-Ti oxides that are unusual because they have become amorphous due to radiation damage caused by the presence of radioactive elements (U and Th) and radionuclides in their decay series. This radiation-induced phase transformation from a crystalline to amorphous (periodic-to-aperiodic) structure can have significant effects on the properties of materials, such as the decreased durability of radioactive waste forms. Over the past twenty years, the early study of these unusual minerals has blossomed into a broadly based research program on radiation effects in complex ceramic materials. Such studies have led to the development of techniques to predict and confirm the very long-term behavior of materials, such as those used in radioactive waste disposal. The key to such studies has been the use of natural phases of great age in designing highly durable nuclear waste forms. Present research includes: radiation effects caused by heavy-particle interactions with crystalline materials (e.g., ion-beam modification of ceramics and minerals); the structure and crystal chemistry of complex Nb-Ta-Ti oxides; the crystal chemistry of actinide and fission product elements, the application of "natural analogues" to the evaluation of the long-term durability of radioactive waste forms and the release and transport of radionuclides; the low-temperature corrosion of silicate glasses; the neutronics and geochemistry of the natural nuclear reactors in Gabon, Africa. The research has utilized a wide variety of solid-state characterization techniques, such as x-ray diffraction, x-ray absorption spectroscopy and high-resolution electron microscopy. The work of the research group has been supported not only by U.S. funding agencies but also from sources abroad (Sweden, Germany, Australia and Japan, as well as by the European Union and NATO). Ewing is the author or co-author of approximately 400 research publications and the editor or co-editor of seven monographs, proceedings volumes or special issues of journals. He was recently granted a patent for the development of a highly durable material for the immobilization of excess weapons plutonium. He received a Guggenheim Fellowship in 2002.

Ewing is a fellow of the Geological Society of America and the Mineralogical Society of America and has served the Materials Research Society as a Councilor (1983-1985; 1987-1989) and Secretary (1985-1986). He was president of the Mineralogical Society of America (2002) International Union of Materials Research Societies (1997-1998) and the New Mexico Geological Society (1981). He was a member of the Board of Directors of the Caswell Silver Foundation (1980-1984) and Energy, Exploration,

Education, Inc. (1979-1984). He has served as a guest scientist or faculty member at Battelle Pacific Northwest Laboratories, Oak Ridge National Laboratory, the Hahn-Meitner-Institut in Berlin, the Department of Nuclear Engineering in the Technion University at Haifa, the Centre D'Etudes Nucléaires de Fontenay-Aux-Roses, Commissariat A L'Énergie Atomique in France, Charles University in Prague, the Japan Atomic Energy Research Institute, the Institut für Nukleare Entsorgungstechnik of the Kernforschungszentrum Karlsruhe, Aarhus University in Denmark, Mineralogical Institute of Tokyo University and the Khlopin Radium Institute in St. Petersburg, Russia.

The involvement in issues related to nuclear waste disposal has proceeded in parallel with the basic research program most notably in association with the activities of the Materials Research Society where he has been a member of the program committee and the editor or associate editor for the proceedings volumes for the symposia on the "Scientific Basis for Nuclear Waste Management" held in Berlin-82, Boston-84, Stockholm-85, Berlin-88, Strasbourg-91, Kyoto-1994, Boston-1998 and Sydney-2000. He is co-editor of and a contributing author of *Radioactive Waste Forms for the Future* (published by North-Holland Physics, Amsterdam, 1988). Professor Ewing has served on National Research Council committees for the National Academy of Sciences that have reviewed the Waste Isolation Pilot Plant in New Mexico (1984 to 1996), the Remediation of Buried and Tank Wastes at Hanford, Washington and INEEL, Idaho (1992 to 1995), and the INEEL High-Level Waste Alternative Treatments (1998-1999), as well as a subcommittee on WIPP for the Environmental Protection Agency's National Advisory Council on Environmental Policy and Technology (1992 to 1998). He has served as an invited expert to the Advisory Committee on Nuclear Waste of the Nuclear Regulatory Commission and a consultant to the Nuclear Waste Technology Review Board. He is presently a member of the Board of Radioactive Waste Management of the National Research Council.

Dr. Detlef Appel

Professional background

Born 1943

1965-1971

study of geology at the University of Hannover, Lower Saxony, Germany, and the University of Vienna, Austria - diploma thesis on tectonical aspects of the Asse salt-structure in Lower Saxony (test site for radioactive waste disposal in West-Germany).

