

RÉPONSE TECHNIQUE DE L'ANDRA AU RAPPORT DE L'IEER

Page : 1/49

Ce document, bien que propriété de l'Andra, peut être reproduit ou communiqué sans son autorisation

25/11/2011



→ Titre original du document

Commentaire sur le rapport final de l'examen critique du programme de l'Andra sur les recherches effectuées dans le laboratoire souterrain de Bure et sur la zone de transposition pour définir une ZIRA, préparé par l'IEER pour le CLIS (mars-avril 2011)

Sommaire

1. Introduction	5
2. Commentaires des conclusions générales	6
3. Position de l'Andra vis-à-vis des recommandations de l'IEER	9
3.1 Chapitre 2	9
3.2 Chapitre 3	9
3.3 Chapitre 4	10
3.4 Chapitre 5	11
3.5 Chapitre 6	12
4. Analyse par l'Andra du document de l'IEER	13
4.1 Chapitre 2 Données sismiques et caractérisation sismologique de la zone de transposition	13
4.1.1 Conclusions	13
4.1.2 Analyse détaillée du rapport	13
4.2 Chapitre 3 - Caractéristiques et propriétés de la formation hôte et des formations encaissantes dans la zone de transposition influençant le transport des contaminants dans les milieux géologiques et les performances à long terme du stockage	16
4.2.1 Conclusions	16
4.2.2 Analyse détaillée du rapport	17
4.3 Chapitre 4 - Mécanique des roches	32
4.3.1 Conclusions	32
4.3.2 Analyse détaillée du rapport	34
4.4 Chapitre 5 - Aspects thermiques	43
4.4.1 Conclusions	43
4.4.2 Analyse détaillée du rapport	44
4.5 Chapitre 6 - Comparaison avec d'autres programmes qui ont réalisé des recherches souterraines en vue de sélectionner une ZIRA	47
4.5.1 Conclusions	47
4.5.2 Analyse détaillée du rapport	48

Liste des figures

Figure 4-1	Diffusion du chlorure en fonction de la force ionique (Goutelard et al., 2005)	20
Figure 4-2	Reproduction de la figure 12-14 du Référentiel de site 2009 (Tome 1 page 399) complétée : Distribution cumulée de probabilité pour la porosité déduite de la teneur en eau à 150°C des échantillons de Callovo-Oxfordien pour trois campagnes de reconnaissance 2003 (forages 300), 2004 (forages LS) et 2007 (forages 400)	21
Figure 4-3	Reproduction de la figure 12-6 du Référentiel de site 2009 (Tome 1 page 386) : Evolution de la porosité TCMR en fonction de la teneur en argile dans 10 intervalles régulier de profondeur. Les valeurs moyennes sont calculées à partir de données acquises dans les forages EST413, EST423, EST433 et EST441. Le coefficient de corrélation de la droite de régression est de $R^2=0,77$. Les lignes pointillées indiquent les intervalles de confiance à 95% de la droite de régression	21
Figure 4-4	Reproduction de la figure 3.1-2 de C.RP.ACSS.05.0022 « Distribution des Peclats de couche des argilites du Callovo-Oxfordien ».	25
Figure 4-5	Distribution des temps caractéristiques de migration de la couche d'argilites du Callovo-Oxfordien	29
Figure 4-6	Estimation de l'extension de la zone fracturée (rapportée au rayon excavé), en fonction du module d'Young initial du remblai et d'une dégradation hypothétique de l'argilite (cohésion réduite d'un facteur F)	40

1. Introduction

Le présent document est une analyse par l'Andra du rapport préparé par l'IEER à la demande du CLIS et intitulé « Examen critique du programme de l'Andra sur les recherches effectuées dans le Laboratoire souterrain de Bure et sur la Zone de Transposition pour définir une ZIRA ». Il a été rédigé sur la base de la version du rapport IEER transmise à l'Andra par le Président du CLIS le 17/03/2011.

Sur le plan technique, l'IEER émet de manière générale une appréciation très positive sur les travaux réalisés par l'Andra notamment dans le Laboratoire souterrain en notant par exemple que « l'Andra est à l'avant-garde en ce qui concerne la recherche en laboratoire souterrain » ou que « ses efforts de recherche, à l'appui de son programme de stockage de Bure, sont remarquables et impressionnants ». Pour ce qui concerne la demande formulée par le CLIS d'une « évaluation consistant à déterminer si les travaux de recherche menés par l'ANDRA dans le Laboratoire souterrain (LS) et la zone de transposition (ZT) sont suffisamment avancés et concluants pour définir la zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (ZIRA) pour l'implantation du futur stockage », l'IEER considère que « pour réduire la zone dans laquelle localiser la ZIRA, l'Andra a utilisé à bon escient des critères géologiques pour réduire à 100 km² les 250 km² de la zone de transposition ».

Aucune des treize conclusions critiques et huit recommandations formulées par l'IEER ne mettent en cause les bases scientifiques et techniques de la définition de la ZIRA. Ces conclusions et recommandations concernent plutôt les études et travaux en cours en vue de la préparation du futur dossier technique support à la demande d'autorisation de création. L'Andra considère que la quasi-totalité des recommandations correspondent à des actions déjà prises en compte dans les travaux de l'Andra ou qui sont prévues dans la cadre de cette préparation.

C'est principalement sur deux points qu'une part importante des critiques est concentrée. Ceux-ci ne concernent pas la qualité des données ou les résultats ni la façon dont ils ont été obtenus, mais leur traitement et/ou les méthodologies employées dans les analyses que l'Agence a conduites :

- La notion d'homogénéité de la couche du Callovo-Oxfordien retenue par l'Andra qui conduirait à surestimer les performances moyennes de la couche hôte en particulier sur l'emprise de la Zira;
- L'utilisation d'analyses déterministes considérées par l'IEER insuffisamment représentatives et moins conservatives que les analyses probabilistes.

Le document est structuré en trois grands chapitres :

- commentaires de l'Andra vis-à-vis des conclusions générales données au premier chapitre du rapport de l'IEER ;
- position de l'Andra vis-à-vis des recommandations proposées par l'IEER à l'issue des différents chapitres du rapport ;
- analyse détaillée du rapport de l'IEER.

2. Commentaires des conclusions générales

1. Homogénéité et variabilité du milieu géologique

Les termes « hétérogène » ou « hétérogénéités » reviennent un grand nombre de fois dans le rapport de l'IEER. L'utilisation par l'Andra du terme « homogène » pour la couche du Callovo-Oxfordien résulte du fait qu'elle est constituée des mêmes minéraux (en proportion certes variables, mais connues et explicables par le contexte sédimentaire), qui se sont déposés dans des environnements de dépôts semblables (par rapport notamment aux encaissants) et qui permettent à la formation de montrer, sur son épaisseur et latéralement, des variations de propriétés qui restent faibles et cohérentes avec les variations des pourcentages des trois constituants et la texture de la roche.

Le rapport IEER mentionne plusieurs fois les variations dans l'Oxfordien carbonaté à l'appui d'une mise en cause de l'homogénéité de la couche dans la ZIRA. En particulier, au chapitre 3 page 57, une figure de l'Andra présentant à la fois l'Oxfordien carbonaté et le Callovo-Oxfordien est citée en appui d'un « témoignage » de l'hétérogénéité de la formation du Callovo-Oxfordien. Or cette figure montre que seul l'Oxfordien calcaire (plate-forme oxfordienne) présente un caractère hétérogène. La couche hôte du Callovo-Oxfordien, dont l'épaisseur est d'au moins 140 m sur la ZIRA, ne comprend pas l'Oxfordien carbonaté (Oxfordien moyen et Oxfordien supérieur), elle se limite aux terrains d'âges Callovien et Oxfordien Inférieur.

L'IEER considère que l'Andra n'a pas pris en compte dans ses évaluations de sûreté la variabilité des caractéristiques du milieu géologique, en particulier de la couche du Callovo-Oxfordien. Il s'agit d'une interprétation erronée. En effet, l'Andra s'est toujours attachée à mener une analyse de la variabilité (verticale et horizontale) des paramètres hydrauliques, de transport des solutés, mécaniques, thermiques et chimiques, en corrélant autant que possible ces variations entre elles et avec la variabilité litho-stratigraphique (pétrographique) du Callovo-Oxfordien. Le choix de propriétés de transport uniformes (mais anisotropes) du Callovo-Oxfordien, pour l'évaluation de sûreté du Dossier 2005, a fait l'objet de justifications et s'est accompagné d'études de sensibilité pour rendre compte de la variabilité.

2. Une vision optimiste des performances

Les travaux de recherche de l'Andra sur les phénomènes d'interaction au sein du stockage entre composants de celui-ci et argilite ont mis en évidence leur complexité, mais aussi leur extension limitée de par les propriétés intrinsèques de l'argilite. L'analyse de performance réalisée en 2005 est caractérisée par un choix systématique d'extensions enveloppe et de caractéristiques conservatives, voire pénalisantes, des perturbations.

L'Andra note un attachement de l'IEER aux analyses de sûreté probabilistes. L'Andra rappelle qu'en France, le guide de sûreté émis par l'ASN impose de fonder l'analyse de sûreté sur une approche déterministe, sans exclure l'utilisation complémentaire d'analyse probabiliste pour appuyer l'analyse.

Rappelons aussi que le consensus international est qu'il n'y a pas d'opposition entre l'analyse déterministe et l'analyse probabiliste, l'une ou l'autre n'est pas systématiquement plus conservatrice ou pénalisante. Elles sont considérées comme complémentaires, et doivent être jugées, l'une comme l'autre, sur la qualité des arguments qui ont conduit aux conclusions et à la traçabilité de la méthode employée.

En l'occurrence, l'Andra a fondé son analyse d'une part sur un scénario d'évolution normale, sur lequel des études de sensibilité aux différents paramètres ont été menés, et d'autre part sur des scénarios d'évolution altérée qui permettent de rendre compte d'évolutions s'écartant notablement de ce qui était pris en compte dans le scénario d'évolution normale. Ces scénarios altérés sont évalués indépendamment de leur probabilité, et viennent ainsi compléter la justification de la maîtrise des performances du stockage. En conséquence, le choix de l'IEER de ne pas examiner les scénarios altérés présentés par l'Andra, en raison de leur faible probabilité, biaise la vision que peut avoir l'IEER de l'analyse de l'Andra : l'IEER a écarté de son analyse justement les situations les plus pessimistes envisagées par l'Andra.

En complément de son analyse déterministe, l'Andra mène aussi, à l'instar de l'IEER, des études de sensibilité par des méthodes probabilistes. Ces études de sensibilité ont confirmé que l'ensemble des scénarios de sûreté traités dans le dossier 2005 couvrent largement le champ des situations envisageables.

L'IEER a conduit à l'appui de sa démarche des calculs probabilistes de dose. L'Andra y a relevé une incohérence entre les résultats et les données d'entrée utilisées ; ces dernières ne devraient pas conduire à un intervalle de résultats aussi grand qu'annoncé par l'IEER.

3. Le calendrier

Le calendrier du projet est fixé par la loi. Cette dernière prévoit des évaluations scientifiques et techniques du dossier qui sera remis par l'Andra en 2015 et qui consolidera l'ensemble des résultats acquis. Le programme d'études et de recherches de l'Andra a été établi de façon à disposer à cet horizon des connaissances et des démonstrations nécessaires à une demande d'autorisation de création, sans préjudice de la poursuite des études et essais en vue de la mise en service et de l'optimisation du projet.

4. Le terme source, la mise en stockage du combustible usé

Les dossiers 2005 et 2009 comprennent un inventaire prévisionnel détaillé des déchets à stocker (quantités, contenu radioactif, description de chaque famille). Il en sera de même du dossier support à la demande d'autorisation de création ; l'inventaire présenté dans ce dossier définira le périmètre demandé pour le décret d'autorisation. L'inventaire comporte des marges pour couvrir les incertitudes.

La loi prescrit le traitement des combustibles usés en France : « La réduction de la quantité et de la nocivité des déchets radioactifs est recherchée notamment par le traitement des combustibles usés (...) ». Le stockage des combustibles usés non traités ne fera donc pas partie du périmètre de la demande d'autorisation de création du Centre de stockage. Le Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2010-2012 prévoit néanmoins que l'Andra vérifiera que les concepts de stockage (en particulier la conception de la descenderie et des puits) restent compatibles avec l'hypothèse du stockage direct des combustibles usés. Cela conduira l'Andra à utiliser un scénario mis à jour par rapport à celui présenté dans le dossier 2005.

5. Le transport diffusif et convectif

Dans son évaluation de sûreté, l'Andra prend en compte les équations du transport convectif et de la diffusion, sans préjuger de la dominance de l'un ou de l'autre. Ainsi le Dossier 2005 comporte une évaluation statistique du nombre de Peclet. Cette distribution est proche de celle donnée par l'IEER.

Les conclusions qu'en tirait l'Andra étaient que le transport convectif pouvait être co-dominant dans certaines situations. Cependant une co-dominance des deux modes de transport n'entraîne pas de conséquence significative sur l'impact radiologique du stockage, les vitesses de transport étant du même ordre de grandeur.

6. Potentiel de séismes

Comme l'indique l'IEER, l'alea sismique dans la zone étudiée est faible. Plusieurs méthodes ont été utilisées par l'Andra pour le déterminer l'alea sismique, dont des analyses probabilistes. Elles sont présentées dans le Référentiel de site 2009. L'Andra prévoit d'établir un document dédié en support à la demande d'autorisation de création.

7. Microfissures colmatées

Le colmatage des microfissures dans le Callovo-Oxfordien renvoie à des phénomènes diagénétiques qui ont affecté l'ensemble de la zone de transposition, et la totalité de l'épaisseur du COX. Cela justifie que les observations faites dans le Laboratoire souterrain soient représentatives de la ZIRA. Par ailleurs, il est à noter que le fait que des microfissures contenues à l'intérieur du Callovo-Oxfordien soient colmatées ou non, n'a pas d'influence sur la sûreté du stockage.

8. La variabilité de la perméabilité dans l'EDZ

Dans les évaluations de performances et de sûreté présentées en 2005 et 2009, l'Andra retient par prudence l'hypothèse que l'EDZ initiale est pérenne et ne prend pas en compte les effets favorables de l'auto-colmatage, bien que ce phénomène soit un fait observé et mesuré. Cela conduit à prendre en compte des perméabilités de 5.10^{-9} m/s pour la zone fracturée et 5.10^{-11} m/s pour la zone microfissurée.

9. Les saignées

L'Andra étudie plusieurs options techniques en parallèle pour gérer l'interface entre les scellements et les argilites ainsi que l'EDZ. Ces études sont accompagnées d'essais au Laboratoire souterrain.

10. Les mesures de la conductivité thermique, les recherches thermiques in situ et mise en stockage

L'Andra a mis en œuvre plusieurs méthodes de mesure de la conductivité thermique de l'argilite. Les températures mesurées *in situ* lors des essais thermiques dans le Laboratoire souterrain correspondent aux mêmes conductivités thermiques.

L'Andra réalisera en 2012 dans le cadre du projet européen LUCOEX (Large Underground COnccept EXperiment) un essai de démonstration en vraie grandeur d'une alvéole HA soumise à un chauffage correspondant à la dissipation de chaleur par les colis de déchets vitrifiés. Cet essai permettra notamment de vérifier le fonctionnement de la tête d'alvéole lors de la phase thermique, d'analyser l'impact thermo-mécanique sur la galerie d'accès et de vérifier le comportement THM de la roche autour de l'alvéole.

3. Position de l'Andra vis-à-vis des recommandations de l'IEER

Ici, on ne reprendra pas les recommandations du chapitre 1 qui constituent une compilation des recommandations des chapitres suivants.

3.1 Chapitre 2

1. L'Andra devrait fournir une analyse probabiliste, facile à consulter, de l'accélération et de la charge choisies qu'elle a l'intention d'utiliser dans la conception des installations de surface, notamment les installations de manutention des déchets. Pour faciliter l'examen il serait judicieux d'inclure cette analyse probabiliste dans le catalogue des séismes.

2. De manière générale l'Andra devrait fournir une documentation de ses résultats plus facile à consulter et à évaluer.

L'Andra établira en vue du DAC une note détaillée explicitant la méthodologie de détermination de l'aléa sismique, conformément à la RFS 2001-01, jusqu'à l'évaluation des spectres de réponse associés aux mouvements du sol correspondant aux Séismes Majorés de Sécurité et aux Séismes Maximaux Physiquement Possibles.

Les documents de conception établis pour la Demande d'Autorisation de Création du stockage présenteront les spectres retenus pour la conception de l'installation et la vérification qu'ils sont enveloppes des spectres de réponse associés aux Séismes Majorés de Sécurité pour la phase d'exploitation du stockage et aux Séismes Maximaux Physiquement Possibles pour la phase de post-fermeture.

3.2 Chapitre 3

1. L'Andra devrait revoir son hypothèse qui consiste à considérer le flux comme principalement diffusif en tenant mieux compte des données des traceurs et en estimant la gamme des valeurs du nombre de Peclét (au lieu d'une valeur unique) à partir de la variation des paramètres.

Il est montré dans les réponses au chapitre 3 que l'Andra a bien estimé une gamme des valeurs du nombre de Peclét et non une valeur unique pour l'évaluation de sûreté du Dossier 2005. La même méthodologie sera mise en œuvre en utilisant les données mise à jour pour l'évaluation de sûreté du stockage associée à la Demande d'Autorisation de Création.

2. Il est indispensable que l'Andra détermine la nature de l'hétérogénéité au sein de la ZIRA comme l'indiquent les données recueillies à partir des forages situés sur le périmètre de la ZIRA.

L'ensemble des données recueillies dans les forages ne met pas en évidence d'« hétérogénéité » mais une variabilité qui est expliquée et prise en compte par l'Andra dans ses études.

L'IEER relève ainsi au chapitre 4 de son rapport que « Les études sismiques de la Zone de Transposition en particulier en combinaison avec les travaux sédimentologiques, présentent un tableau crédible de l'uniformité, de l'homogénéité et de la continuité avec des variations par exemple dans la composition minérale et les variations correspondantes dans les propriétés de la couche comme le constatent de multiples publications de l'Andra ».

Les résultats de la sismique réflexion 3D sur l'emprise de la ZIRA permettront de compléter la vision géologique d'ensemble et en particulier d'avoir des profils continus entre forages.

3. L'Andra a affirmé qu'elle révisera les scénarios du Dossier 2005 Argile, ainsi que les paramètres utilisés dans l'évaluation des performances. L'Andra devrait procéder à une évaluation probabiliste du risque en utilisant la gamme complète des valeurs des paramètres indiqués par les données, plutôt que seulement une analyse de sensibilité limitée. Il serait très souhaitable de disposer d'un terme source représentant avec précision la quantité totale et les types de déchets qui seraient effectivement évacués si le site de stockage était autorisé. A défaut, une hypothèse pénalisante devrait être adoptée pour le terme source, avec notamment des hypothèses appropriées sur l'évacuation potentielle de combustibles usés avec une mise à jour du scénario S2 utilisé dans le Dossier 2005 Argile.