1971-1983

scientific employee: Institute of Geology and Paleontology of the University of Hannover - doctoral thesis on sedimentological questions of Upper Triassic sandstone formation in Lower Saxony.

Since 1983

freelancing consultant

Numerous expert opinions / publications in applied (hydro)geology and methodology (mostly in cooperation with other authors):

- selection, assessment and licensing of sites for final disposal of "conventional" and radioactive waste,
- risk assessment of (abandoned industrial) contaminated sites,
- site-specific and conceptual groundwater and soil protection in environmental impact assessment, water and soil management and planning,

Main clients: state authorities, regional/local water and environmental authorities, environmental NGOs (Greenpeace) and local environmental organizations.

Advisory activity

for German federal and state governments, environmental NGOs and local citizen action groups:

- Advisory Board on "Questions of Nuclear Power Phase-Out" of the Lower Saxony Ministry of the Environment (1992-1998),
- Committee on Site Selection Procedure of the Federal Ministry of the Environment, Nature Protection and Reactor-Safety (1999-2002),
- Working Group Fuel and Waste Management of the German Commission on Reactor-Safety,
- Radiation Protection Commission of BUND - Friends of the Earth,
- Scientific Advisory Board of the Konrad Mine Working Group.

International activities and cooperation

- Swiss Expert Group on Disposal Concepts for Radioactive Waste,
- Cantonal Working Group Wellenberg (Advisory Board of the Canton Nidwalden on safety aspects of the formerly planned LWA/MAW repository, Switzerland; until September 2002),

- Forum on Stakeholder Confidence (OECD/NEA),
- EC-Project COWAM (Community Waste Management),

Membership of scientific / professional associations

- German Geological Society,
- Society of Environmental Geosciences,
- Engineering-Technical Association on Contaminated Sites,
- Professional Society of German Geoscientists.

YURI V. DUBLYANSKY

EDUCATION University of Perm, Russia: PhD (Candidate of Sciences) in Geosciences, 1987
University of Odessa, Ukraine: M.S. in Geological Engineering and Hydrogeology, 1982

WORK PLACE Fluid Inclusion Lab. Institute of Mineralogy and Petrography, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, since 1985 to present

POSITION Senior Scientist

WORK ADDRESS Russia, 630090, Novosibirsk, 3, Koptyuga Ave. IM&P SB RAS
Phone: +8-913-920-5263 (cel); FAX: +7-3832-332792
e-mail: kyoto_yuri@hotmail.com

SPECIALIZATION AND FIELD OF INTEREST Geological disposal of nuclear waste; low temperature hydrothermal processes; fluid inclusions, isotope geochemistry. Analysis of the scientific and regulatory issues related to the geological disposal of the high-level nuclear waste.

LANGUAGES English (fluent) and French (somewhat rusty)

PROFESSIONAL EXPERIENCE

- 2002 By request of the State of Nevada Attorney General Office, with the group of co-authors from USA, UK and Russia, writing a scientific monograph, providing independent evaluation of the suitability of the U.S. proposed site for geological disposal of the high-level nuclear waste at Yucca Mountain, Nevada. Monograph will be used by the State of Nevada as part of legal deposition in the forthcoming litigations, court hearings and licensing proceedings related to the Yucca Mountain high-level nuclear waste disposal site.
- 1999-2001 Official representative of the State of Nevada in the three-lateral (U.S. Department of Energy, State of Nevada and University of Nevada) research project on the paleo-hydrology of the proposed geological disposal site for the high-level nuclear waste at Yucca Mountain, Nevada. In this capacity testified before the presidential Nuclear Waste Technical Review Board and before the Advisory Committee on Nuclear Waste of the U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- Scientific leader and manager of the research project commissioned by the Government of the State of Nevada studying critical issues of the geological suitability of the proposed high-level nuclear waste site in Nevada.
- 1997 - 1998 Served as an expert to TACIS (a EC program), assessing geological issues of the nuclear waste disposal in the Northwest Russia. Performed critical evaluation of the concept of the nuclear waste disposal in permafrost on the Novaya Zemlia archipelago.

- 1994 - 1998 Consulting the State of Nevada's Nuclear Waste Project Office and the Attorney General Office on the issues of the geological suitability of the high-level nuclear waste repository at Yucca Mountain. Submitted 19 technical reports.
- 1993 - 1994 International Scientific Fellowship Award from NSERC, Canada, taken up at McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada. Fluid inclusion and stable isotope geochemistry research.
- 1992 - 1993 Consulting the Hungarian National Authority for Nature Conservation on fossil hydrothermal systems and caves in Budapest and the Transdanubian Range.