Conformément au guide de sûreté, l'Andra utilise la notion de dose et non de risque comme indicateur de l'acceptabilité du stockage (cf. section 1.6.3 des options de sûreté, Andra 2010) : « Néanmoins, et conformément à la publication n° 103 de la CIPR, l'optimisation doit reposer sur d'autres paramètres, tels que la robustesse des barrières assurant le confinement et l'isolement des déchets. Ainsi, l'Andra, pour le long terme, retient comme principal indicateur de protection la dose efficace engagée, à l'exutoire. Le respect d'une dose de 0,25 mSv/an au plus en situation normale fixée par le guide de sûreté (ASN, 2008) est retenu par l'Andra, valeur du même ordre de grandeur que la contrainte de dose de 0,3 mSv/an fixée par la CIPR 81. Pour les situations considérées comme altérées, conformément au guide de sûreté (ASN, 2008), les situations altérées retenues pour la conception du stockage sont « maintenues suffisamment faibles par rapport aux niveaux susceptibles d'induire des effets déterministes. »

Conformément au guide de sûreté ASN 2008, l'Andra suit une démarche déterministe : « L'approche retenue [...] consiste à étudier un nombre limité de situations représentatives des différentes familles d'événements, de séquences ou de combinaisons d'événements, pour lesquelles les conséquences associées sont les plus élevées parmi l'ensemble des situations envisageables. Cette approche repose sur une sélection d'événements considérés comme raisonnablement envisageables et représentatifs des risques. »

Enfin, pour compléter les analyses de sensibilité, l'Andra mène une démarche probabiliste, non pas sur le risque, mais sur les paramètres sur lesquels reposent les fonctions de sûreté. Dans le Dossier 2005, tome évaluation de sûreté du stockage géologique, l'Andra a dans la section 7.6 précisé les objectifs et les premiers calculs probabilistes de sûreté. Ces calculs intégraient dans les études de sensibilité associées aux évaluations quantitatives des scénarios, les lois de distributions de probabilité pour des paramètres donnés sur la base des connaissances acquises sur le Callovo-Oxfordien et sur le terme source verre. Cette démarche sera reconduite pour les futurs calculs.

Les dossiers 2005 et 2009 présentent de manière précise l'inventaire des déchets à stocker (quantités, natures, mode de conditionnement) et leur contenu radioactif. Il en sera de même du dossier support à la demande d'autorisation de création. L'inventaire comporte des marges pour couvrir les incertitudes.

La loi française prévoit le traitement des combustibles usés : « La réduction de la quantité et de la nocivité des déchets radioactifs est recherchée notamment par le traitement des combustibles usés et le traitement et le conditionnement des déchets radioactifs » (article 542-1-2 du Code de l'environnement). Dans ce contexte le stockage des combustibles usés non traités ne fera pas partie du périmètre de la demande d'autorisation de création. Le Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2010-2012 prévoit néanmoins que l'Andra vérifiera que les concepts de stockage (en particulier la conception de la descenderie et des puits) restent compatibles avec l'hypothèse du stockage direct des combustibles usés. Cela conduira l'Andra à utiliser un scénario mis à jour par rapport à celui présenté dans le dossier 2005.

4. L'Andra devrait procéder à un examen externe approfondi de son analyse de l'évaluation de la sûreté, notamment les logiciels, les données d'entrée, et la méthodologie.

Suite au dossier 2005 présentant la faisabilité de principe de conception du stockage, la loi de programme du 28 juin 2006 prévoit un processus de décision progressif, qui conduira l'Andra à présenter en 2015 une demande d'autorisation de création du stockage géologique, qui fera l'objet d'un avis notamment de la Commission nationale d'évaluation et de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN).

Dans ce cadre, l'évaluation de la sûreté du stockage fait l'objet d'une expertise externe à l'Andra et en particulier de l'IRSN saisi par l'ASN. L'IRSN expertisera, comme cela a été le cas pour les dossiers précédents la modélisation présentée par l'Andra, les données d'entrées ainsi que la méthodologie associée pour les points utilisant la simulation. L'ensemble est également examiné par le Groupe permanent d'experts placé auprès de l'ASN.

3.3 Chapitre 4

1. L'Andra devrait faire une hypothèse raisonnablement prudente sur l'état de l'EDZ après la fermeture. Une hypothèse qui emporterait notre adhésion, serait celle pour laquelle l'EDZ ne se cicatrise pas entièrement d'elle-même avec création d'une perméabilité et/ou un état de stress in situ. En fait, il peut être préférable de considérer que l'EDZ conserve le pire état de dommages estimé tout au long de la durée de vie du stockage.

L'Andra a suivi une démarche prudente qui consiste à retenir une zone endommagée dans le stockage (cf. section 5.3.2.2 du Dossier 2005 Argile, tome évaluation de sûreté du stockage géologique).

Pour l'EDZ, l'Andra n'a pas pris en compte un éventuel auto-colmatage (malgré par exemple l'effet bénéfique de la pression de gonflement du noyau à base d'argile gonflante, observé à petite échelle et à grande échelle). Dans tous les scénarios de sûreté, l'EDZ retenue est l'EDZ initiale : les extensions et valeurs de perméabilité (5.10^{-9} m/s pour la zone fracturée et 5.10^{-11} m/s pour la zone microfissurée) ont été appliquées de manière pérenne.

2. Même si l'Andra suppose que les hétérogénéités sont peu probables, à ce stade de la caractérisation du site, elles ne peuvent pas être exclues catégoriquement. Par conséquent, il est très souhaitable que des efforts supplémentaires soient poursuivis pour s'assurer qu'aucune incertitude importante ne demeure.

Les observations et mesures concernant la fracturation sont poursuivies dans les ouvrages existants du Laboratoire souterrain, et le seront aussi dans les galeries souterraines du stockage.

3. Les observations sur le breakout et le déplacement de cisaillement le long des fractures dans des trous horizontaux forés récemment pour des alvéoles de mise en place méritent une attention particulière. Elles ont des implications évidentes pour la géométrie de l'EDZ, la charge du revêtement des alvéoles, la charge du revêtement des galeries (tunnels), l'espace vide créé, et la formation de voies d'écoulement potentielles. Nous n'avons vu aucune analyse de ces phénomènes par l'Andra.

Ainsi que l'écrit l'IEER, les trous horizontaux vus lors de la visite du Laboratoire souterrain ont été forés récemment. Comme toute expérimentation menée dans le Laboratoire souterrain, les observations et mesures réalisées font l'objet d'une analyse détaillée, qui sera reprise dans un document de synthèse, lorsque l'ensemble des mesures interprétées pourra être intégré.

4. Compte tenu du fait que ces technologies sont largement utilisées et mises en œuvre dans les tunnels, nous encouragerions vivement l'Andra à s'engager plus fermement et explicitement à des inspections approfondies et régulières du béton, aussi longtemps que l'accès le permet.

Dans le document sur les principes de la réversibilité cité par l'IEER, l'Andra indique que l'observation de l'évolution des ouvrages permettra de réévaluer la durée de réversibilité au cours du temps. L'Andra a mis en place une stratégie d'observation et de surveillance des installations du stockage qui comprend, notamment, la surveillance des bétons de revêtement des alvéoles, galeries et liaisons surface-fond (voir par exemple le § 10.3.7 du tome « Architecture et gestion du stockage géologique » du Dossier 2005). Elle s'appuie entre autres sur des approches classiques et éprouvées, qui seront adaptées au contexte du stockage géologique. En particulier, la réponse aux exigences en la matière, imposées par la gestion réversible, est assimilable à l'approche du Structural Health Monitoring développée en génie civil pour les « structures intelligentes ».

5. La contrainte déviatorique, la saturation et la température ont toutes une influence significative sur le taux de fluage. L'interaction de ces facteurs environnementaux et leurs effets sur les performances du stockage semblent avoir été traités de façon plutôt qualitative. Une meilleure intégration de l'influence combinée de ces facteurs est justifiée afin de démontrer l'étendue des avantages (et l'absence de contre-performance).

Les influences respectives sur le taux de fluage de chacun des paramètres évoqués dans la recommandation ont déjà été évalués quantitativement (voir Référentiel de site tome chapitre 18). Par ailleurs, deux expérimentations en cours dans le Laboratoire souterrain vont permettre de compléter ces données (TED pour la température et SDZ pour la saturation).

3.4 Chapitre 5

1. La conception thermique (et mécanique) du site de stockage nécessite la spécification d'un terme source. Il s'agit notamment de déterminer le nombre et les types de colis de déchets qui seront mis en stockage ainsi que l'âge et les caractéristiques thermiques attendues des colis. Mais surtout, il faudra aborder et lever la présente incertitude, à savoir si du combustible usé (non retraité) sera évacué.

2. Nous recommandons vivement que l'Andra développe un scénario plausible avec comme élément important la mise en stockage du combustible irradié. Cela est nécessaire car le scénario S2, présenté dans le Dossier 2005 Argile, qui suppose un arrêt du retraitement en 2010 est actuellement obsolète. Nous avons effectué des calculs de température pour des colis de combustible irradié de type CU1 pour illustrer l'importance de développer une version actualisée du scénario S2. Nous sommes conscients du fait qu'aujourd'hui, ce genre de scénario n'est pas requis. Cependant, le combustible usé non retraité, dont le combustible MOX, créera des conditions de contraintes thermiques plus importantes ainsi que de plus grands défis mécaniques et miniers. L'Andra devrait élaborer un scénario

actualisé S2 plausible ou un scénario modifié S1b et examiner leurs implications thermiques ainsi que leurs conséquences pour la taille du site de stockage.

Comme indiqué plus haut, la loi prévoit le traitement des combustibles usés : « La réduction de la quantité et de la nocivité des déchets radioactifs est recherchée notamment par le traitement des combustibles usés et le traitement et le conditionnement des déchets radioactifs » (article 542-1-2 du Code de l'environnement). Dans ce contexte le stockage des combustibles usés non traités ne fera pas partie du périmètre de la demande d'autorisation de création. Le Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs 2010-2012 prévoit néanmoins que l'Andra vérifiera que les concepts de stockage (en particulier la conception de la descenderie et des puits) restent compatibles avec l'hypothèse du stockage direct des combustibles usés. Cela conduira l'Andra à utiliser un scénario mis à jour par rapport à celui présenté dans le dossier 2005.

3.5 Chapitre 6

L'Andra pourrait envisager la construction d'une zone d'expérimentation dans le laboratoire souterrain comparable au Démonstrateur de concept de site à Aspö, afin de démontrer, autant que possible dans une expérience de quelques années, la façon dont un réel site de stockage pourrait fonctionner dans la pratique. Cela permettrait aussi d'établir avec plus d'exactitude certains paramètres de performance spécifiques à Bure, notamment la performance in situ des conteneurs HAVL sous contrainte thermique.

L'Andra va réaliser en 2012 dans le cadre du projet européen LUCOEX (Large Underground COnccept EXperiment) un essai de démonstration en vraie grandeur d'une alvéole HA soumise à un chauffage correspondant à la dissipation de chaleur par les colis de déchets vitrifiés. Il a pour but :

- de tester les modalités de construction d'une tête d'alvéole comme décrite dans le dossier 2009,
- de vérifier le fonctionnement de cette tête lors de la phase thermique,
- d'analyser l'impact thermo-mécanique sur la galerie d'accès,
- de vérifier le comportement THM de la roche autour de l'alvéole.

4. Analyse par l'Andra du document de l'IEER

4.1 Chapitre 2 Données sismiques et caractérisation sismologique de la zone de transposition

4.1.1 Conclusions

Conclusion 1. Les microfissures que l'Andra a détectées dans le laboratoire souterrain étaient colmatées. Il reste à déterminer si cela sera aussi le cas pour la ZIRA, puisque la caractérisation de son sous-sol est nécessaire pour arriver à cette conclusion. Cette conclusion doit être validée à partir de données spécifiques à la ZIRA.

L'analyse de l'origine de ce colmatage renvoie à un phénomène qui a affecté l'ensemble de la zone de transposition, et donc la ZIRA.

Par ailleurs, il est à noter que le fait que des microfissures contenues à l'intérieur du Callovo-Oxfordien soient colmatées ou non, n'a pas d'influence sur la sûreté du stockage.

Conclusion 2. Bien que la présence de failles verticales avec un rejet de plus de quelques mètres soit écartée, il est clair qu'il existe des chemins d'écoulement verticaux qui peuvent même être observés dans les carrières locales. Les calcites trouvées à proximité de la surface en sont la preuve.

La présence de calcite dans les carrières de calcaire n'est pas en soi la preuve de chemins d'écoulement verticaux, mais de remobilisations locales des carbonates à un moment donné de l'histoire géologique. Les fractures observées par l'Andra dans les carrières situées à proximité de la zone de transposition ont des extensions verticales d'ordre décimétrique, elles n'affectent pas le Callovo-Oxfordien. Le contraste chimique entre les eaux du Dogger et celles de l'Oxfordien et les directions des écoulements très différentes dans chacune de ces formations témoignent de l'absence de connexions hydrauliques au travers du Callovo-Oxfordien.

Conclusion 3. L'aléa sismique dans la zone proche du site semble être faible. Nous comprenons que l'Andra utilise des archives conformes de séismes. De la même façon, l'Andra indique qu'une analyse probabiliste a été faite pour plusieurs périodes de retour. Elle a évalué l'éventail des périodes de retour pour des zones spécifiques. Cependant, nous n'avons pas trouvé d'analyse comparative, à partir des catalogues des séismes utilisés par l'Andra, indiquant de quelle façon la secousse maximale a été déterminée, à la fois pour la période d'exploitation et la période post-fermeture. Une analyse probabiliste, facile d'accès, de l'accélération et de la charge est importante pour évaluer la conception des installations de surface et notamment des installations de manutention des déchets.

Dans la réponse ci-avant aux recommandations concernant le chapitre 2 est indiqué le document qui intégrera l'utilisation d'analyses probabilistes pour la détermination des séismes à prendre en compte et de leurs caractéristiques spectrales.

Conclusion 4. Dans certains rapports, des erreurs d'unités devraient être corrigées. Dans certains cas, des unités de vitesse sont données alors qu'il s'agit de déplacements, dans d'autres c'est la fréquence au lieu de la période, etc.

Les coquilles identifiées par l'IEER dans le tome 3 du référentiel de site ont été corrigées.

4.1.2 Analyse détaillée du rapport

2.1 La collecte des données sismiques, les investigations, les recherches et analyses pour la sélection du ZIRA

Après une citation de l'Andra tirée d'un document de 2005, le rapport indique au § 2.1 : « A cela s'ajoutent des affirmations sur l'homogénéité dans la ZIRA ». Or la ZIRA n'a été définie par l'Andra qu'en 2009.

Page 22, bas de la page : par « inclinaison des couches », il faut comprendre « structuration synclinale ».

2.1.1 Examen de la recherche sur l'homogénéité de la zone de transposition ou son absence.

Tout au long de ce chapitre et du suivant, le terme « homogénéité » revient souvent. Selon le Larousse, le terme « homogène » se dit d'un « tout formé d'éléments de même nature, cohérents ».

entre eux » et le terme « hétérogène » se dit d'un « tout qui est formé d'éléments dissemblables, disparates, souvent contraires ».

Le Callovo-Oxfordien (sur la Zone de Transposition ou la ZIRA) est homogène : on retrouve les mêmes éléments minéralogiques qui constituent la couche. Ces éléments sont indicateurs de mêmes environnements de dépôt et d'une même histoire géologique sur l'espace considéré. Ils déterminent des propriétés homogènes sur la zone considérée, même si leurs proportions varient. Ces variations sont quantifiées, et les données d'entrée pour le traitement des différents scénarios de sûreté de l'Andra tiennent bien sûr compte de ces variations.

L'utilisation que fait l'IEER du terme renvoie plutôt à la notion d'uniformité, mais ce n'est pas le sens utilisé par l'Andra.

Il existe donc une confusion d'ordre terminologique. En revanche, il n'apparaît pas d'élément dans le rapport de l'IEER qui puisse remettre en cause la vision présentée par l'Andra sur le degré d'homogénéité et la continuité du Callovo-Oxfordien sur la Zone de Transposition.

Début du § 2.1.1 : « Dans la Synthèse du programme de reconnaissance de la zone de transposition 2007-2008 les résultats des investigations par forage ont révélé des microfractures (comme indiqué dans la section 3.2.1.1 de ce rapport). Bien que « la présence de failles à rejet vertical supérieures à 10 m » soit exclue il n'existe pas assez de données pour exclure un rejet entre 5 et 10. Nous notons que des éléments mettant en évidence des voies d'écoulement verticales peuvent être observés dans les carrières locales. Les calcites trouvées à proximité de la surface en sont la preuve ».

Lors de la campagne de reconnaissance de la Zone de Transposition en 2007-2008 il n'a été reconnu en forage des microstructures que sur les deux plateformes EST450 et EST460 situées dans la zone de fracturation diffuse au Sud-Ouest et hors de la Zone de Transposition. Ces microstructures ont été rencontrées dans les deux encaissants carbonatés. Lors de cette campagne 2007-2008, les forages n'ont mis en évidence aucune microstructure dans le Callovo-Oxfordien. Le même paragraphe cité par l'IEER (Synthèse du programme de reconnaissance de la zone de transposition 2007-2008, Andra 2009, section 4.2.1.3 Les microstructures (p. 70)) conclut qu'*en vertical, la fracturation ne paraît pas avoir d'impact au travers du Callovo-Oxfordien comme le montre le comportement hydraulique différencié au sein de l'Oxfordien carbonaté et les différences de charges entre le Dogger et l'Oxfordien.*

La présence de calcite en remplissage de fractures relevée dans les carrières locales de calcaire n'est le plus souvent pas une indication de transfert à grande échelle, mais de phénomènes de pression-dissolution sous couverture avec transfert sur une échelle inframétrique. La remarque de l'IEER concerne les encaissants carbonatés ou les calcaires du Barrois, mais ne concerne pas le Callovo-Oxfordien.

L'ensemble de ce sous-chapitre concerne la pile sédimentaire dans son ensemble. L'Andra, comme l'IEER, considère que cet ensemble n'est pas homogène à l'échelle de la Zone de Transposition. Cette constatation ne peut en aucun servir de base à une évaluation de l'hétérogénéité de la couche du Callovo-Oxfordien.

2.1.2 La caractérisation sismique

Page 27 dernier § « Comme nous le verrons dans le Chapitre 3, la porosité varie dans la zone de transposition. Selon le Dossier 2005 Argile, Synthèse : Certains niveaux de l'Oxfordien carbonaté présentent une porosité plus élevée que le reste de la formation ».

L'IEER tire, à partir des observations faites sur l'Oxfordien carbonaté, qui appartient aux formations encaissantes aquifères, une considération générale sur l'évolution de la porosité dans la Zone de Transposition. Les conditions de dépôts du Callovo-Oxfordien, la minéralogie qui en résulte, puis son évolution au cours du temps sont les trois éléments qui conduisent à la construction du réseau poral actuellement observable. Pour ces raisons, il ne peut être tiré de la distribution de la porosité dans ces formations carbonatées des conclusions sur celle du Callovo-Oxfordien.

2.1.3 Evaluation du potentiel de recherche avec une résolution 2D et 3D de 5 mètres

Page 28 « En revanche, le problème pourrait venir des distances entre les géophones et les lignes sismiques qui définissent la résolution des ouvrages souterrains ».