RECENT PROFESSIONAL PUBLICATIONS PERTINENT TO THE NUCLEAR WASTE DISPOSAL

1. Dublyansky Y.V., Smirnov, S.Z., and Pashenko S.E. 2003 Identification of the deep-seated component in paleo fluids circulated through a potential nuclear waste disposal site: Yucca Mountain, Nevada, USA. *Journal of Geochemical Exploration*, **4013**, pp. 1-5. (*In press*)
2. Dublyansky, Y., Ford, D., and Reutski, V. 2001 Traces of epigenetic hydrothermal activity at Yucca Mountain, Nevada: preliminary data on the fluid inclusion and stable isotope evidence. *Chemical Geology*. **173**, pp. 125-149.
3. Dublyansky, Y. 2001 Paleohydrogeology of Yucca Mountain by Fluid Inclusions and Stable Isotopes. Proc. Int. Con., Amer. Nucl. Soc. "High-Level Radioactive Waste Management". La Grande Park, Illinois. CD ROM
4. Dublyansky, Y., Szymanski, J., Chepizhko, A., Lapin, B., and Reutski, V. 1999 Paleohydrogeology of Yucca Mountain (Nevada, USA): Key to the Site Suitability Assessment for Planed Nuclear Waste Repository. *Geoecology*. **1**, pp. 77-87. (In Russian)
5. Dublyansky, Y., Szymanski, J., Chepizhko, A., Lapin, B. and Reutski, V. 1998 Geological History of Yucca Mountain (Nevada) and the Problem of a High-Level Nuclear Waste Repository. *Defence Nuclear Waste Disposal in Russia*. NATO Series. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands. pp. 279-292.
6. **Hill, C., Dublyansky, Y., Harmon, R., and Schluter, C. 1995 Overview of calcite/opal deposits at or near the proposed high-level nuclear waste site, Yucca Mountain, Nevada: pedogenic, hypogene, or both? *Environmental Geology*, 26(1), pp. 69-88.**

Prof. Dr. Gerhard Jentzsch

Institute for Geosciences
University of

Jena

Born in 1946 in Taucha near Leipzig, Germany

Education:

Habilitation for Geophysics, Free University of Berlin, 1985, Institute for Geophysical Sciences, Free University of Berlin.

Doctoral examination, Technical University of Clausthal, Germany, 1976, from Faculty for Geosciences, Institute for Geophysics.

Exam (Diploma) in Geophysics, 1972, same institute.

Current Employment:

1996-present: Full Professor for Applied Geophysics at the Institute for Geosciences of the University of Jena

Professional Societies:

German Geophysical Society (currently President of this society), Geologische Vereinigung, European Geophysical Union, American Geophysical Union

Employment history:

1990 - 1996: Professor for General Geophysics at the Institute for Geophysics, Technical University of Clausthal.

1987 – 1990: Professor for Applied Geophysics (Angewandte Geophysik) at the Geological Institute of the University of Bonn.

1977 – 1987: Assistant at the Institute for Geophysical Sciences, Free University of Berlin, Assistance Professor (Hochschulassistent)

1972 – 1977: scientific co-worker of Prof. Dr. O. Rosenbach, Institute for Geophysics

Consulting Experience, 1990 – present:

Seismic hazard assessment for the sites of different nuclear power plants and nuclear industry in Germany, in the form of:

- check of reports
- own calculations
- member of advisory board

1999 – 2002 Member of the German siting committee to develop a procedure for the search for a site of the German nuclear repository (appointed by the German Federal Ministry of the Environment)

1993 – 1998 Member Advisory Board for the Termination of Nuclear Energy Use (Provincial Ministry for the Environment of Lower Saxony)

Additional information:

Research Interests: deformation and seismology (Earth tides, global dynamics, seismological network in East-Thuringia, Geodynamic Observatory Moxa), seismic hazard assessment, physical volcanology

Publications: more than 40 papers during the past 5 years; 15 of them in reviewed journals

National and international activities:

Chairman of working groups (IAG), convenor of special sessions (EGS Meetings, Earthside Symposium, national meetings), reviewer for the German Research Soc. and different scientific journals

Currently: President of the German Geophysical Society

Publications relating to seismicity / deformation and nuclear waste repository:

1. Nuclear waste repositories:

AKEnd: Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte des BMU, 2000.