L'auteur suggère qu'en rapprochant davantage les points de vibration (PV) et de réception (PR), on obtiendrait une meilleure résolution. Le principe du traitement de la sismique en couverture multiple consiste à additionner plusieurs traces sismiques réfléchies par un même point-miroir (CDP) pour améliorer le rapport signal/bruit en éliminant les bruits aléatoires et tout ou partie des réflexions

multiples. La résolution horizontale de la sismique dépend de la longueur d'onde λ du signal envoyé dans le sol. En chaque point de réflexion dans le sol on peut calculer la surface concentrique qui apporte la contribution principale à l'onde réfléchie (surface appelée zone de Fresnel). Son diamètre est égal à $\sqrt{2z\lambda}$ (avec z profondeur du point de réflexion).

A la profondeur de la couche hôte, le diamètre de la zone de Fresnel est de l'ordre d'une quinzaine de mètres. Tant que l'espacement des points-miroirs est plus grand que ce diamètre, il va effectivement limiter le nombre de réflexions en un point, et donc la résolution, mais en dessous du diamètre de la zone de Fresnel, la résolution n'est limitée que par la longueur d'onde. Dans ce dernier cas, réduire l'espacement n'apporte pas d'amélioration.

L'espacement des PV et PR a été calculé de manière à obtenir un espacement des points-miroirs de 12,5 à 15 m et donc une résolution optimale, d'où un espacement des PV et PR de 25 m.

En bas de page « [L'examen détaillé de 350 km de profils géophysiques sismiques \[Andra ZT 2009 ne fait mention que de 174 km\] sur le secteur d'étude](#) ».

Il n'y a pas contradiction entre le kilométrage de sismique 2D cité dans la synthèse du Dossier 2005 et celui mentionné dans la synthèse du programme de reconnaissance 2009. Le premier concerne l'ensemble des données sismiques sur le secteur élargi utilisées en 2005 (correspondant à la figure 2-4 du rapport IEER), alors que le second concerne les lignes tirées en 2009.

En fin du sous-chapitre « [Il serait prématuré de la part de l'Andra d'élargir sa conclusion, sur le colmatage des microfissures, à la ZIRA et à la performance du site de stockage, d'autant plus qu'il existe des éléments indiquant que la ZIRA n'est pas homogène comme indiqué ci-dessus et comme abordé au Chapitre 3](#) ».

Le colmatage des microfissures dans le Callovo-Oxfordien n'a pas de lien avec les variations minéralogiques dans la couche. Il est dû à des phénomènes diagénétiques qui se sont produits bien après son dépôt, alors que la minéralogie dépend des conditions de dépôt. Le Référentiel de site montre que les phénomènes diagénétiques ont affecté l'ensemble de la zone, ce qui justifie que les observations faites dans le Laboratoire souterrain soient représentatives de la ZIRA.

2.2 Les séismes

Page 31 « [Nous ne savons pas exactement comment l'Andra est arrivée à une augmentation de la magnitude de 0,5 correspondant à une augmentation de 1 degré de l'intensité. Une utilisation de la formule empirique classique pour un séisme à 10 km de profondeur donne une augmentation de la magnitude de 0,7. \[...\] Bien que l'augmentation de l'intensité est plus grande pour une magnitude SMS calculée de la manière suggérée par l'Andra, le raisonnement pour y arriver n'est pas clair.](#) »

La magnitude est une grandeur intrinsèque à un séisme. Elle se calcule à partir des caractéristiques des ondes propagées par le séisme. L'intensité d'un séisme est définie en un lieu donné par rapport aux effets produits par ce séisme en ce lieu, observés ou ressentis par l'homme (réveil, chute d'objets, fissures ...) ou dégâts apportés aux constructions. L'intensité d'un séisme est donc une estimation qualitative, associée au lieu d'observation.

Il n'existe pas de véritable relation entre magnitude et intensité. Ainsi deux séismes de même magnitude peuvent donner en surface des intensités différentes. Inversement deux séismes de même intensité en un lieu peuvent avoir des magnitudes différentes.

Cependant, pour les séismes historiques, la magnitude des événements sismique rapportés ne peut être évaluée qu'à partir de l'ensemble des intensités estimées en chaque point d'observation. Il est utilisé pour cela différentes relations empiriques, comme l'indique l'IEER dans son rapport p 38. Dans le Référentiel de site les caractéristiques des séismes sont estimées selon les directives de la Règle Fondamentale de Sûreté 2001-01, éditée par l'ASN (dans son § 2.3.2 il est indiqué que « l'augmentation d'intensité de un degré entre le SMHV et le SMS correspond à une augmentation de la magnitude conventionnellement fixée à 0,5. », la relation utilisée, tirée du catalogue des données sismiques, étant $ML = 0,551 + 2,2\log R + 1,14$ dans laquelle R est la distance focale en kilomètres).

2.2.3 Evaluation des événements sismiques

Page 37 « [il est important de connaître la raison pour des incertitudes si différentes \(de 0,2 à 0,4\)](#) ».

Il ne s'agit pas d'incertitude. Il a été calculé une moyenne pondérée à partir des spectres résultant de chacun des trois modèles sismotectoniques utilisés. Les poids associés à chaque modèle sismotectonique, voire à chaque branche d'un modèle sismotectonique, traduisent la confiance que

l'on accorde aux hypothèses de source sismique compte tenu des connaissances disponibles et méthodes adoptées. Un poids plus faible (0.2) a été attribué au modèle MS2, en raison d'une part de la finalité originelle de ce zonage, qui visait une évaluation probabiliste et non déterministe, et d'autre part de l'absence d'identification de zones de transition à l'intérieur du bassin de Paris. En effet, dans ce cas, on ne tient pas compte de l'information obtenue sur les familles de failles et de la différenciation de l'activité qui peut en résulter. Un poids équivalent a été attribué aux deux autres modèles, soit 0.4.

2.2.4 Détermination de la secousse sismique maximale possible sur le site de Bure

Page 37 « De nouveau, le sens du mot magnitude n'est pas mentionné et il pourrait s'agir de la magnitude locale (ML). »

Il s'agit bien de magnitude locale, conformément à la Règle Fondamentale de Sûreté.

4.2 Chapitre 3 - Caractéristiques et propriétés de la formation hôte et des formations encaissantes dans la zone de transposition influençant le transport des contaminants dans les milieux géologiques et les performances à long terme du stockage

4.2.1 Conclusions

Conclusion 1. **Recherche expérimentale et in situ** : La plupart des questions et problèmes identifiés proviennent de la façon dont les données existantes ont été utilisées pour justifier le modèle conceptuel du site, pour modéliser les processus de transport dans le Callovo-Oxfordien, et pour effectuer l'analyse de sûreté. L'applicabilité des modèles et des approches utilisées par l'Andra et leur transférabilité à la ZIRA ne peut être mise en évidence qu'en incluant la variabilité actuelle des propriétés de l'argilite dans les modèles de processus et en effectuant une analyse probabiliste de sûreté en utilisant la distribution observée des paramètres de transport. L'Andra n'a pas fait une telle analyse.

Le modèle conceptuel de site prend bien en compte la variabilité actuelle des propriétés de l'argilite et en explique l'origine et les limites. Il permet de justifier les données et modèles utilisés pour l'analyse de sûreté. Conformément au guide de sûreté de l'ASN, cette analyse a été menée dans un cadre déterministe (voir supra).

L'Andra a par ailleurs complété en 2005 son analyse des incertitudes par une analyse probabiliste en utilisant la distribution observée des paramètres de transport.

Conclusion 2. **Hétérogénéité de la formation du Callovo-Oxfordien** : Les données existantes indiquent une grande variabilité verticale et horizontale dans la composition minéralogique et la composition de l'eau interstitielle de la formation du Callovo-Oxfordien dans la zone de transposition. Cette variabilité entraîne des différences perceptibles dans les propriétés de transport, comme la porosité totale, la porosité cinématique, la porosité accessible aux anions, les coefficients de diffusion effective des cations et anions, et la perméabilité des argilites dans des zones et des profondeurs différentes. La perméabilité et la diffusion présentent également une anisotropie. Les propriétés de transport peuvent également être affectées par les micro-fractures découvertes dans la séquence supérieure de la formation du Callovo-Oxfordien. Malgré le caractère hétérogène du Callovo-Oxfordien, l'Andra le considère homogène et isotrope pour son évaluation des performances à long terme du site de stockage.

Il n'y a pas d'hétérogénéité dans le Callovo-Oxfordien (voir supra). Si l'Andra a utilisé, dans son évaluation des performances à long terme du site de stockage, des valeurs de propriétés anisotropes et uniformes, elle a également pris soin de couvrir l'ensemble des valeurs mesurées, notamment pour les paramètres cités dans la conclusion 2 de l'IEER ci-dessus rappelée, au travers :

- des calculs de sensibilité
- du traitement des différents scénarios d'évolution normale, altérée et de fonctionnement très dégradé.

Conclusion 3. **Hétérogénéité au sein de la ZIRA** : Deux régions nettement différentes ont été identifiées dans le nord-est et le sud-ouest de la zone de transposition, la ZIRA étant située entre elles. Cela indique une hétérogénéité au sein de la ZIRA.

Le fait qu'il y ait une variation spatiale n'indique pas une hétérogénéité. Rien dans les données acquises à ce jour ne met en exergue un changement abrupt au sein de la zone de transposition. En

revanche, l'Andra explique les variations observées au sein de la ZIRA par une reconstitution précise des stades précoces de l'histoire géologique de la formation.

Conclusion 4. Evaluation inadéquate de la variabilité des paramètres : L'Andra utilise des propriétés de transport moyennes dans le scénario d'évolution normale et des valeurs minimales ou maximales dans les analyses de sensibilité. Les paramètres moyens ne représentent pas nécessairement les véritables propriétés hétérogènes et isotropes de l'argilite. Dans les études de sensibilité un seul paramètre a été modifié alors que les autres paramètres ont été fixés à leurs valeurs moyennes. La situation dans laquelle plusieurs paramètres seraient fixés à leurs valeurs minimale ou maximale (ou 95e percentile) n'a pas été envisagée. En conséquence, les impacts potentiels de la variabilité des paramètres n'ont pas été évalués.

Dans l'étude probabiliste conduite par l'Andra pour le Dossier 2005 tous les spectres de variation des différents paramètres ont été pris en compte de façon simultanée.

Conclusion 5. Les paramètres de transport moyens : Les paramètres de transport moyens utilisés par l'Andra ont été calculés pour l'ensemble de la zone de transposition. Les paramètres de transport moyens (et effectifs) pourraient être différents si seule la ZIRA était prise en compte. En particulier, les coefficients de diffusion et la conductivité hydraulique verticale pourraient être plus élevés; il pourrait en résulter des taux moyens plus élevés pour le transport par diffusion et par convection. En outre, les effets de l'hétérogénéité sur le transport dans la ZIRA restent à déterminer.

En 2009, afin de proposer des critères discriminants pour le choix de la ZIRA, l'Andra a notamment utilisé dans ses calculs des paramètres de transport mesurés localement. Ces calculs montrent qu'*in fine* il n'existe pas de différence significative entre chaque localisation, pas plus qu'avec les résultats de l'évaluation de sûreté du dossier 2005.

Conclusion 6. Le transport diffusif et convectif : Les données existantes (en particulier, les données du traceur naturel) montrent l'existence du transport convectif dans les argilites du Callovo-Oxfordien. L'Andra suppose que le transport diffusif dominera le flux bien que les données et une analyse des nombres de Peclet indiquent qu'un transport à la fois diffusif et convectif pourrait se manifester avec une probabilité significative. Cela constitue un problème important puisque le transport convectif dans les estimations de l'Andra des propriétés de rétention de l'argilite n'est pas pris en compte (scénario d'évolution normale) ou largement sous-estimé (études de sensibilité).

L'un des résultats de l'analyse probabiliste utilisant la distribution observée des paramètres de transport, faite par l'Andra en 2005 pour l'évaluation de sûreté du stockage, a été la distribution statistique du nombre de Peclet. Cette distribution est proche de celle donnée par l'IEER, et les conclusions tirées par l'Andra étaient que le transport convectif pouvait être co-dominant dans certains cas sans que cela ait des conséquences significatives sur l'impact radiologique.

Dans ses calculs de sûreté l'Andra prend en compte les équations du transport convectif et de la diffusion, sans préjuger de la dominance de l'un ou de l'autre. Comme le souligne la distribution du nombre de Peclet, des situations étudiées par l'Andra présentent effectivement une codominance entre la convection et la diffusion.

Conclusion 7. Une évaluation inadéquate des incertitudes : Une analyse de sûreté probabiliste simplifiée, effectuée avec des gammes de paramètres cohérentes avec celles définies par l'Andra indique que les incertitudes des paramètres d'entrée aboutissent à une incertitude de dose maximale totale d'environ 5 ordres de grandeur (d'un facteur 100 000). La fourchette des doses totales maximales définies par l'Andra comme étant d'un ordre de grandeur, soit d'un facteur 10 (ou d'un facteur 2 quand le site de stockage est situé dans le laboratoire souterrain) pourrait être sous-estimée.

Il est montré ci-après qu'avec les paramètres de calcul donnés par l'IEER pour son analyse de sûreté simplifiée, l'incertitude ne peut être au maximum que d'un facteur 200 (et non d'un facteur 100 000).

4.2.2 Analyse détaillée du rapport

3.2 Caractérisation des milieux géologiques dans la Zone de transposition

3.2.1 Roche-hôte de la formation du Callovo-Oxfordien

Page 48, il est indiqué que, concernant l'analyse de l'Andra en Scénario d'Evolution Normale (SEN), seul le gradient de charge est conservatif, les autres paramètres « ont été spécifiés à leur valeur attendue (non conservatrices) ». Cette remarque est la première qui conduit l'IEER à juger l'approche de l'Andra « optimiste ». L'approche de l'Andra ne peut pas être jugée sur le seul SEN, qui n'est qu'un des éléments de l'évaluation de sûreté dans le cadre d'une approche déterministe. Conformément au guide

de sûreté de l'ASN et aux pratiques internationales, l'évaluation de sûreté et donc ses conclusions se fondent sur une évaluation de l'ensemble des situations considérées :

- l'Andra a réalisé des analyses de sensibilité en SEN sur l'ensemble des paramètres de transport convectifs ou diffusifs (voir le tome évaluation de sûreté du stockage géologique (TES) du Dossier 2005, §5.5.6) ;
- dans les scénarios d'évolution altérée et dans le scénario de fonctionnement très dégradé des valeurs de ces paramètres très conservatives sont utilisées ;
- une approche probabiliste présentée au §7.6 du TES a été réalisée et présente notamment la distribution du nombre de Peclet obtenue.

3.2.1.1.1 Absence de failles et fractures conductrices

Page 49 « la possibilité d'un transport de radionucléides rapide avec le flux convectif le long des failles et des fractures dans la formation du Callovo-Oxfordien n'est pas considérée dans le scénario de base ou dans des scénarios alternatifs ».

La possibilité d'un transport de radionucléides rapide avec le flux convectif le long des failles et des fractures dans la formation du Callovo-Oxfordien a été considérée par l'analyse qualitative de sûreté (Dossier 2005, TES page 390-391), outil d'identification et de gestion des risques et des incertitudes, utilisé pour construire les scénarios altérés. Deux situations ont ainsi été identifiées permettant de couvrir le cas d'une structure qui aurait échappé aux investigations de surface (i.e. rejet inférieur à 2 m, impédance acoustique et perméabilité peu contrastées par rapport au Callovo-Oxfordien) :

1. La structure est recoupée ou simplement détectée au cours du creusement du stockage. Dans ce cas, ses caractéristiques hydrauliques sont évaluées *in situ*. Suivant le résultat le creusement est poursuivi en scellant la structure si besoin ou arrêté et l'architecture du stockage modifiée grâce à sa modularité.
2. La structure n'est pas vue depuis le fond, car elle est à au moins un mètre de la paroi de l'alvéole la plus proche, et peut donc constituer une voie de transfert privilégiée pour les radionucléides qui l'atteindraient. Dans ce cas, les conséquences de cette situation peuvent être déduites (i) de la dégradation d'un facteur dix de la perméabilité du Callovo-Oxfordien (étude de sensibilité du scénario d'évolution normale) (ii) de la prise en compte d'une perméabilité uniforme de 10^{-12} m/s dans le Callovo-Oxfordien (scénario de fonctionnement très dégradé), (iii) de la situation où la barrière géologique est traversée par un forage intrusif, doté d'une perméabilité très forte. On notera qu'une dégradation uniforme de la perméabilité de la roche ou un forage ouvert atteignant directement l'alvéole ont potentiellement des conséquences bien plus importantes qu'une structure qui, si elle n'est pas détectée, serait d'extension faible.

Page 51 « l'Andra souligne que la principale incertitude des concepts liée aux fractures tient à la quantification de la proportion de fractures ouvertes et de fractures remplies de calcite ».

Le tome 1 du Référentiel de site précise que « grâce au suivi du creusement des puits du Laboratoire souterrain, qui a permis l'accès à des échelles d'observation proches de celles des affleurements, mais *in situ*, dans des terrains non déconfinés, ni altérés par les conditions de surface, il est ressorti que le nombre de fractures conductrices est faible sur le site. »

Cette remarque de l'IEER ne concerne que la fracturation mineure dans les encaissants, et ne saurait en aucun cas concerner le Callovo-Oxfordien. Pour les fractures rencontrées dans le Callovo-Oxfordien, l'IEER reconnaît que ce sont des structures d'extension métrique, mentionnant une «[corrélation positive entre le nombre de fractures et la teneur en carbonates](#)».

Page 51 « En fait, l'Andra souligne qu'il est difficile de quantifier la fréquence de ces fractures et suppose qu'elles n'ont pas d'impact sur les propriétés de la roche hôte ».

Voir le commentaire concernant le début du § 2.1.1 : même dans la zone de fracturation diffuse (exclue de la Zone de Transposition) la perméabilité des fractures mineures dans le Callovo-Oxfordien est telle que les aquifères du Dogger et de l'Oxfordien n'ont pas d'influence l'un sur l'autre.

Néanmoins, l'Andra reconnaît que la genèse de ces fissures et l'origine du colmatage des microfractures dans le Callovo-Oxfordien mériteraient d'être mieux documentées dans le Référentiel de site.

3.2.1.1.2 Homogénéité

Page 53 « Comme indiqué plus haut, la formation hôte est supposée homogène. »...
 « Sur la base de cette hypothèse, l'Andra suppose que les propriétés de transport sont aussi homogènes. »...
 « Plusieurs éléments contredisent l'hypothèse d'homogénéité de l'Andra et suggèrent que la formation hôte est hétérogène en coupe verticale et latéralement dans la zone de transposition et la ZIRA. » ...

L'Andra fait appel à une représentation homogène du Callovo-Oxfordien pour les besoins des calculs de sûreté. Les valeurs utilisées pour les calculs relatifs au Scénario d'Evolution Normale ont été choisies sur la base d'une analyse approfondie de la distribution spatiale de chaque paramètre (verticale, latérale) et des incertitudes métrologiques pour chaque paramètre (voir Dossier 2005 TES §5.2.2.3 pages 220-221).

Par ailleurs, la variabilité spatiale des propriétés du Callovo-Oxfordien est largement détaillée dans les chapitres 10 à 15 du Référentiel de site 2009, en s'appuyant sur un grand nombre de mesures.

Pages 54-55 « Cependant, contrairement à ce qui est très visible dans la Figure 3-4 ci-dessous, la variabilité de la composition minéralogique des séquences moyenne et basse est qualifiée de faible. Cette conclusion est en désaccord avec les résultats présentés dans la Figure 3-4 ».

Les variations de composition minéralogique, allant de l'échelle de la Zone de Transposition jusqu'à l'échelle microscopique, sont analysées en détail dans le Référentiel de site 2009 (§10.1 et 2, §11.2, §12.3). Les figures 10-23 à 10-26 du Référentiel illustrent bien la continuité des dépôts et la reproductibilité spatiale des variations minéralogiques verticales.

Les variations verticales et horizontales ne sont pas de même nature :

- les variations verticales sont le résultat logique des cycles de sédimentation, rythmés par les fluctuations de cycles orbitaux de la Terre, et sur des périodes plus longues, par les cycles de montée puis de baisse du niveau marin relatif à très grande échelle, due au moins en partie à un changement dans la morphologie du bassin,
- les variations horizontales sont la conséquence de différences dans les conditions de dépôt ou dans la nature ou l'intensité des événements géologiques ultérieurs sur la zone étudiée. Conformément à la continuité latérale des séquences, les variations mesurées sont très faibles (Référentiel de site Tome 1 pages 288 et 290), 9 % au maximum dans la séquence inférieure entre les extrémités Est et Ouest de la Zone de transposition que ce soit pour les minéraux argileux, le quartz ou les carbonates, quelques % dans la séquence médiane (pour mémoire la précision des analyses minéralogiques semi-quantitatives est de l'ordre de 5 %).

Par ailleurs, ce qui prévaut vis-à-vis des évaluations de sûreté n'est pas la variabilité de la minéralogie à l'échelle de la zone de transposition, mais les conséquences directes ou indirectes de cette variabilité sur la variabilité des valeurs des paramètres de transfert (De , ω_{acc}) utilisées pour les radionucléides anioniques (^{36}Cl , ^{129}I ...). Ces paramètres, comme les paramètres de transport convectif, ont été mesurés sur toute la hauteur du Callovo-Oxfordien et à différentes échelles (voir ci-après).

Page 56 « L'Andra explique la variabilité minéralogique comme étant le résultat de deux facteurs (outre les variations de faciès sédimentaires) : (1) l'existence possible de hiatus sédimentaires liés aux changements paléogéographiques des conditions de dépôt et (2) au développement des dépressions locales en raison des variations latérales dans les déplacements tectoniques ».

Cette affirmation est erronée. Le Référentiel de site montre clairement que les variations minéralogiques sont contrôlées par la dynamique sédimentaire (variation du niveau marin relatif et modification des cycles orbitaux). La discussion présentée page 270 du Référentiel visait à analyser les processus autres que la dynamique sédimentaire (hiatus ou tectonique synsédimentaire) pouvant être à l'origine d'une variabilité. Elle conclut à leur effet très faible. Ils ne peuvent donc en être la principale cause de variabilité, comme le dit l'IEER.

Page 57 Figure 3-5. Modèle stratigraphique du Callovo-oxfordien et de la plate-forme oxfordienne (Source: Référentiel du Site 2010, Tome 1 Figure 10-40 (p. 314))

Cette figure est extraite du chapitre du Référentiel se rapportant aux formations encaissantes. Elle présente le cadre de dépôts de l'Oxfordien carbonaté.

Sur l'emprise de la zone de transposition, le Callovo-Oxfordien montre une organisation cohérente des environnements de dépôts, qui sont identiques sur la zone, facilement extrapolables d'un forage à l'autre et clairement différenciés de ceux des encaissants de part et d'autre.

Cette remarque de l'IEER est à rapprocher de celle sur les horizons poreux présentée dans le chapitre 2 du rapport de l'IEER, en appui à la discussion sur l' « hétérogénéité » du Callovo-Oxfordien. Peut être y a-t-il eu confusion entre Callovo-Oxfordien et Oxfordien carbonaté, l'IEER ayant pu comprendre, dans différentes parties du rapport, que toute formation datée de l'Oxfordien appartenait au Callovo-Oxfordien.

Page 60 « La composition de l'eau interstitielle a la même tendance (nord-est à sud-ouest) que la composition minérale ».

La composition de l'eau de pore est gouvernée principalement par deux phénomènes :

- des équilibres de solubilité avec certaines des phases minérales dans les argilites (les carbonates étant particulièrement importants). Dans ce type de contrôle, c'est la présence de la phase minérale qui est importante, pas la quantité (le rôle exercé par la calcite serait le même si la roche contenait 1 % ou 90 % de ce minéral, tant qu'il est à l'équilibre avec l'eau de pore). Les phases minérales qui contrôlent les composants principaux de la solution de pore (calcite, dolomite, célestine, pyrite, quartz, illite) sont omniprésentes dans les argilites à l'échelle de la zone de transposition (Gaucher et al., 2006 – C./R. Geosciences 338 p 917-930) ;
- le transfert par diffusion à travers le Callovo-Oxfordien de chlorure (Cl) et de sodium (Na⁺) provenant de la couche salifère du Keuper (en dessous du Dogger). Les teneurs locales de ces deux éléments varient latéralement et verticalement dans le Callovo-Oxfordien en fonction de l'histoire hydrogéochimique de la pile sédimentaire, en particulier les circulations d'eau dans le Dogger (cf. §13.1.3.2 du Référentiel de site 2009).

La composition chimique de l'eau de pore ne varie donc pas avec la composition minéralogique. Verticalement, elle varie peu comme l'ont montré les résultats des analyses faites sur des prélèvements à différentes profondeurs dans le Laboratoire souterrain. Horizontalement, elle varie à l'échelle de la Zone de Transposition en fonction de la salinité des eaux du Dogger sous-jacent, élevée au NE et faible au SO. A partir des concentrations en Cl⁻ et Na⁺ diffusant dans le Callovo-Oxfordien, en tenant compte des équilibres de solubilité (§13.1.3 du Référentiel de site 2009), il a été calculé une force ionique de l'eau de pore variant entre 0,07 et 0,17 M à l'échelle de la Zone de Transposition. Il a été prouvé qu'une telle gamme de forces ioniques n'avait aucune implication sur le transfert des radionucléides dans le Callovo-Oxfordien (Référentiel de site 2009 Tome 1 page 489). La figure ci-dessous montre que, dans la gamme de variation de la force ionique, le coefficient de diffusion effectif et la porosité accessible aux anions ne varie que de quelques pourcents.

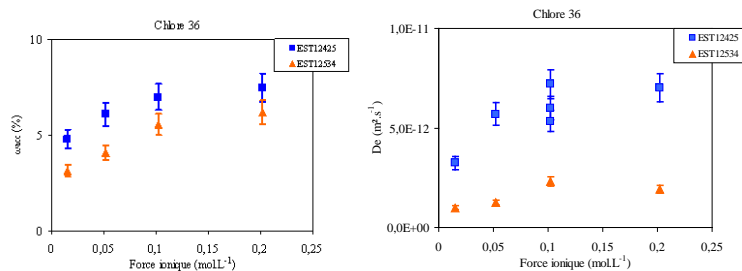


Figure 4-1 Diffusion du chlorure en fonction de la force ionique (Goutelard et al., 2005)

§3.2.1.1.3. Porosité

Page 62 « Les distributions de probabilité de la porosité totale obtenues pour les différents sites sont représentées dans la Figure 3-8 (cf. figure ci-dessous, droite). Comme on peut le voir sur cette figure les distributions sont sensiblement différentes dans les différents emplacements, particulièrement dans la queue supérieure de la distribution. La répartition obtenue pour le site du laboratoire est particulièrement différente de celle des autres emplacements ».

La variabilité spatiale et les caractéristiques de la porosité totale des argilites font l'objet d'une analyse approfondie par l'Andra (§12.3.1 du Référentiel de site 2009). Sur la figure citée par l'IEER n'avaient pas été reportés les résultats des forages réalisés en 2003 sur la Zone de Transposition (voir figure ci-dessous).

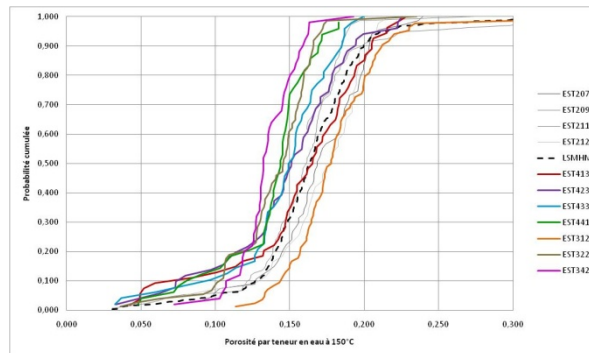


Figure 4-2

Reproduction de la figure 12-14 du Référentiel de site 2009 (Tome 1 page 399) complétée : Distribution cumulée de probabilité pour la porosité déduite de la teneur en eau à 150°C des échantillons de Callovo-Oxfordien pour trois campagne de reconnaissance 2003 (forages 300), 2004 (forages LS) et 2007 (forages 400)

L'examen de la distribution verticale de la porosité dans chaque forage apporte les enseignements suivants :

- les zones les moins poreuses (porosité inférieure à 0,12) sont localisées dans les niveaux ayant des teneurs en minéraux argileux inférieures à 40 % (partie supérieure du Callovo-Oxfordien et banc plus carbonaté à la base de la séquence médiane),
- les zones les plus poreuses (porosité supérieure à 0,18) sont situées au centre de la formation, où la proportion en minéraux argileux est proche de 50 %. L'analyse des diagraphies TCMR montre que les mesures supérieures à 0,25 ne correspondent pas à une réalité in situ, elles peuvent s'expliquer par un plus grand endommagement des échantillons lors du prélèvement. Elles n'apparaissent plus dans aucun forage réalisé en 2007, pour lesquels protocoles ont été améliorés par rapport aux campagnes 2003 et 2004.
- pour les valeurs de porosité entre 0,12 et 0,18, la figure ci-dessous montre une forte corrélation entre la porosité totale et la teneur en minéraux argileux de la roche.

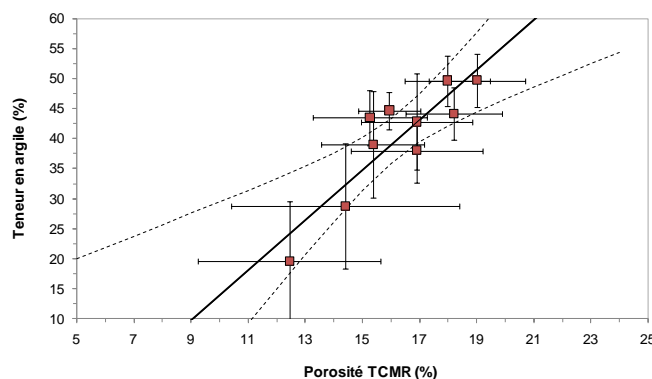


Figure 4-3

Reproduction de la figure 12-6 du Référentiel de site 2009 (Tome 1 page 386) : Evolution de la porosité TCMR en fonction de la teneur en argile dans 10 intervalles régulier de profondeur. Les valeurs moyennes sont calculées à partir de données acquises dans les forages EST413, EST423, EST433 et EST441. Le coefficient de corrélation de la droite de régression est de $R^2=0,77$. Les lignes pointillées indiquent les intervalles de confiance à 95% de la droite de régression

À l'échelle de la Zone de Transposition, les variations de porosité « *semblent indiquer une augmentation de la porosité globalement de l'Est vers l'Ouest avec des valeurs minimales dans les forages EST441 et EST322 et maximales dans les forages EST312, EST413 et ceux du site du laboratoire souterrain* » (p.380, tome 1, Référentiel de site 2009). A l'échelle de la zone de transposition, à niveau stratigraphique identique, la porosité décroît d'environ 2 % d'Est en Ouest, comme le montrent les diagraphies TCMR et les mesures de teneur en eau à 150 °C. Cette décroissance, quoique proche de l'incertitude métrologique, est cohérente avec l'augmentation du recouvrement maximal de la couche d'Est en Ouest à la fin du Crétacé. La répartition obtenue pour le site du Laboratoire souterrain est cohérente avec celle des autres emplacements.

Page 63 « *Porosité cinématique : Selon l'estimation du Référentiel du Site 2010, le volume de l'eau liée varie de 30 à 80 % du volume total des pores. Il est raisonnable de supposer qu'il existe une corrélation entre la fraction d'eau liée (fraction de la porosité cinématique) et la teneur en minéraux argileux. La fraction de la porosité cinématique devrait être plus élevée lorsque la teneur en minéraux argileux est faible parce que l'effet de la charge électrique est moindre* ».

Page 66 « *La valeur retenue pour la porosité cinématique est de 9 %. Les données expérimentales indiquent que les valeurs de porosité cinématique et de porosité accessible aux anions sont très similaires. Par conséquent, les mêmes valeurs moyennes et les mêmes gammes devraient être utilisées pour ces deux paramètres* ».

La porosité cinématique est définie comme la partie du volume d'un milieu poreux dans laquelle circule l'eau sous l'effet d'un gradient de pression (de Marsily, 1986). La porosité cinématique n'inclut pas les couches d'eau (couche dite 'de Stern' et couche diffuse) liées par des interactions moléculaires aux surfaces des minéraux argileux. Elle exclut également la porosité non accessible (pores en cul-de-sac) du fait de précipitations de carbonates dans certains pores. Le premier processus est prépondérant dans les niveaux les plus argileux, le second dans les niveaux plus carbonatés, c'est pourquoi il ne peut y avoir une corrélation nette entre la porosité cinématique et la teneur en minéraux argileux.

La porosité accessible aux anions correspond à la fraction de volume poral où se trouvent les anions du fait de la répulsion électrostatique par les surfaces des minéraux argileux, elles aussi chargées négativement. Il y a des anions dans la couche diffuse, mais à des concentrations diminuant d'autant plus que l'on s'approche de la surface des minéraux argileux. L'extension de la couche diffuse étant inversement proportionnelle à la force ionique de l'eau porale, la porosité accessible aux anions varie en fonction de la force ionique.

Ces deux types de porosité ne correspondent pas aux mêmes phénomènes, même si leurs valeurs sont parfois proches du fait de la quantité relative d'anions dans la couche diffuse par rapport à la quantité totale, notamment dans les pores les plus grands. On ne peut donc attribuer les mêmes distributions aux deux paramètres.

§3.2.1.1.4. Perméabilité

Page 67 Il est écrit « *Les valeurs de conductivité hydraulique obtenues dans les différentes expériences in situ (observations de la pression à long terme) sont résumées dans la Figure 3-10* ».

Cette figure ne représente que les mesures par pulse test dans les forages hors Laboratoire souterrain. Les valeurs obtenues dans les différentes expériences in situ sont compilées dans la figure 3-11.

Le fait que « *la conductivité hydraulique varie en coupe verticale* » a déjà été relevé dans le référentiel de site 2009 (alinéa sous la figure 15-28).

Page 68 L'IEER indique que « *les valeurs utilisées pour la conductivité verticale dans le scénario d'évolution normale sont inférieures à ce qu'elles devraient être à partir des données expérimentales* ». L'Andra prendra en compte l'ensemble des valeurs de perméabilité qualifiées obtenues depuis le démarrage des recherches sur les Callovo-Oxfordien, dont celles compilées dans le Référentiel de site 2009, pour ses calculs de sûreté en vue de la demande d'autorisation de création. Voir aussi les commentaires relatifs à la page 77 et à la page 111.

Page 69 Concernant la figure 3-12, le commentaire « *la variabilité de la perméabilité dans la zone de transposition (le numéro 16 dans la figure), représentée par l'Andra, est significativement inférieure à celles de la plupart des autres sites argileux. Ceci est probablement dû au fait que la variabilité actuelle n'a pas été suffisamment caractérisée.* » se fonde sur des données antérieures à 1994 (compilées par Neuzil US Geological Survey dans son article How permeable are clays and shales? *Water Resources Research*, 1994 vol.30, N°2, p. 145-150) qui présentent de grandes plages de variations, ceci pour deux raisons au moins :

- (i) Elles correspondent à des formations géologiques de grandes extensions par rapport au site de Meuse/Haute-Marne.
- (ii) A cette époque, les incertitudes météorologiques sur les tests hydrauliques étaient plus grandes que celles obtenues plus récemment.

§3.2.1.1.5. Gradient hydraulique

Page 70-71 « Les incertitudes pour le gradient hydraulique sont associées à un certain nombre de facteurs. Par exemple les mesures ont révélé une surpression dans la formation du Callovo-Oxfordien par rapport aux formations encaissantes, de l'ordre de +20 à +30 mètres par rapport à la formation de l'Oxfordien et de +40 à +50 mètres en ce qui concerne la formation du Dogger. À ce jour, aucune explication plausible de ce phénomène n'a été fournie. Un certain nombre d'hypothèses ont été proposées, puis rejetées ».

L'influence de la surpression observée (entre 10 et 20 m d'eau) dans le Callovo-Oxfordien a été prise en compte dans les évaluations de sûreté menées pour le Dossier 2005. Des études de sensibilité au gradient de charge vertical ou à la perméabilité des argilites (horizontale et verticale) ont ainsi été réalisées, dans différents scénarios de sûreté, de manière à évaluer l'influence de la surpression sur le transfert de radionucléides dans le Callovo-Oxfordien et dans le stockage :

- scénario d'Evolution Normale (mobilisant la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien) : perméabilité de référence des argilites multipliée par 10 (horizontale 5.10^{-12} m/s, verticale : 5.10^{-13} m/s) – voir TES, p330 ;
- scénario d'Evolution Altérée « défaut de tous les scellements » (mobilisant la voie de transfert par les ouvrages de stockage) : gradient de charge ascendant vertical multiplié par 5 (valeur de 1 m/m) – Voir TES, p546.

La surpression augmente la composante convective du transport des radionucléides dans le Callovo-Oxfordien ou le stockage. Toutefois, elle reste très limitée, de par la faible perméabilité du Callovo-Oxfordien et le poids important du transfert des radionucléides par diffusion.

Page 71 « La carte des gradients hydrauliques de la Figure 3-13 ne doit être considérée que comme l'une des nombreuses représentations alternatives ».

La représentation des gradients entre les deux aquifères ne résulte pas seulement d'une interpolation des mesures de charge hydraulique dans chaque aquifère, mais aussi de la modélisation des écoulements à l'échelle régionale. Cette représentation est cohérente avec les connaissances de la géologie et des perméabilités dans ces formations.

Page 72 « La représentation de la Figure 3-13 montre que les gradients hydrauliques sont hétérogènes au sein de la zone de transposition. Il y a un fort gradient ascendant dans le nord et le nord-ouest et un gradient descendant dans le sud ».

Les gradients verticaux représentent la différence de charge hydraulique entre les aquifères du Dogger et de l'Oxfordien carbonaté. Sur toute la zone d'étude l'aquifère du Dogger reste sous couverture et sa charge évolue lentement et uniformément de l'Est vers l'Ouest. L'aquifère de l'Oxfordien carbonaté est beaucoup plus proche de la surface, sa charge hydraulique est fortement influencée par la topographie. Il est à l'affleurement à l'est du fossé de Gondrecourt et proche de l'affleurement dans le fond des vallées de la Marne et de L'Ornain qui entaillent profondément le plateau à l'ouest et au nord. Les variations de gradients verticaux s'organisent donc suivant la topographie.