1. Zwischenbericht, Stand: Juni 2000. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Referat RS III 4 (A), 54 S. First intermediate report.

Bräuer, V. und G. Jentzsch, 2001. Abgrenzung von Gebieten mit offensichtlich ungünstigen geologischen Verhältnissen. Bericht an den AkEnd. Separation of areas with obvious unfavourable geological conditions.

Jentzsch, G., 2001. Vulkanische Gefährdung in Deutschland. Bericht an den AkEnd. Volcanic hazard in Germany.

AKEnd: Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte des BMU, 2001.

2. Zwischenbericht – Stand der Diskussion. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Referat RS III 4 (A), 179 S. Second intermediate report.

Appel, D., V. Bräuer, G. Jentzsch und K.-H. Lux, 2002. Geowissenschaftliche Kriterien zur Endlagerstandortsuche für radioaktive Abfälle – Ergebnisse des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte. *Z. Angew. Geol.*, 2/2002, 40 – 47. Geoscientific criteria for the seek of a repository for radioactive waste – results of the AkEnd.

AKEnd: Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte des BMU, 2002.

Auswahlverfahren für Endlagerstandorte – Empfehlungen des AkEnd. Abschlussbericht, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Referat RS III 4 (A), 260 S. Final report.

Jentzsch, G., 2002. Temperaturverträglichkeit der Gesteine - Neigung zur Ausbildung von Wasserwegsamkeiten. Bericht an den AkEnd. Temperature acceptance of rocks – tendency to open transport paths for fluids.

2. Seismology and deformation

Kracke, D., R. Heinrich, G. Jentzsch, and D. Kaiser, 2000. Seismic Hazard assessment of the East Thuringian Region / Germany – case study. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 44/4, 537 – 548.

Kracke, D., R. Heinrich, A. Hemmann, G. Jentzsch, and A. Ziegert, 2000. The East Thuringia Seismic Network. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 44/4, 594 – 601.

Hemmann, A., T. Meier, G. Jentzsch and A. Ziegert, 2000. A similarity of waveforms at stations Moxa and Plauen for the 1985/86 swarm. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 44/4, 602 – 607.

Kroner, C., T. Jahr, G. Jentzsch, W. Zürn, R. Widmer-Schniedrig, and B. Heck, 2000. BFO and Moxa: Two observatories for seismological broadband observations. *Orfeus Newsletter*, Dez. 2000, Vol. 2, No. 3.

Jahr, T., Jentzsch, G., Kroner, C., 2001. The Geodynamic observatory Moxa / Germany: Instrumentation and purposes. *Proc. 14th International Symposium on Earth Tides, Special Issue J. Geodetic Soc. of Japan*, 47/1, 34 – 39.

Ishii, H., Jentzsch, G., Graupner, S., Nakao, S., Ramatschi, M. and Weise, A., 2001. Observatory Nokogiriyama / Japan: Comparison of different tiltmeters. *Proc. 14th International Symposium on Earth Tides, Special Issue J. Geodetic Soc. of Japan*, 47/1, 155 – 160.

Jentzsch, G., Malischewsky, P., Zaddro, M., Braitenberg, C., Latynina, A., Bojarsky, E., Verbytzky, T., Tikhomirov, A. and Kurskeev, A., 2001. Relations between different geodynamic parameters and seismicity in areas of high and low seismic hazards. *Proc. 14th International Symposium on Earth Tides, Special Issue J. Geodetic Soc. of Japan*, 47/1, 82 – 87.

Gutdeutsch, R., D. Kaiser, and G. Jentzsch, 2002. Estimation of earthquake magnitudes from epicentral intensities and other focal parameters in Central and Southern Europe. *Geophys. J. Int.*, 151(3), 824 - 834.

Jentzsch, G. S. Graupner, A. Weise, H. Ishii, and S. Nakao, 2002. Environmental effects in tilt data of Nokogiriyama Observatory (extended abstract). *Bulletin d'Information Marees Terrestres*, 137, 10931 - 10936.

Jentzsch, G., M. Korn, and A. Špičák (eds.), 2003. The swarm earthquakes in the area Vogtland / NW-Bohemia: Interaction of tectonic stress and fluid migration in a magmatic environment. *Special Issue J. Geodyn.*, 35, 1 / 2, 258 p.

Jentzsch, G., M. Korn, and A. Špičák, 2003. Editorial. In: Jentzsch, G., M. Korn, and A. Špičák (eds.): The swarm earthquakes in the area Vogtland / NW-Bohemia: Interaction of tectonic stress and fluid migration in a magmatic environment. *Special Issue J. Geodyn.*, 35, 1 / 2, 1 -3.