3.2.1.2 Examen des processus de transport dans la roche hôte

Page 77 « Dans le scénario d'évolution normale, l'Andra incorpore la diffusion des contaminants à travers la roche hôte en utilisant les valeurs moyennes pour les paramètres de transport. Cette approche suppose que la roche hôte est homogène et isotrope et qu'il n'y a pas de chemin ou de sens préférentiel pour le transport par diffusion ».

Dans les calculs de sûreté menés pour le Dossier 2005 Argile, les paramètres de transport et de rétention des radionucléides du Callovo-Oxfordien ont été effectivement considérés comme constants, uniformes et isotropes, à l'exception de la perméabilité pour laquelle un coefficient d'anisotropie de 10 entre la perméabilité verticale et la perméabilité horizontale a été retenu. Le choix de cette représentation ne signifiait pas que le Callovo-Oxfordien ne présente pas de variation de ses propriétés d'écoulement, de transport et de rétention sur la zone de transposition, tant en vertical qu'en latéral. L'analyse des données disponibles au moment du Dossier 2005 indiquait des variations, faibles ou locales, de sorte qu'à ce stade, une telle représentation a été considérée comme pertinente.

Néanmoins, il a été tenu compte de ces variations au travers d'études de sensibilité aux valeurs des paramètres, malgré le caractère parfois local de la mesure correspondante.

Les évaluations de performance du Callovo-Oxfordien menées pour le Dossier 2009 ont bénéficié de la campagne de reconnaissance menée entre 2007 et 2008. En couvrant l'ensemble de la Zone de Transposition, les travaux menés ont apporté un éclairage plus précis des variations naturelles des propriétés d'écoulement, de transport et de rétention du Callovo-Oxfordien en vertical et en latéral sur la Zone de Transposition. Les mesures ont montré des variations, parfaitement corrélables avec les caractéristiques pétrophysiques du Callovo-Oxfordien, mais avec des amplitudes faibles et le plus souvent inférieures à l'incertitude de mesure. Plus particulièrement, ces travaux ont ainsi permis de réduire l'incertitude sur le facteur d'anisotropie de la perméabilité (aujourd'hui 2 à 3), de mieux corréler les variations faibles de perméabilité avec les unités litho-stratigraphiques (plus ou moins carbonatées) du Callovo-Oxfordien, et de souligner les très faibles variations verticale et latérale des coefficients de diffusion. Il n'y a donc pas de variations aléatoires des paramètres en tout point du Callovo-Oxfordien, et in fine il n'y a pas de zones/voies préférentielles de transport dans la formation hôte du Callovo-Oxfordien sur la zone de transposition.

Ces données ont été explicitement prises en compte pour évaluer de manière précise la performance de confinement du Callovo-Oxfordien sur la zone de transposition, dans le cadre du choix de la ZIRA. Différentes localisations couvrant toute la Zone de Transposition ont été définies. Pour chacune d'entre elles, sur la base des données expérimentales, des profils verticaux de la perméabilité, de la diffusion et de la porosité du Callovo-Oxfordien ont été spécifiquement définis, et il a été tenu compte de l'épaisseur précise du Callovo-Oxfordien en ce point. Pour la perméabilité, il s'agit même de profils non uniformes, en lien avec la corrélation établie avec le découpage litho-stratigraphique du Callovo-Oxfordien. Ces profils et la discussion associée sont présentés dans le rapport Andra n° C.NT.AEAP.09.0064A (voir § 2 et 3, p10-33).

Les résultats des évaluations de la performance du Callovo-Oxfordien sur la zone de transposition présentés dans ce même rapport montrent que les indicateurs de performance varient très peu (écart de quelques %) d'une localisation à une autre. Ils confortent ainsi les résultats des évaluations de sûreté menées pour le Dossier 2005, et en particulier la pertinence d'une représentation uniforme des propriétés du Callovo-Oxfordien sur la zone de transposition.

3.2.1.2.1 Nombre de Péclet

Page 79 « Toutes les valeurs des paramètres utilisées dans le calcul de nombre de Péclet correspondent aux valeurs moyennes, à l'exception du gradient hydraulique pour lequel la valeur maximale (0,4 m/m) a été utilisée. Aucune valeur limite ou estimation probabiliste n'est fournie pour rendre compte de la variabilité des paramètres de transport discutés dans la section 3.2.1.1. Par conséquent, l'applicabilité de cette conclusion aux conditions globales à l'intérieur de la zone de transposition et de la ZIRA n'est pas claire ».

Pour le Dossier 2005, une analyse de sensibilité multiparamétrique de type probabiliste Monte-Carlo a été menée sur les paramètres hydrauliques, de diffusion et de rétention du Callovo-Oxfordien, de l'EDZ autour des ouvrages, et des matériaux du stockage (voir TES, § 7.6, p655-686).

Des distributions de probabilité ont été ainsi définies. Il s'agit pour l'essentiel de lois non uniformes déterminées à partir de l'importante base de données de l'Andra (par exemple 70 mesures de la perméabilité horizontales dont 12 en forages), ce qui a permis ainsi de bien identifier les poids relatifs de chaque valeur. Par exemple, pour la perméabilité, la distribution de probabilité retenue est une loi log-normale, avec une moyenne proche de la valeur de référence ($5 \cdot 10^{-14}$ m/s), et une valeur haute de $2 \cdot 10^{-12}$ m/s (de probabilité faible) correspondant à une seule mesure.

L'analyse de sensibilité multiparamétrique avait 2 objectifs :

- évaluer la distribution des différents indicateurs de performance (nombre de Péclet en différents points, en particulier sur toute l'épaisseur de Callovo-Oxfordien entre le stockage et le toit du Callovo-Oxfordien, débits molaires au toit du Callovo-Oxfordien au droit du stockage ou en sortie du stockage par les des ouvrages de liaison surface - fond etc.) vis-à-vis des incertitudes et variations des données d'entrée,
- identifier et hiérarchiser les paramètres dont l'incertitude (i.e. variation) influe le plus sur les indicateurs de performance.

Une distribution de la valeur du nombre de Péclet à l'échelle de l'épaisseur du Callovo-Oxfordien entre le stockage et le toit du Callovo-Oxfordien a été ainsi établie (voir TES, § 7.6, p 668) afin d'évaluer les importances relatives des processus de transport (convection et/ou diffusion) sur toute l'épaisseur du

Callovo-Oxfordien depuis le stockage jusqu'au toit du Callovo-Oxfordien. La courbe obtenue est donnée à la figure ci-dessous, avec les trois domaines de dominance ou de codominance des processus de transport par convection et par diffusion.

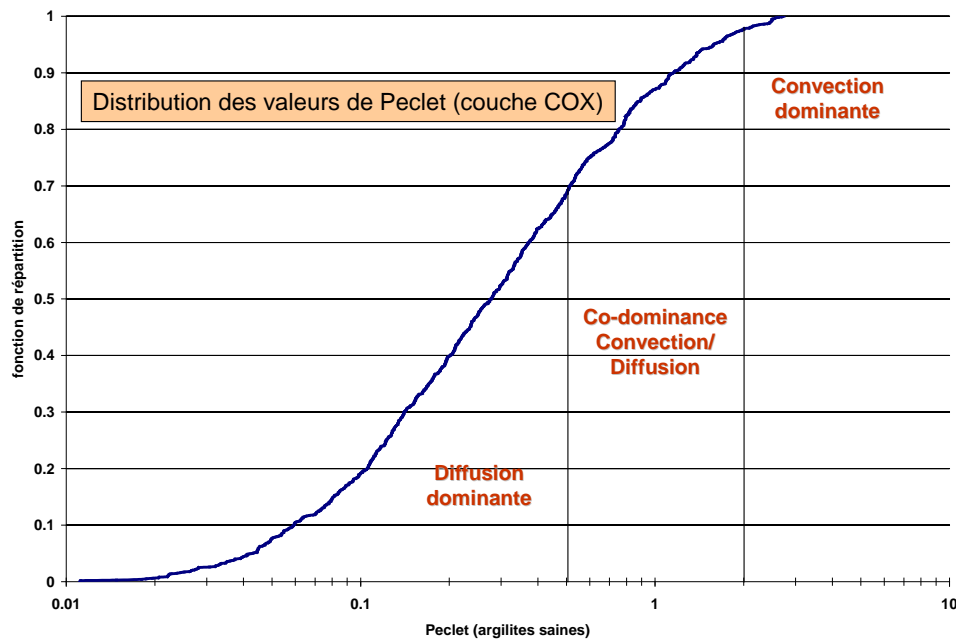


Figure 4-4 *Reproduction de la figure 3.1-2 de C.RP.ACSS.05.0022 « Distribution des Peclets de couche des argilites du Callovo-Oxfordien ».*

Un travail similaire a été mené par l'IEER, sur la base de trois évaluations différentes considérant des types de distributions de probabilité et des bornes de variation spécifiques : une première avec des distributions de probabilité non uniformes, et deux autres avec des distributions uniformes.

Les distributions de probabilité non uniformes retenues par l'IEER sont proches de celles de l'Andra : lois de distribution similaires (par exemple une loi log-normale pour la perméabilité), domaines de variation peu différents. La comparaison entre la distribution des nombres de Péclet déterminée par l'Andra et celle de l'IEER (voir Figure 3-20 p.84) indique des tendances similaires : le domaine de convection dominante est très minoritaire (de l'ordre de 10 %) et il correspond en outre à des valeurs plutôt faibles du nombre de Péclet (au plus 3 à 4), c'est-à-dire à une convection légèrement dominante (du fait d'une faible perméabilité du Callovo-Oxfordien).

En revanche, l'Andra considère que les lois de distribution uniformes des paramètres choisies par l'IEER ne sont pas justifiées au regard des données disponibles. Ce choix arbitraire conduit à surestimer l'évaluation du nombre de Péclet pour les raisons suivantes :

- la première loi de distribution uniforme (voir Figure 3-17 p.81) reprend les bornes de variation des paramètres de l'Andra, mais en affectant le même poids à toutes les valeurs, ce qui n'est pas conforme aux données. Il s'agit d'une approche très pénalisante qui a pour conséquence d'augmenter le domaine de variations du nombre de Péclet et de tirer des conclusions erronées sur l'importance du domaine de prédominance de la convection dans le Callovo-Oxfordien,
- la seconde loi de distribution uniforme (voir Figure 3-18 p.82), considère des bornes d'incertitudes plus grandes que celles évaluées par l'Andra à partir d'une analyse et d'une interprétation des données hydro-dispersives par l'IEER (cf. § 3.2.1.1). L'IEER justifie le fait de prendre des bornes d'incertitudes plus grandes que celles évaluées par l'Andra par l'argument que « [les plages de données pour certains paramètres ont été définies par l'Andra de façon plus étroite que la variabilité et l'incertitude observées](#) », ce qui ne correspond pas à la réalité.

3.2.1.2.2 Interprétation des données sur les traceurs naturels

L'analyse de l'IEER se concentre sur les données concernant le chlorure dans les forages EST212 et HTM102. Des comparaisons sont faites avec les résultats obtenus par Mazurek et al. (2009).

Page 91 « En résumé, les données sur les traceurs naturels fournissent une preuve suffisante que le transport par convection peut-être comparable au transport par diffusion dans certaines zones de la zone de transposition. Elles confirment également que les processus de transport ont des magnitudes et des directions différentes selon les zones. Il semble que cela soit principalement lié à l'hétérogénéité des propriétés de transport dans la formation Callovo-Oxfordienne ».

A l'inverse des conclusions de l'IEER, le document « Natural tracer profiles across argillaceous formations : the CLAYTRAC project », AEN radioactive Waste Management 2009 (pages 165-166) indique que l'ajout du transport par convection ascendante ou descendante ne permet pas de mieux représenter les données existantes, que le cas de la diffusion seule.

Par ailleurs, les évaluations de sûreté menées par l'Andra pour le Dossier 2005 Argile prennent systématiquement en compte le transport par convection et le transport par diffusion, pour tous les scénarios et toutes les sensibilités. L'Andra n'a pas fait de choix *a priori* sur le caractère dominant ou non des deux processus. Comme le souligne la distribution du nombre de Peclet présentée plus haut, des situations étudiées par l'Andra présentent une codominance entre la convection et la diffusion.

Concernant les différentes directions d'écoulement et de transport vers les exutoires, cela ne concerne pas le Callovo-Oxfordien, mais les formations encaissantes sus-jacentes, notamment l'Oxfordien. Ceci est développé plus loin dans les commentaires relatifs au § 3.2.3.

3.2.2 Formations encaissantes

Page 91-92 « Les flux de contaminants qui quittent la roche hôte en haut ou en bas... Les trajets d'écoulement seront différents pour les différents endroits dans la zone de transposition et la ZIRA ».

Les travaux hydrogéologiques menés pour le Dossier 2005 Argile ont montré des trajectoires différentes dans l'Oxfordien sur la zone de transposition, tant à l'actuel que sur le prochain million d'années. Ceci a été explicitement pris en compte dans les évaluations de sûreté du Dossier 2005 Argile.

3.2.3 Analyse de l'évaluation de sûreté

3.2.3.1 Résumé de l'analyse d'évaluation de sûreté de l'Andra

Page 94 « Dans cette section, seul le scénario d'évolution normale et les analyses de sensibilité connexes sont examinés, car ce scénario représente la situation la plus probable. Les scénarios d'évolution altérée (défaut de conteneurs, défaillance d'un scellement, forage intrusif) n'ont pas été considérés à cause des deux raisons suivantes : (1) un important effort supplémentaire serait nécessaire pour passer en revue l'intégralité de toutes les situations, les questions liées aux probabilités des scénarios, et la mise en œuvre de la modélisation et (2) ces scénarios devraient avoir une très faible probabilité d'occurrence et des effets potentiellement faibles sur les performances du stockage (en supposant que les probabilités et les paramètres du scénario aient été définis correctement) ».

Pour porter un jugement sur la démarche de l'Andra, il est nécessaire de prendre en compte aussi les scénarios altérés. En effet, conformément aux préconisations du Guide de Sûreté (ASN, 2008), ils permettent d'« étudier un nombre limité de situations représentatives des différentes familles d'événements, de séquences ou de combinaisons d'événements, pour lesquelles les conséquences associées sont les plus élevées parmi l'ensemble des situations envisageables. Cette approche repose sur une sélection d'événements considérés comme raisonnablement envisageables et représentatifs des risques ». L'Andra rappelle que, conformément au Guide de Sûreté, la probabilité d'occurrence de chaque scénario post fermeture n'est pas quantifiée et aucune analyse probabiliste de risque (distribution de probabilité de la dose ou pondération d'une dose d'un scénario par sa probabilité d'occurrence) n'est menée en post fermeture. Les impacts radiologiques associés à chaque scénario sont déterministes.

Page 95 « Lors de la rencontre entre l'Andra et l'IEER le 16 février 2011, l'Andra a expliqué que l'exutoire de l'Ornain a été déterminé à partir des résultats de simulations d'érosion à la fin d'une période d'un million d'années. C'était, à partir des résultats de la modélisation, le seul endroit où de l'eau souterraine apparaissait à la surface. Si l'on prend en compte un certain nombre d'incertitudes liées à une période d'un million années, on peut contester qu'un seul endroit puisse être déterminé.

Trois points d'exposition ont été pris en compte dans les aquifères carbonatés supérieurs, deux emplacements sont différents dans le modèle actuel et dans le modèle à un million d'années. Un

emplacement (exutoire Saulx) reste le même. Les emplacements et les voies d'écoulement utilisés dans ces deux modèles sont présentés dans la Figure 3-25 »

On trouvera dans le Tome 3 du Référentiel de site (pages 221-222) les résultats des modélisations de l'érosion. Différents cas ont été traités en fonction des valeurs possibles d'incision des vallées, selon les hypothèses sur la surrection tectonique et les incertitudes concernant l'extrapolation des données sur l'évolution des profils en long des cours d'eau au cours du Quaternaire.

La mise à l'affleurement des calcaires oxfordiens au fond de la vallée de l'Ornain et de ses affluents découle de la structuration du sous-sol (remontée nord du synclinal de Savonnières). Son extension peut varier suivant les hypothèses, mais il reste dans tous les cas isolé et ne se raccorde pas aux affleurements du plateau qui s'étend au Sud-Est.

Ce n'est pas le seul endroit où l'érosion a des effets sur la mise à l'affleurement des calcaires oxfordiens :

- au fond de la vallée de la Marne et des vallées affluentes les zones d'affleurement se déplacent et s'étendent,
- les affleurements du plateau au Sud-Est s'étendent à la partie amont de la vallée de la Saulx.

Dans les deux cas ce ne sont pas de nouveaux exutoires.

Les différents exutoires représentés dans l'analyse quantitative de sûreté du Dossier 2005 Argile (voir le TES, § 5.3.2.5, p. 263-270), sont des pompages d'alimentation en eau potable dans lesquels un groupe de référence collecte de l'eau éventuellement contaminée, pour ses besoins en eau de boisson et son exploitation agricole. Les exutoires ont été définis en privilégiant les zones proches de l'emplacement du stockage (Laboratoire souterrain par convention en 2005), où la ressource en eau est suffisante pour envisager un pompage en eau pour alimenter le groupe de référence. L'Andra a fait réaliser un inventaire des ressources en eau disponibles sur le secteur, sur lequel a été basée la localisation des puits de pompage (exutoires). Cela a ainsi conduit à identifier les exutoires potentiels suivants :

- (i) un pompage dans la vallée de l'Ornain, dans l'horizon poreux Hp5-7, quand son affleurement constitue des conditions favorables à une exploitation ;
- (ii) un pompage dans les calcaires du Barrois, identifiés comme la seule ressource en eau possible au niveau de la Zone de Transition ;
- (iii) un pompage dans la vallée de la Saulx, au niveau d'une zone de fracturation diffuse représentée de manière enveloppe par une zone à forte perméabilité.

Dans la configuration hydrogéologique actuelle, seuls les deux derniers exutoires peuvent être envisagés. Dans la configuration modélisée à un million d'années les trois exutoires sont pris en compte.

Page 96 « Deux approches ont été utilisées pour estimer les concentrations de contaminants aux points d'exposition. Dans la première approche, les concentrations de contaminants ont été calculées comme le rapport entre le flux de contaminants et le débit de pompage du puits (exutoire Ornain dans le modèle dans un million d'années). Dans la seconde approche, les concentrations maximales dans le panache de contamination à l'emplacement du puits ont été utilisées (exutoire de Saulx) ».

Il s'agit d'une mauvaise interprétation. L'Andra a en réalité fait l'inverse. En lien avec la définition des exutoires indiqués précédemment, les concentrations aux exutoires ont été définies comme suit :

- pour les exutoires « pompage dans la vallée de l'Ornain », et « pompage dans les calcaires du Barrois », il s'agit des concentrations maximales évaluées par la simulation, dans la zone où la ressource en eau est suffisante pour définir un pompage d'alimentation en eau. Pour l'exutoire du Barrois, il a même été défini de manière enveloppe une position du pompage variable dans le temps, prenant en compte l'évolution du panache de solutés, aux endroits de concentration maximale,
- pour l'exutoire « pompage dans la vallée de la Saulx », compte tenu d'une discontinuité de perméabilité liée aux choix de représentation de la zone de fracturation diffuse, une hypothèse enveloppe a consisté à « rabattre » toute la quantité de radionucléides arrivant dans la zone de

fracturation diffuse vers un pompage d'eau conventionnel, et établir ainsi une concentration pompée maximale.

Page 99 : « Dans la Figure 3-26 on peut voir que les deux principaux exutoires sont situés à la bordure du panache de contamination.... L'Andra n'a pas envisagé une possibilité d'emplacement dans le panache de contamination,... ».

Les deux principaux exutoires sont situés dans des endroits où la ressource en eau est suffisante pour établir un pompage d'alimentation en eau pour un groupe de référence (communauté agricole). *De facto*, les deux principaux exutoires se trouvent en bordure de panache là où une ressource en eau existe. Les endroits de plus forte concentration dans le panache sont liés à une plus faible dilution des solutés du fait des caractéristiques hydrauliques de l'aquifère considéré (faible débit). La faible productivité en eau de cet aquifère ne permet pas de constituer une ressource en eau suffisamment productive (exemple un pompage d'alimentation en eau) et donc de le considérer comme un exutoire

Pages 99-100 « L'Andra a effectué son analyse en faisant varier un paramètre à la fois. Seules deux de ces analyses (propriétés de rétention des argilites et voies d'écoulement dans les formations sus-jacentes) ont été réalisées pour l'évaluation de la dose maximale. Les autres analyses se sont limitées à comparer les flux sortant de la formation Callovo-Oxfordienne. Une évaluation probabiliste, avec des distributions de paramètres entièrement représentées et variant simultanément dans des tirs de la méthode Monte Carlo n'a pas été réalisée ».

Dans le cadre de la gestion des incertitudes, une analyse probabiliste de type Monte-Carlo a été menée pour le Dossier 2005, sur les paramètres de transfert et géochimiques du Callovo-Oxfordien, de l'EDZ, et des matériaux du stockage (voir TES, § 7.6, p655-686).

Les distributions de probabilités de chaque paramètre ont été établies à partir de la base des connaissances acquises par l'Andra et du retour d'expérience à l'international. Par ailleurs, afin de garantir la cohérence physique des jeux de données échantillonnés, des corrélations de type statistique et des contraintes de type inégalités ont été appliquées.

Les études probabilistes ont porté sur des indicateurs de type débit molaire en sortie du Callovo-Oxfordien, et des puits d'accès. Il s'agit de vérifier la robustesse des fonctions assurées par le stockage, notamment que le Callovo-Oxfordien reste la voie de transfert prédominante, y compris dans le cas des scénarios altérés.

3.2.3.2 Évaluation des analyses de sûreté

Page 102 « Les autres préoccupations à la suite de la rencontre entre l'Andra et l'IEER le 16 février 2011 sont : (1) l'exclusion de l'utilisation des eaux souterraines de l'analyse de sûreté et (2) la non prise en compte de l'incertitude liée à l'érosion sur une période de plus d'un million années quand l'emplacement de l'exutoire de l'Ornain a été déterminé ».

(1) : l'Andra prend en compte le pompage d'eau souterraine, voir le commentaire relatif à la page 99 ;

(2) : voir le commentaire relatif à la page 95.

Pages 104-105 « Le code informatique GoldSim est utilisé pour mettre en oeuvre ce modèle. Ce code fournit des outils pour la modélisation probabiliste des principaux processus de transport relatifs aux contaminants toxiques et radioactifs.

Les résultats des simulations basés sur 25 tirs sont présentés dans la Figure 3-28. Les doses moyennes maximales totales sont présentées pour les trois cas suivants: (1) seulement la diffusion (2) la diffusion et la convection dans la formation du Callovo-Oxfordien, et (3) la diffusion et la convection dans la formation du Callovo-Oxfordien et la convection dans la formation de l'Oxfordien ».

L'Andra estime que la réalisation de 25 tirages aléatoires de type Monte-Carlo sur la base de 13 paramètres incertains ne donne pas un intervalle de confiance satisfaisant, et que l'analyse statistique des résultats obtenus ne peut s'en tenir qu'à des grandes tendances approximatives. A titre comparatif, l'Andra a procédé, dans le cadre de son étude probabiliste en 2005, à une évaluation du nombre de tirages aléatoires nécessaires pour stabiliser la distribution des indicateurs de performance et obtenir un intervalle de confiance satisfaisant. Ce nombre est de 1 000. C'est ce qui a été retenu par l'Andra pour son approche probabiliste (voir TES page 665). En outre, l'Andra constate qu'aucune corrélation, ni contrainte physique, n'a été considérée entre les paramètres d'entrée, ce qui a pour

conséquence d'élargir la variabilité du résultat par la considération de tirages incohérents et même impossibles d'un point de vue physique (par exemple, une grande perméabilité avec une petite diffusion).

Page 105 « La moyenne des doses totales ainsi que les limites supérieure et inférieure sont indiquées dans la Figure 3-29 pour le cas de diffusion et convection dans la formation Callovo-Oxfordienne. Comme on peut le voir sur cette figure, les incertitudes dans les paramètres d'entrée aboutissent à une incertitude sur la dose maximale totale d'environ 5 ordres de grandeur, soit d'un facteur 100 000. Cette incertitude est très supérieure à celle de l'Andra (d'un ordre de grandeur, soit un facteur dix, comme abordé en détail dans la section 3. 2.3.1) Notamment, la gamme des incertitudes de l'Andra est d'un facteur 2 quand le site de stockage est situé dans le laboratoire et de 10 quand il est situé au milieu de la zone de transposition alors que nos résultats indiquent une gamme d'incertitude de 5 ordres de grandeur, soit d'un facteur 100 000 ».

Ces résultats de l'IEER sont surprenants pour plusieurs raisons :

- En considérant les extrema possibles des temps caractéristiques de transfert (convectif / diffusif) dans la couche d'argile, sans prendre en compte de dépendances entre les paramètres, on obtient les formules suivantes :

$$T_{\min} = \min (\{T_{d_{\min}}\}; \{T_{c_{\min}}\}) = \min (\{L_{\min}^2 \cdot w_{\min}^d / De_{\max}\}; \{(L_{\min} \cdot w_{\min}^{acc}) / (K_{\max} \cdot GradH_{\max})\})$$

$$T_{\max} = \max (\{T_{d_{\max}}\}; \{T_{c_{\max}}\}) = \max (\{L_{\max}^2 \cdot w_{\max}^d / De_{\min}\}; \{(L_{\max} \cdot w_{\max}^{acc}) / (K_{\min} \cdot GradH_{\min})\})$$

Avec : T_{\min} : temps caractéristiques de transfert minimum dans la couche d'argile du Callovo-Oxfordien

T_{\max} : temps caractéristiques de transfert maximum dans la couche d'argile du Callovo-Oxfordien

T_d, T_c : temps de transfert convectif diffusif et convectif

L : garde d'argile

w^d, w^{acc} : porosités accessibles à la diffusion et cinématique

$De, K, GradH$, coefficient de diffusion effectif, perméabilité et gradient de charge ascendant

L'application numérique, prenant en compte les valeurs indiquées à la page 104 du rapport IEER, donne les temps caractéristiques suivants : $T_{\min} = 10^6$ ans ; $T_{\max} = 6,8 \cdot 10^7$ ans, correspondant à ceux calculés par l'Andra (voir figure ci-dessous).

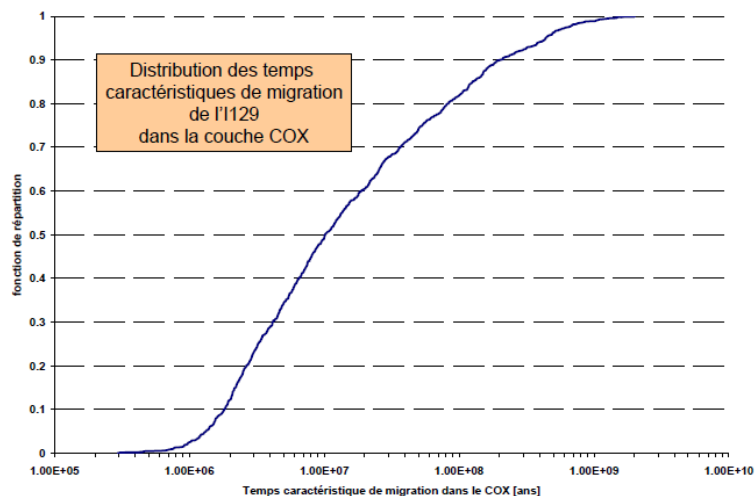


Figure 4-5

Distribution des temps caractéristiques de migration de la couche d'argiles du Callovo-Oxfordien

En considérant comme linéaire le transfert dans la couche du Callovo-Oxfordien, sans décroissance radioactive (dose pilotée par l'I129, non sorbé et soluble), on admet que la variabilité des indicateurs de débit molaire Φ en sortie du Callovo-Oxfordien est celle des temps caractéristiques de transfert.

$$\rightarrow (\Phi_{\text{CALLOVO-OXFORDIEN}}^{\text{max}} / \Phi_{\text{CALLOVO-OXFORDIEN}}^{\text{min}}) \sim (T_{\text{max}} / T_{\text{min}}) \sim 70.$$

La variabilité des indicateurs en sortie de la couche d'argilites du Callovo-Oxfordien est donc au plus d'un facteur 70 avec les données prises par l'IEER. Cette valeur est du même ordre de grandeur que celle que trouve l'Andra dans son analyse probabiliste (cf TES, Figure 7.6-16 p. 681/831).

En poursuivant cette analyse sur les autres paramètres directement linéaires à la dose et pris en compte par l'IEER dans son évaluation (taux d'ingestion et débit de pompage du puits), et en supposant comme indiqué à la page 105, et sur la Figure 3-28, que les paramètres de l'Oxfordien sont très peu influents (« [Cela est conforme à la conclusion de l'Andra concernant la faible importance des paramètres de transport des formations sus-jacentes](#) »), la variabilité de la fonction de transfert liant les indicateurs en sortie du Callovo-Oxfordien à la dose serait donc égale à la multiplication des ratios (taux ingestion max/taux d'ingestion min)*(débit pompage max/débit de pompage min), soit une valeur de 3.

L'Andra calcule que, sur la base des hypothèses enveloppes considérées par l'IEER dans son analyse multiparamétrique, la variabilité de la dose totale est d'un facteur 200 et non d'un facteur 100 000 comme indiqué dans le document de l'IEER.

Par ailleurs, les temps d'atteinte des maxima de dose sont bien au-delà du million d'années dans les évaluations de l'IEER, d'après les figures 3-28 et 3-29, alors que les calculs menés par l'Andra ont toujours conduit à des temps d'atteinte des maxima de dose largement inférieurs au million d'années, de l'ordre de 200.000 à 300 000 ans en évolution normale, et encore moins dans les études de sensibilité aux paramètres de transport. Ceci est une illustration supplémentaire du caractère non optimiste des évaluations de sûreté de l'Andra.

3.3 Résumé

3.3.1 Propriétés de transport de la roche hôte

Page 111 point 4. Perméabilité (conductivité hydraulique) (examinée dans la section 3.2.1.1.4) : « [L'approche adoptée par l'Andra a été de prendre la fourchette de la conductivité hydraulique horizontale et d'en déduire la fourchette correspondante de la conductivité hydraulique verticale en utilisant le facteur d'anisotropie de 10](#) ».

Le domaine de valeur de conductivité hydraulique verticale présenté dans le Dossier 2005 Argile a été obtenu à partir des mesures sur échantillons faites perpendiculairement à la stratification. Les mesures en forage (quelle que soit son inclinaison par rapport à la verticale) privilégient quant à elles la perméabilité horizontale. 49 données disponibles à la fin 2004 ont été utilisées pour cette analyse.

Le domaine de conductivité hydraulique horizontale a été obtenu à partir des valeurs déduites de tests en forages, et de mesures sur échantillons parallèlement à la stratigraphie. 72 données ont été utilisées.

Les nouvelles données de perméabilité acquises depuis 2005 ont permis d'améliorer la précision sur l'anisotropie entre la perméabilité horizontale et la perméabilité verticale (le facteur d'anisotropie varie désormais entre 2 et 3, au lieu de 10).

« [Par ailleurs, la fourchette de la conductivité hydraulique horizontale était de \$5 \times 10^{-14}\$ m/s à \$5 \times 10^{-13}\$ m/s, ce qui est nettement inférieur à la dispersion des données observées](#) ».

La valeur de référence prise pour la conductivité hydraulique horizontale pour les évaluations de sûreté est de 5×10^{-13} m/s avec une sensibilité à 10^{-12} m/s.

Page 112 point 6. Diffusion effective (examinée dans la section 3.2.1.1.6) : « [La plupart des tests de diffusion avec du chlorure et de l'iodure ont été réalisés en utilisant des solutions d'une force ionique de 0,05 M et 0,10 M tandis que la force ionique peut atteindre 0,17 M dans la partie nord-est de la zone de transposition \(à proximité de la bordure nord de la ZIRA\)](#). »

La figure 4.1 montre que la plage de force ionique testée lors des essais de diffusion est de 0,05 à 0,20 M. Au-delà de 0,10 M la force ionique n'a plus d'effet sur le coefficient de diffusion.

Dernier paragraphe : « La valeur supérieure du coefficient de diffusion effective des anions prise en compte dans l'analyse de sensibilité ($1.0 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$) est inférieure au coefficient de diffusion déterminé dans l'un des échantillons du forage EST413 situé juste au nord de la ZIRA ($1.5 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$) ».

Voir le commentaire relatif à la page 77 concernant les évaluations de performances réalisées en 2009.

L'Andra prendra en compte l'ensemble des valeurs de paramètres qualifiées obtenues depuis le démarrage des recherches sur le Callovo-Oxfordien, dont celles compilées dans le Référentiel de site 2009, pour ses calculs de sûreté en vue de la demande d'autorisation de création

3.3.2 Examen des processus de transport dans la roche hôte

Traité au §3.2.1.2

3.3.3 Analyse de la sûreté

Page 113 « L'analyse de la sûreté est examinée dans la section 3.2.3.1. L'examen des analyses de sûreté menées par l'Andra et résumées à la section 3.2.3.1 soulève les problèmes suivants :

Le scénario d'évolution normale et les analyses de sensibilité associées s'appuient sur des propriétés d'homogénéité et d'isotropie du transport dans la formation du Callovo-Oxfordien alors que ces propriétés sont en fait l'hétérogénéité et l'anisotropie ».

Voir les réponses faites au § 3.2.1.2 « Examen des processus de transport dans la roche hôte ».

Page 114 « ...

Aucune analyse de sensibilité n'a été effectuée pour évaluer les impacts des incertitudes dans les paramètres d'exposition (par ex. taux d'ingestion de l'eau potable, débits de pompage des puits, taux de consommation alimentaire et autres).

La majorité des analyses de sensibilité ne sont pas effectuées pour les calculs de dose totale. Par conséquent, des comparaisons d'impact adéquates ne peuvent être faites.

Les impacts potentiels des incertitudes des paramètres du modèle ont été évalués par les analyses de sensibilité et aucune évaluation probabiliste de la dose n'a été faite. En conséquence, l'impact estimé d'un ordre de grandeur (d'un facteur dix) sur la base des études de sensibilité pourrait ne pas être représentatif de l'éventail possible ».

Pour examiner les processus de transport dans la roche hôte, il est évidemment préférable de faire reposer l'analyse de sensibilité sur des indicateurs de sûreté intermédiaires, notamment les débits molaires sortant du stockage et de la formation hôte qui présentent l'avantage de s'affranchir des incertitudes liées aux voies de transfert hors du milieu géologique.

« Seule une analyse de sensibilité a examiné le cas où toutes les voies d'écoulement à partir du stockage conduisent à un seul point d'exposition. Ce scénario a abouti à la dose maximale totale la plus élevée. Dans tous les autres cas, la masse du contaminant a été partagée entre 3 exutoires différents, ce qui a abouti à un « étalement » de la dose totale et, en conséquence, à des valeurs inférieures. »

La démarche suivie par l'Andra pour le Dossier 2005 est la suivante. Dans la logique d'un dossier de faisabilité (sans jugement *a priori* sur la localisation et l'orientation du stockage) et afin de couvrir l'ensemble des architectures de stockage possibles en lien avec les scénarios de gestion des combustibles usés, il a été choisi (voir TES 5.3.1.2 pages 224-225) :

- de représenter de manière conventionnelle non pas le stockage en grand mais les zones de stockage afférentes à chaque type de colis (HA, MAVL et combustibles usés) prises séparément, tout en tenant compte des effets hydrauliques de la présence des autres zones de stockage ;
- de retenir en référence la position du Laboratoire souterrain, et de mener une sensibilité à la position du stockage sur la zone de transposition.

Les calculs ont été menés avec un modèle représentatif du modèle hydrogéologique de site. Compte tenu de sa grande extension, seule la zone de combustibles usés de type UOX/URE) est concernée par des trajectoires sollicitant les trois exutoires (dont celui de l'Ornain). Ceci ne résulte donc pas d'un choix délibéré, mais d'une réalité géographique. Si les zones de stockage (MAVL, HA, CU3) ne mettent pas en jeu l'exutoire de la vallée de l'Ornain, cela est dû à leur extension est beaucoup plus réduite.

« La dose maximale totale la plus élevée pour le colis de référence CU1, de 0,19 mSv/an a été estimée pour le scénario dans lequel le stockage est situé juste au nord de la ZIRA. Selon l'Andra cette estimation peut doubler et dépasser la limite réglementaire de 0,25 mSv/an si les propriétés de transport conservatrices de la roche hôte sont utilisées au lieu des moyennes. Il est important de noter que cela est vrai pour tous les types de déchets basé sur la conclusion de l'Andra indiquant : « *une atténuation légèrement plus importante pour les concepts de déchets B que pour les concepts de déchets C et de combustibles usés.* ». Cependant, un terme source bien défini et une analyse mise à jour prenant en compte le combustible usé est tout à fait nécessaire. »

Les résultats de 2005 montrent peu de différence entre la position sur le site du Laboratoire de Meuse/Haute-Marne et la position au nord-ouest, du seul point de vue du transfert dans les encaissants. Un tel résultat s'explique par des exutoires proches du stockage interceptant l'ensemble des flux de radionucléides, ce qui rend l'impact peu dépendant des caractéristiques détaillées du modèle hydrogéologique.

« Les deux principaux exutoires pris en compte pour l'évaluation de la dose sont situés en bordure du panache du contributeur principal (I129) ce qui pourrait avoir comme conséquence une sous-estimation des doses totales. »

Voir la réponse faite au § 3.2.3.1

« Une analyse de sûreté probabiliste simplifiée effectuée avec les fourchettes de paramètres cohérentes avec celles qui sont définies par l'Andra indique que ces incertitudes dans les paramètres d'entrée aboutissent à une incertitude dans la dose maximale totale d'environ 5 ordres de grandeur (d'un facteur 100 000). La fourchette des doses totales maximales définies par l'Andra comme étant d'un ordre de grandeur, soit un facteur 10 (ou d'un facteur 2 quand le site de stockage est situé dans le laboratoire souterrain) pourrait être sous-estimée. »

L'analyse de l'Andra, sur la base des évaluations et des valeurs de l'IEER, conduirait à retenir au plus un facteur 200 plutôt qu'un facteur 100 000 (cf. réponses détaillées dans le § 3.2.3.2).