Kurz, J., T. Jahr und G. Jentzsch, 2003. Geodynamic modelling of the recent stress and strain field in the Vogtland swarm earthquake area using the finite-element method. In: Jentzsch, G., M. Korn, and A. Špičák (eds.): The swarm earthquakes in the area Vogtland / NW-Bohemia: Interaction of tectonic stress and fluid migration in a magmatic environment. *Special Issue J. Geodyn.*, 35, 1 / 2, 247 – 258.

Hemmann, A., T. Meier, G. Jentzsch, and A. Ziegert, 2003. Similarity of waveforms and relative relocation of the earthquake swarm 1997/98 near Werdau. In: Jentzsch, G., M. Korn, and A. Špičák (eds.): The swarm earthquakes in the area Vogtland / NW-Bohemia: Interaction of tectonic stress and fluid migration in a magmatic environment. *Special Issue J. Geodyn.*, 35, 1 / 2, 191 – 208.

Curriculum Vita of Mike Thorne

Qualifications PhD FSRP

KEY SKILLS

- Radiological protection
- Assessing the radiological safety of disposal of radioactive wastes
- Distribution and transport of radionuclides in the environment
- Expert elicitation procedures
- Probabilistic safety studies
- Development of safety criteria
- Pharmacodynamics

CAREER HISTORY

2001- **Mike Thorne and Associates Limited**

Review Studies for the Proposed Australian National Radioactive Waste Repository

Client – RWE NUKEM

Reviews of reports on animal transfer factors and of the potential effects of climate change on the repository plus development of a model for the biokinetics of the ^{226}Ra decay chain in grazing animals.

Support for development of the Drigg Post-closure Radiological Safety Assessment

Client - BNFL

Support in the areas of FEP analysis, biosphere characterisation, human intrusion assessment and the effects of natural disruptive events. In addition, provision of advice of future research initiatives that should be pursued by BNFL.

Co-ordination of biosphere research and participation in BIOCLIM

Client – UK Nirex Ltd

Review of Parameter Values: Review of biosphere parameter values for use in the ANDRA assessment model AQUABIOS.

Effects of Radiation on Organisms Other Than Man

Client: Study for ANDRA to identify appropriate indicator organisms and develop appropriate dosimetry and effects models for those organisms.

Evaluation of Unusual Pathways for Radionuclide Transport from Nuclear Installations
Client – Environment Agency

Review of literature and conduct of formal elicitation meetings to determine potential pathways and evaluate their radiological significance.

Support Studies on the Drigg Post-closure Performance Assessment
Client - BNFL
Biosphere Research Co-ordination and Assessment Studies
Client - United Kingdom Nirex Ltd

Continuation of a programme of work originally undertaken at Electrowatt Engineering (UK) Ltd

Site Investigation and Risk Assessment - Hilsa Lines
Client - Portsmouth City Council
Radiological assessment of a radium-contaminated site.

PROFESSIONAL ACTIVITIES AND MEMBERSHIP

- Fellow of the Society for Radiological Protection and Immediate Past President
- Member of the Eco-ethics International Union
- Visiting Fellow at the Climatic Research Unit, University of East Anglia

SELECTION OF PUBLICATIONS

The biosphere in post-closure radiological safety assessments of solid radioactive waste disposal, M C Thorne, Interdisciplinary Science Reviews, Vol. 23, 258-268, 1998.

Modelling radionuclide distribution and transport in the environment, K M Thiessen, M C Thorne, P R Maul, G Prohl and H S Wheeler, Environmental Pollution, 100, 151-177, 1999.

Validation of a physically based catchment model for application in post-closure radiological safety assessments of deep geological repositories for solid radioactive wastes, M C Thorne, P Degnan, J Ewen and G Parkin, Journal of Radiological Protection, 20(4), 403-421, 2000.

Development of a solution method for the differential equations arising in the biosphere module of the BNFL suite of codes MONDRIAN, M M R Williams, M C Thorne, J G Thomson and A Paulley, Annals of Nuclear Energy, 29, 1019-1039, 2002.

Modelling sequential BIOSphere Systems under CLIMate change for radioactive waste disposal. Project BIOCLIM, D Texier, P Degnan, M F Loutre, D Paillard and M Thorne, Proceedings of the 10th International High-level Radioactive Waste Management Conference (IHLRWM), March 30th – April 2nd, Las Vegas, Nevada.