4.3 Chapitre 4 - Mécanique des roches

4.3.1 Conclusions

Conclusion 1. « **Un optimisme omniprésent** : L'interprétation par l'Andra des phénomènes complexes portant sur les performances du stockage est caractérisée par un optimisme omniprésent et ne fournit pas une vision réaliste et suffisamment prudente de l'évolution de la zone perturbée. L'exemple le plus frappant à cet égard est le postulat que, sur un million d'années, le stockage se comportera pour l'essentiel comme un fluide idéal, ce qui semble excessivement optimiste ».

Les travaux de recherche de l'Andra sur les phénomènes d'interaction au sein du stockage entre composants de celui-ci et argilite ont mis en évidence leur complexité, mais aussi leur extension limitée de par les propriétés intrinsèques de l'argilite. L'analyse de performance réalisée en 2005 est caractérisée par un choix systématique d'extensions enveloppe et de caractéristiques conservatives, voire pénalisantes, des perturbations.

Conclusion 2. « **Incidences de la construction sur la zone perturbée** : Il y a relativement peu de discussions sur les aspects pratiques d'ingénierie du développement et de la construction du stockage, et de leurs implications en ce qui concerne les performances à long terme. Il est particulièrement important à cet égard de savoir si une attention suffisante est accordée aux impacts de la construction sur le développement de la zone perturbée (EDZ) et ses caractéristiques et propriétés. Nous notons ici que nous avons également fait de nombreux commentaires dans ce sens dans le rapport précédent de l'IEER ».

Tant les données et observations fournies dans le Référentiel de site 2009 que le programme de recherche mené au Laboratoire souterrain s'attachent à caractériser les perturbations liées à la construction des différentes galeries du Laboratoire souterrain.

Pour ce qui concerne le choix des méthodes de creusement et de soutènement des ouvrages de stockage, l'Andra conduit une analyse détaillée reposant en particulier sur le retour d'expérience du Laboratoire souterrain. Elle visera à proposer en vue de la demande d'autorisation de création des solutions industrielles pour la réalisation de la tranche 1 du stockage.

Voir aussi les commentaires relatifs à la page 120.

Conclusion 3. « **Avantages et inconvénients de la réversibilité** : Les arguments en faveur de la possibilité du maintien de la réversibilité et de la récupérabilité pendant une période très longue, par exemple sur plusieurs siècles ou même un seul siècle, pourraient ne pas être suffisants pour compenser les problèmes potentiels, comme l'éventuelle détérioration des revêtements et des roches environnantes qui interviendra sur des périodes aussi longues. La vision optimiste de l'Andra sur une « cicatrisation » de la totalité des structures après la fermeture, dans laquelle les dommages induits seraient ensuite supprimés, est loin d'être convaincante. Les risques de détériorations et de dommages posent la question de savoir s'il ne serait pas préférable d'envisager de minimiser les dégâts, par exemple en ne laissant un creusement ouvert que le temps absolument nécessaire et justifiable ».

Les données et observations fournies dans le Référentiel de site 2009 sur la fracturation mécanique autour des galeries montrent que pour l'essentiel elle apparaît au moment du creusement. Dans le cas des galeries du Laboratoire souterrain où le soutènement permet une déformation importante, l'ouverture des fractures évolue surtout dans les premiers mois.

Le phénomène d'auto-colmatage est un fait observé et mesuré. Pour autant, jusqu'à présent l'Andra a eu une approche prudente en ne le prenant pas compte dans l'analyse de sûreté du stockage.

Conclusion 4. « **Problèmes d'intégrité de forage** : L'équipe de l'IEER a observé un net breakout ainsi qu'un déplacement de cisaillement le long de certaines fractures sur certains creusements horizontaux forés récemment pour une cellule de stockage (alvéole). Bien qu'il s'agisse à l'évidence d'une observation empirique, de tels phénomènes ne sont pas surprenants dans ce type de masse rocheuse. Cela pose problème pour les analyses qui supposent que, à la suite des creusements, la forme des alvéoles de mise en place sera véritablement circulaire et amène à se demander si les vides peuvent être scellés sous l'influence d'une redistribution finale des contraintes in situ et d'un scellement, d'une cicatrisation chimique ».

L'analyse menée par l'Andra est avant tout phénoménologique. Elle ne suppose pas des situations idéales, mais au contraire prend en compte les observations faites dans l'évaluation des différentes situations du stockage.

Les premières observations faites montrent que la convergence des forages à différentes échelles est similaire à celle mesurée dans les galeries et qu'une fois l'annulaire refermé, les contraintes se redistribuent dans le chemisage.

Conclusion 5. « **Revêtements en béton** : La représentation optimiste de l'Andra du radoucissement et de l'affaiblissement final des revêtements en béton dans les exercices de modélisation numérique est particulièrement préoccupante. Cette approche semble aboutir à donner une durée de vie excessivement longue au béton, même en tenant compte des conditions présumées exceptionnellement favorables dans lesquelles ce béton sera utilisé (c'est-à-dire en comparaison de tunnels routiers ou d'exploitations minières souterraines). À première vue, cette modélisation du radoucissement semble peu compatible avec les assertions prévoyant que, d'ici quelques millénaires, le revêtement connaîtra une fracturation renouvelée ou réactivée ».

Au stade du Dossier 2005, l'Andra a mené une étude couplant altérations chimiques et effets mécaniques. Cette modélisation conduit en effet à envisager la rupture du revêtement après quelques milliers d'années. Depuis, l'Andra prend également en compte la fissuration du béton et ses conséquences sur la précocité d'une rupture. Les coefficients de sécurité pris en compte dans la conception des revêtements visent une stabilité mécanique a minima à l'échelle séculaire.

Conclusion 6. « **Analyse des performances des scellements** : L'hypothèse de l'Andra selon laquelle toute la modélisation peut être réalisée comme si la roche se comportait comme un continuum, semble omniprésente dans l'ensemble des analyses sur les performances des scellements. La facilité de modélisation numérique ne devrait pas prévaloir sur une représentation réaliste des phénomènes observés. En d'autres termes, même s'il n'est pas possible d'inclure explicitement toutes les fractures ou les discontinuités dans un modèle numérique, une caractérisation correcte du comportement observé est essentielle pour prévoir l'évolution du stockage ».

L'Andra ne considère pas que la modélisation de l'EDZ par un milieu poreux soit optimiste. En effet, les paramètres hydrauliques affectés au milieu poreux équivalent conduisent à des débits plus importants que ceux qui transiteraient par la fracture présentant la plus grande conductivité hydraulique mesurée in situ.

En parallèle l'Andra poursuit ses travaux sur une représentation plus réaliste et moins pénalisante du milieu fracturé en champ proche des ouvrages.

4.3.2 Analyse détaillée du rapport

Introduction :

Page 120 « Cependant, une discussion manquant de détail est fournie sur les aspects pratiques d'ingénierie concernant le développement et la construction du site de stockage et leurs implication sur les performances à long terme. Ceci est une faiblesse du programme de recherches. Il est particulièrement important à cet égard de savoir si une attention suffisante est accordée aux impacts de la construction sur le développement de la zone endommagée (EDZ) et ses caractéristiques et propriétés ».

L'ensemble des constructions réalisées au Laboratoire souterrain fait l'objet d'un suivi pour caractériser la zone perturbée, c'est-à-dire :

- levé de la fracturation des fronts de taille et des parements et analyse structurale des carottes des forages (tous les forages réalisés dans le Laboratoire souterrain font l'objet d'un levé structural). L'analyse de ces données permet une interprétation du mode de propagation des fractures induites par le creusement et de leur extension au regard de la taille de l'ouvrage, de l'orientation par rapport au champ de contrainte et de la méthode de construction,
- mesure sismique autour des ouvrages souterrains,
- mesure des propriétés hydrauliques in situ (gradient hydraulique autour des ouvrages, perméabilité).

En parallèle, des mesures de convergence et des extensomètres radiaux sont mis en place au cours du creusement pour suivre l'évolution des déformations autour des ouvrages et étudier l'impact de la zone perturbée sur le comportement mécanique. Dans des sections spécifiques, une instrumentation de type Mine-by test, comprenant un ensemble de forages pour les mesures de déplacement (extensomètre, déflectomètre, inclinomètre) et de pression interstitielle, est mise en place avant le creusement pour analyser le comportement hydromécanique des argilites lors du creusement et/ou cours du temps.

La caractérisation de la zone perturbée a été réalisée dans la galerie à 445 m, à 4 niveaux dans le puits principal, et dans les galeries GLE, GMR, GEX, GED, GAN, GCS et actuellement en GCR. Chaque creusement de galerie fait l'objet d'un suivi *a minima* géologique et de convergence. Toute modification de la méthode de creusement/soutènement implique une caractérisation systématique de la zone perturbée. Des « Mine by tests » ont été réalisés autour du puits d'accès (expérimentation REP), dans les galeries GCS et GCR et seront réalisés dans de nouvelles galeries.

Page 120 « Si nous reconnaissons que des efforts considérables ont été réalisés sur l'étude de tels effets, il n'est pas tout à fait clair ou convaincant que les conséquences potentielles de ces effets soient prises en compte et de manière concluante dans les analyses plus théoriques à l'appui des évaluations de performances. Il semble y avoir une déconnexion importante entre surveillance sur le terrain et la cartographie d'une part et l'analyse phénoménologique et l'évaluation des performances d'autre part : Ces dernières font l'hypothèse constante d'une continuité, d'un comportement mécanique de continuum, même après que les premiers aient reconnus que la fracturation était assez fréquentes et persistante »

Voir les commentaires ci-dessus et ceux relatifs à la page 130.

4.1. Inhomogénéités potentielles dans les propriétés mécaniques de la zone de transposition et leur rôle dans la sélection de la ZIRA

Page 121 « Nous trouvons également très encourageant de constater que l'Andra prévoit de poursuivre la recherche dans ce domaine, comme indiqué dans le GNR FORPRO-II d'appel à recherche, tout en jugeant quelque peu déconcertant que l'Andra estime que certaines de ces recherches dépassent les besoins de son choix de site ».

Le groupement national de recherche constitué par le CNRS et l'Andra est un partenariat dans lequel les deux parties cherchent à mettre en synergie leurs thématiques de recherche. La phrase citée par l'IEER ne concerne pas l'homogénéité du Callovo-Oxfordien, mais concerne des aspects de géologie fondamentale relevant de l'histoire géologique, structurale et hydrogéologique passée du site et pouvant apporter des données nouvelles sur la connaissance plus générale du bassin de Paris.

Page 121 « Sans être strictement une question d'inhomogénéité, selon l'Evolution Phénoménologique du stockage géologique, « *une variabilité verticale des propriétés mécaniques est notée dans la couche du Callovo-Oxfordien* »... On peut supposer que la zone C est choisie parce qu'elle offre la plus grande probabilité de la meilleure performance en termes de confinement des déchets.... Bien que des hétérogénéités soient considérées comme peu probables, à ce stade de la caractérisation du site, elles ne peuvent être entièrement exclues.... Il est très souhaitable que des efforts supplémentaires soient poursuivis pour s'assurer qu'aucune surprise importante ne sera rencontrée plus tard ».

Le choix de la position du stockage au sein de la formation du Callovo-Oxfordien a été guidé par la fonction de sûreté 'Retarder et atténuer la migration des radionucléides' de façon à garantir une épaisseur importante d'argilite saine de part et d'autre, soit au milieu de la formation avec des installations souterraines de faible extension verticale.

Comme indiqué plus haut les observations et mesures concernant tant les caractéristiques des argilites, que la fracturation sont poursuivies systématiquement dans les ouvrages existants du Laboratoire souterrain ; ils le seront aussi dans les ouvrages du stockage.

4.1.1 Différences et similitudes entre les discontinuités du Laboratoire souterrain et celles identifiées dans le cadre de la recherche sur la zone de transposition

Page 122 « Nous ne savons pas très bien dans quelle mesure l'Andra a pris en compte et traité l'impact potentiel de l'influence des plans de stratification, par exemple d'une séparation le long des plans de stratification, qui pose le problème en ce qui concerne le confinement des déchets et bien évidemment en termes de stabilité des creusements, particulièrement des galeries et peut être surtout des forages de mise stockage, particulièrement à la lumière du fait que les forages de mise en stockage sont horizontaux ».

L'IEER met en avant dans ce chapitre que le Callovo-Oxfordien est une roche sédimentaire donc stratifiée, avec deux conséquences possibles (i) un décollement potentiel de bancs au toit des ouvrages, (ii) un comportement anisotrope de l'argilite. « Nous ne sommes pas sûrs, ni convaincus que l'Andra a suffisamment pris en compte une éventuelle anisotropie mécanique, en particulier à l'échelle macroscopique, qui pourrait être associée à la nature stratifiée de la formation hôte ».

Les observations de terrain indiquent qu'il n'existe pas à proprement parler de bancs individualisés suivant la stratification, les variations minéralogiques verticales se faisant progressivement.

Dans le cas des premières alvéoles HA non chemisées, les mesures géophysiques montrent que les break-out sont d'origine purement mécanique, car ils sont continus sur toute la longueur de l'alvéole, alors que celles-ci recoupe en biais un repère lithologique (bioturbations) soulignant la lithologie.

La forme de l'alvéole après break-out est liée à la fracturation induite et à la présence des chevrons. Cependant, l'anisotropie du comportement mécanique peut sans doute jouer un rôle dans l'expression de la fracturation induite.

Pages 123-124 « Nous ne sommes pas sûrs ni convaincus que l'Andra a suffisamment pris en compte une éventuelle anisotropie mécanique, en particulier à une échelle macroscopique, qui pourrait être associée à la nature stratifiée de la formation hôte. Encore une fois, cet aspect serait particulièrement préoccupant en ce qui concerne des concentrations de contraintes autour des excavations, l'impact potentiel de l'anisotropie sur les distributions des contraintes, l'impact de l'anisotropie de la résistance, et l'impact combiné de l'anisotropie sur la zone perturbée.[...] Mais, comme l'a souligné la CNE, elle est presque certainement un facteur important dans le comportement mécanique de la masse rocheuse de la formation hôte (ainsi que pour d'autres aspects du comportement), et mérite certainement plus d'attention que celle qui semble lui avoir été accordée jusqu'à maintenant ».

Ce point a bien été identifié et considéré par l'Andra depuis plusieurs années dans ses différents axes d'investigation et de recherche (voir Référentiel de site tome 2 chapitre 18).

L'anisotropie du comportement mécanique a été étudiée par des séries d'essais réalisés dans différentes orientation par rapport à la stratification (0°, 45°, 60°, 90°). Les mesures des modules de déformation mettent en évidence une anisotropie du module de déformation, le rapport des modules $E_{//} / E_{\perp}$ variant de 1,05 à 1,4. Ces valeurs sont confirmées par les mesures dans la galerie expérimentale à -445 m. L'anisotropie de résistance en compression simple est du même ordre de grandeur, variant de 1,05 à 1,25.

L'étude de ce thème se poursuit notamment par les actions suivantes :

- I) Mesure des modules de déformabilité axiale et transversale ainsi que les coefficients de Poisson pour les différentes hygrométries à courte terme et à long terme ;
- II) Étude de l'influence de l'anisotropie structurale sur le comportement instantané poromécanique par des essais de micro-indentation dans les directions parallèles et perpendiculaires aux plans de stratification ;
- III) Analyses des résultats des essais de micro-indentation en développant deux méthodes de dépouillement isotrope et anisotropie ;
- IV) Mesures des caractéristiques des argilites par des essais mini-compression dans les deux directions ;
- V) Développement des approches multi-échelles de l'EDZ en considérant l'anisotropie.

Page 124 « Nous notons que, si les comparaisons favorables avec les résultats du Mont Terri sont souvent citées par l'Andra pour défendre son dossier, il incombe à l'Andra également de se pencher sur certains résultats du Mont Terri qui pourraient ne pas être applicables au site de Bure ».

Il avait été ajouté au Référentiel de site 2005 un addendum expliquant les possibilités et limites de la transposition entre sites n'ayant pas les mêmes formations géologiques, ni la même histoire. Ainsi, du fait de leurs compositions minéralogiques et porosités proches, on peut comparer les résultats des expérimentations de transport de masse et de chaleur, y compris la désaturation en paroi, au Mont Terri et à Bure. Par contre, le contexte tectonique (pendage, fracturation, profondeur) est trop différent pour pouvoir comparer le comportement mécanique des ouvrages. La démarche générale de transposition est décrite dans l'article de Mazurek et al « Transferability of geoscientific information from various sources (study sites, underground rock laboratories, natural analogues) to support safety cases for radioactive waste repositories in argillaceous formations », Physics and Chemistry of the Earth 33 (2008) S95-S105.

La comparaison avec le Mont Terri peut mettre en évidence des phénomènes se produisant sur différentes roches argileuses, comme l'auto colmatage par exemple, et confirmer que ces phénomènes sont intrinsèques à ce type de roche.

4.1.2 Eventuelle différences des besoins de soutènement pour la stabilité des creusements en fonction de la sélection de la ZIRA

Page 125 « Si l'anisotropie peut être mineure à l'échelle du laboratoire, elle peut mériter plus de considération et d'analyse pour justifier de négliger entièrement son impact lors de l'extrapolation des résultats à l'échelle du laboratoire aux propriétés de la masse rocheuse ».

Voir le commentaire relatif à la page 123 : l'Andra ne néglige pas ce facteur dans ses programmes de recherche et continue à faire évoluer la modélisation mécanique des argilites en fonction des résultats acquis, notamment in situ dans le Laboratoire souterrain. A cet égard, ce dernier permet d'acquérir des données à différentes échelles significatives par rapport aux variations verticales de propriétés du Callovo-Oxfordien, jusqu'à présent sur des ouvrages de diamètres compris entre 0,2 m et 5 m. En 2012 une galerie de 7,8 m de diamètre (proche de la taille des galeries du stockage) sera construite. Comme expliqué ci-avant, si ce facteur ne peut être négligé, il n'est pas prépondérant dans l'explication du comportement mécanique des ouvrages.

Page 125 « une question mineure mérite peut-être des éclaircissements : il semble que certaines dimensions ne s'additionnent pas. Par exemple, à une profondeur de 485 m, un puits d'un diamètre intérieur de 7,0 m avec une épaisseur de revêtement en béton de 0,60 m devrait exiger un creusement seulement de 8,20 m de diamètre (plutôt que de 8,60 m comme revêtement de sûreté ? (Par exemple, pourrait-il s'agir du béton projeté de 20 cm, mentionné dans d'autres documents pour les galeries ?) Encore une fois, notamment en raison de son importance cruciale pour l'étanchéité finale des puits, une description plus claire, plus précise et plus détaillée de ces composants et de leur conception, et les analyses correspondantes, seraient extrêmement souhaitables ».

Dans les puits du Laboratoire il a été effectivement mis en place d'un béton projeté de 0.2 m d'épaisseur dès l'achèvement du creusement, pour protéger les travailleurs jusqu'au bétonnage définitif.

Il est à noter que le revêtement béton des puits du Laboratoire souterrain n'a pas de fonction d'étanchéité. Celle-ci est assurée par un ouvrage spécifique construit au toit du Callovo-Oxfordien (appelé bulbe d'étanchéité).

Page 125 « Particulièrement, à la lumière de la grande longévité revendiquée par l'Andra pour de nombreux composants critiques de béton, il serait extrêmement souhaitable de développer une base de données, par exemple au moment de la fermeture finale du stockage, qui donnerait des éléments d'observation détaillés sur les conditions de ces composantes à ce moment-là, et de leur évolution au cours du temps depuis leur installation. (En outre, bien sûr, une telle surveillance continue permettrait de renforcer la confiance, pour ce qui concerne la réversibilité par exemple, et aussi pour l'exactitude des analyses phénoménologiques qui ne prévoient aucun changement pendant plusieurs centaines d'années, au moins.) ».

L'Andra prévoit effectivement un programme d'observation et de surveillance du stockage.

Pages 126-127 « Cette approche semble tenir compte d'une durée de vie excessivement longue pour le béton, même en prenant en considération des conditions présumées exceptionnellement favorables dans lesquelles ce béton sera utilisé. Une certaine justification ou explication du raisonnement logique qui a présidé à cette approche serait extrêmement souhaitable. En outre, à première vue, cette modélisation du radoucissement semble au moins quelque peu incompatible avec les assertions prévoyant que d'ici quelques millénaires, le revêtement connaîtra une fracturation renouvelée ou réactivée (qui aboutirait vraisemblablement à au moins une certaine réduction du module de rigidité) ».

Voir le commentaire relatif à la conclusion 5 du chapitre 4.

Page 127 « La thèse selon laquelle la faible ampleur de la perturbation alcaline et du radoucissement en résultant ne va pas renforcer ou permettre une extension supplémentaire de l'EDZ, est préoccupante, en ce sens qu'elle peut influencer le développement de cette zone perturbée. Si une couche souple d'une épaisseur d'environ 10 cm se développe entre le cœur raide du remblai et l'argilite l'entourant, cela ne va-t-il pas permettre une convergence supplémentaire de l'argilite ? ».

On ne s'attend pas à ce que la perturbation alcaline diminue les caractéristiques mécaniques de la zone fracturée. On peut, au contraire, proposer une évolution opposée en raison de la nature des minéraux néoformés lors de l'interaction de l'argilite avec les fluides alcalins.

Voir aussi les commentaires relatifs à la page 131 sur l'influence du remblai.

Page 128 « Le revêtement en béton projeté n'est pas pris en compte dans les calculs de désaturation (aspect important en termes de raidissement de l'argilite à la suite de la désaturation)... Des revêtements en béton projeté sont souvent utilisés, aussi bien dans les constructions souterraines que dans les mines, pour empêcher des impacts négatifs découlant du contact de l'air avec les parois de la roche... notre préoccupation ici est de savoir si la désaturation calculée de l'argilite (en négligeant tout effet « protecteur » du béton projeté ?), et le durcissement qui en résulte, peuvent entraîner une sous-estimation de la charge de fluage des revêtements, et, en particulier du moment où intervient cette charge. Encore une fois, dans le même ordre d'idées, il est difficile de comprendre pourquoi la désaturation devrait intervenir si rapidement dans des creusements avec un revêtement, bétonnés ou couverts de béton projeté ».

Les observations faites dans le Laboratoire souterrain indiquent que :

- le béton projeté n'intervient pas dans le processus de désaturation des argilites en paroi de galerie,
- la désaturation se limite à la zone fracturée proche de la paroi, c'est pourquoi elle est rapide et qu'il n'y a pas de durcissement significatif.

Le dimensionnement des revêtements ne prend pas en compte la désaturation de l'argilite, qui effectivement peut ralentir le mécanisme de fluage.

4.1.3 Adéquation de la recherche sur l'effet de la déformation sur la stabilité à long terme

Page 128 « Bien que l'engagement d'un tel suivi semble ferme dans son principe, la description un peu plus détaillée des plans possibles pour mettre en œuvre un tel programme, laisse un sentiment de grande incertitude : l'engagement semble plutôt provisoire, et loin d'être précis et détaillé. La dernière phrase de cette section, qui suggère un engagement très incertain sur la surveillance du béton, est particulièrement inquiétante. Étant donné l'extrême importance des revêtements en béton en ce qui concerne la possibilité de reprise des colis et le maintien de la zone perturbée, on pourrait s'attendre à un engagement ferme, sans réserves, pour vérifier in situ l'état des revêtements en béton, aussi longtemps que l'accès le permet, et par télémanipulation, aussi longtemps que la chose est faisable pratiquement ».

Voir la position de l'Andra vis-à-vis des recommandations du chapitre 4.

4.2 Comparaison de l'état de contrainte in situ et des paramètres de pression interstitielle entre le Laboratoire souterrain et la ZIRA

4.3 Transférabilité de la recherche sur le scellement

Page 130 « Nous attachons une grande valeur à l'essai de scellement proposé (ou au moins envisagé) qui doit être effectué dans le Laboratoire souterrain. Si, dans le principe, nous approuvons fermement l'option de chercher des méthodes pour enlever le revêtement en béton avant l'opération de scellement, nous reconnaissons que cette tâche risque d'être extrêmement difficile, surtout si elle doit être effectuée de façon à prévenir un plus grand développement et agrandissement de la zone perturbée. Néanmoins, les avantages de l'élimination du béton, avec toutes les causes correspondantes d'effets nuisibles potentiels et d'incertitudes, sont si importants et significatifs que nous reconnaissons que cette approche de suppression du revêtement, de creusement de saignées, et de remplissage de ces saignées avec des joints d'argile est peut-être positive même si nous sommes peut-être moins optimistes que l'Andra sur sa faisabilité ».

L'Andra étudie effectivement plusieurs options techniques pour la réalisation des scellements. Différents essais sont programmés au Laboratoire souterrain..

Page 130 « L'absence de prise en compte de la fracturation observée pendant l'excavation constitue un sujet particulièrement préoccupant. Par exemple, le Chapitre 22 du Référentiel du site Meuse/Haute-Marne donne une description impressionnante d'observations in situ de l'évolution de fractures pendant le creusement. Pourtant, le Chapitre 23, qui suit immédiatement, démarre immédiatement avec l'hypothèse que toute la modélisation peut être effectuée comme si la roche était un continuum. Cette hypothèse semble être omniprésente dans l'ensemble des analyses des performances des scellements. Nous notons que la facilité de modélisation numérique ne devrait pas prévaloir sur une représentation réaliste des phénomènes observés. En d'autres termes, même s'il n'est pas possible d'inclure explicitement toutes les fractures ou les discontinuités dans un modèle numérique, une modélisation correcte, tenant compte de l'influence des fractures et des discontinuités, du comportement observé est essentielle pour prévoir l'évolution du stockage ».

« L'absence de prise en compte de la fracturation observée pendant l'excavation constitue un sujet particulièrement préoccupant ».

Si le chapitre 22 du Référentiel fait une description de la zone fracturée immédiatement à partir de la paroi des ouvrages, caractérisée par un réseau dense de fractures fortement connectées, le chapitre 23 décrit la zone perturbée au-delà de la zone fracturée, dans laquelle les déformations plastiques de l'argilite conduisent à une légère dégradation de la perméabilité.

Des simulations relatives à la compréhension du fonctionnement phénoménologique des ouvrages et des argilites en champ proche (notamment hydromécanique et chimique) sont menées en considérant de manière explicite les fractures, et en cherchant à comparer les résultats obtenus avec ceux utilisant une représentation de milieu poreux continu équivalent.

Page 130 « De nombreuses analyses de scellements, en particulier le « scénario de défaillance des scellements », considèrent les systèmes de scellement comme des continus homogènes, avec des propriétés (par exemple fractures, joints « réparés ») qui semblent être fondées en grande partie, sinon exclusivement, sur des études de laboratoire sur de petits échantillons, ou du moins à très petite échelle en comparaison avec la taille des excavations à sceller. Certains attributs et propriétés de certains composants de ces scellements « défaillants » semblent avoir été choisis d'une façon très optimiste. La démonstration in situ que de tels chiffres sont réalistes serait extrêmement utile. Si des éléments probants provenant d'autres sites sont avancés (par exemple Mont Terri, Tournemire), il faut prouver de façon convaincante que l'information est effectivement transférable ».

Pour le Dossier 2005, l'Andra a retenu une approche prudente, à partir des données disponibles aux différentes échelles sur les composants d'un scellement mis en jeu, et en particulier les essais à grande échelle menés à l'étranger. Ceci s'est traduit par le choix de valeurs de perméabilité raisonnablement conservatives pour tout ou partie des composants, notamment ceux au cœur de la performance hydraulique du scellement :

- Pour l'EDZ, l'Andra n'a pas pris en compte un éventuel auto-colmatage (malgré par exemple l'effet bénéfique de la pression de gonflement du noyau à base d'argile gonflante, observé à petite échelle et à grande échelle). Dans tous les scénarios de sûreté, l'EDZ retenue est l'EDZ initiale : les extensions et valeurs de perméabilité (5.10^{-9} m/s pour la zone fracturée et 5.10^{-11} pour la zone microfissurée) ont été appliquées de manière pérenne ;

- Pour le noyau à base d'argile gonflante, l'Andra s'est appuyé sur le très important corpus de connaissances sur les bentonites. En effet, le comportement thermique, hydraulique, mécanique, chimique et même radiologique (comportement face aux rayonnements) de ces matériaux a été étudié depuis plus de 30 ans dans le cadre des recherches sur le stockage géologique de déchets radioactifs, à différentes échelles (de l'échantillon centimétrique à l'ouvrage pluri-métrique *in situ* en laboratoire souterrain ou en surface) et pour différentes mises en forme (briques, tores, pellets). Il a été ainsi montré le caractère remarquable de ces matériaux, de par leur propriété de gonflement leur conférant des capacités d'auto-colmatage, de remplissage de vides importants, de robustesse face aux sollicitations thermique, hydraulique et mécanique, et *in fine* de faible perméabilité. Le matériau bentonite présente ainsi des perméabilités globalement largement inférieures à 10^{-11} m/s, voire 10^{-13} m/s (cas de l'argile MX80 étudiée par de nombreux pays). L'Andra a pris aussi en compte l'interface entre le noyau et la roche, en considérant à ce stade, un éventuel contact initial imparfait à la mise en place du noyau (présence de vides même limités, ou d'une argile gonflante moins dense que le cœur du noyau), tel qu'observé sur l'essai de scellement de galerie à échelle 1 au laboratoire souterrain de l'AECL au Canada. L'expérience avait montré que la perméabilité globale du scellement, de l'ordre de 10^{-11} m/s, résultait des caractéristiques de l'interface avec la roche, et non de celles du cœur du noyau dont la perméabilité était nettement plus faible.

Au stade du Dossier 2005, sans préjuger des possibilités d'optimisation de la réalisation d'un scellement, l'Andra a donc retenu en référence la valeur de 10^{-11} m/s pour tout le noyau dans le cadre des évaluations de sûreté. Les scénarios de défaillance, pris en compte sont les suivants (TES § 7.2.2 pages 506 à 509) :

- interface continue (défaillance des coupures hydrauliques),
- endommagement possible des noyaux de scellement (dégradation de leur perméabilité d'ensemble à 10^{-9} m/s),
- caractéristiques très dégradées de la zone fracturée (perméabilité de 10^{-6} m/s) et de la zone perturbée (perméabilité de $5 \cdot 10^{-9}$ m/s),
- perte ou absence de scellements de puits modélisée par une perméabilité élevée de 10^{-6} m/s.

Page 131 « L'apparente hypothèse générale d'un débit hydraulique uniforme des pores pose un problème particulier du point de vue des analyses sur le scénario de « défaillance » des scellements. N'y a-t-il aucun risque de cheminement préférentiel ? La possibilité d'un cheminement préférentiel est-elle implicitement ou explicitement prise en compte ? Ce sujet reste très préoccupant en ce qui concerne l'écoulement dans les masses rocheuses, en particulier dans celles qui sont fracturées, à moins qu'il puisse être démontré de manière convaincante que les scellements des puits et galeries, et la cicatrisation des fractures seront effectivement uniformes, complets et totalement généralisés ainsi que le suppose l'Andra. Si un écoulement préférentiel devait se produire, l'hypothèse d'un écoulement principalement par diffusion devrait peut-être être reconsidérée ; en d'autres termes, un flux convectif devra peut-être être pris en compte avec le flux diffusif ».

Voir infra le commentaire relatif à la page 131, concernant le phénomène de cheminement préférentiel.

Page 131 « Toutefois, certaines approches de scellement ne répondent pas à certaines préoccupations : par exemple la performance du remblayage, étroitement liée aux scellements. L'Andra déclare à plusieurs reprises qu'un module de 10 MPa est suffisant pour assurer que le remblayage freinera la convergence de l'argilite suffisamment pour éviter une nouvelle expansion de l'EDZ. Il est difficile de comprendre ou d'accepter, notamment à la lumière des déclarations parallèles, qu'une contrainte de 10 à 12 MPa sera probablement la contrainte d'équilibre à long terme. À un tel état de contrainte, le remblai ne permettrait-il pas des déplacements très importants vers l'intérieur avant de fournir des forces de réaction suffisantes pour contraindre l'argilite ? Par exemple voir l'exemple d'un cylindre solide avec $E = 10$ MPa et le rayon de la galerie dans la Figure 6.1.22 (de C.NT.AHVL.04.0030) ».

La figure ci-dessous, extraite du rapport Andra n° C.NT.AHVL.04.0030, montre que même si la cohésion des argilites chute d'un facteur 3 (paramètre F de la légende de la figure) par rapport aux valeurs mesurées (et implique donc une convergence nettement supérieure à ce qui est attendu), l'EDZ au droit du remblai reste d'extension inférieure au diamètre de la galerie (ordonnée égale à 1), à condition que le module d'Young de celui-ci soit d'au moins 10 MPa.

Dans ces calculs, le revêtement en béton est supposé ne plus avoir d'effet mécanique (la totalité de la poussée liée à la convergence des argilites est reprise par le remblai). La galerie est orientée suivant la contrainte principale mineure : dans cette direction, les contraintes totales *in situ* sont environ 12 MPa pour la contrainte verticale et environ 16 MPa pour la contrainte horizontale (majeure).

On notera que la valeur de 10 MPa pour le module d'Young du remblai est atteinte dès que la pression qui lui est appliquée dépasse 1 MPa. Cette situation apparaîtra dès que le revêtement en béton perdra une partie de ses propriétés mécaniques, et reportera une partie de la contrainte sur le remblai. Dès lors, l'extension de l'EDZ restera inférieure au diamètre de la galerie.

Au regard de l'analyse ci-dessus, l'Andra considère que les définitions de la méthode de remblayage et d'un matériau de remplissage ne soulèvent pas de difficulté particulière et que les solutions mises en œuvre répondront aux objectifs de sûreté du remblayage, en particulier la limitation de l'extension de l'EDZ autour des galeries.

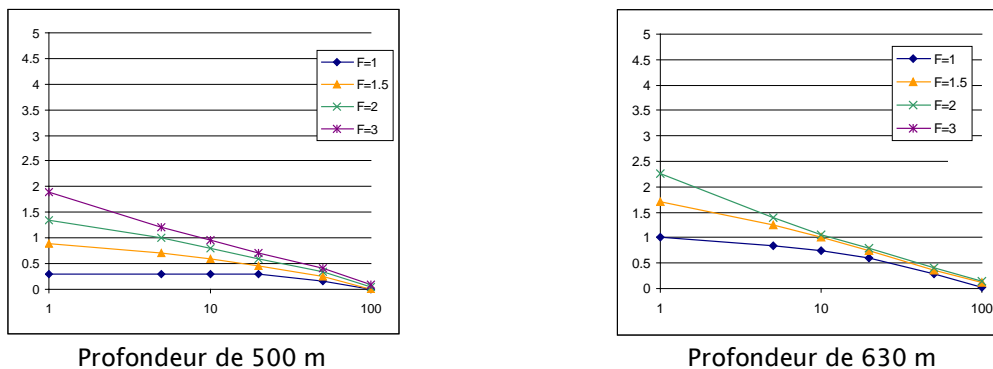


Figure 4-6 Estimation de l'extension de la zone fracturée (rapportée au rayon excavé), en fonction du module d'Young initial du remblai et d'une dégradation hypothétique de l'argilite (cohésion réduite d'un facteur F)

Nota : L'extension de la zone fracturée (rapportée au rayon excavé) est en ordonnée ; le module d'Young initial du remblai est en abscisse (MPa).

F désigne le rapport entre la cohésion mesurée sur les argilites, et les différentes valeurs de cohésion considérées dans le calcul pour tester l'efficacité du remblai.

L'ouvrage considéré est orienté selon la contrainte mineure (conditions de contraintes anisotropes).

Page 131 « Concernant les performances de scellement, il est particulièrement préoccupant de voir à quel point le phénomène de cheminement préférentiel est rarement mentionné. Dans le document Scellements et remblais de galeries et des puits d'un stockage en formation argileuse profonde, il est mentionnée très brièvement à la page 75 et de façon un peu plus détaillée dans les pages 95-96 de C.NT.AHVL.04.0030, mais il ne semble pas être considéré comme un problème sérieux pour la performance des scellements ».

Le choix de matériaux et de méthodes de mise en place adaptées pour les galeries remblayées et les scellements, constitue une exigence de conception vis-à-vis de la limitation de chemins préférentiels d'écoulement au sein du stockage.

Une étude de sensibilité aux propriétés de l'EDZ a été menée dans le cadre du Dossier 2005, consistant à considérer de manière pénalisante une zone de très forte perméabilité continue le long des galeries et autour des scellements (10^{-6} m/s appliquée de manière pérenne sur 30 % du rayon excavé, et 5.10^{-9} m/s appliquée sur 90 % du rayon excavé), pouvant constituer une voie de transfert préférentielle pour les solutés. Cette étude, qui est rapportée dans le TES (voir Figure 5.5.36 à 5.5.38 pp. 333 et 334) montre que l'augmentation de la convection (autour des scellements et des galeries) reste modérée (car contrôlée par la perméabilité du Callovo-Oxfordien et le gradient de charge descendant dans le Callovo-Oxfordien), et que la voie de transfert principale reste celle par le Callovo-Oxfordien.

4.5 Effet de l'évolution des gaz dans les conteneurs de déchets sur la stabilité des scellements

Page 132 « Il est manifeste que l'Andra a consacré des efforts considérables à l'exploration de la circulation des gaz, ses causes, ses mécanismes et ses effets. (Référentiel de site tome 2 - 2009) Il peut néanmoins être utile d'insister sur le fait que ce sujet est particulièrement important en ce qui concerne les effets potentiels néfastes des pressions et des flux de gaz sur les composants des dispositifs de scellement. Les pressions de gaz dans la zone perturbée peuvent également s'opposer à

(ou ralentir) la resaturation de l'EDZ et du revêtement ; il est par conséquent recommandé une analyse plus quantitative plutôt que le vague espoir que d'une manière ou d'une autre le fluage dans l'argilite va suffisamment compenser la pression du gaz ».

Depuis 2005, de nombreuses expériences et études sont conduites non seulement sur la caractérisation du transfert des gaz dans les argilites intactes, l'EDZ et les matériaux du stockage (argile gonflante, bétons), ainsi qu'à leurs interfaces (argilites/bentonite, argilites/acier etc.), mais aussi sur les conséquences de la production et de la migration des gaz sur les autres processus, en particulier mécaniques et chimiques, afin *in fine* de vérifier qu'il n'y a pas d'impact sur les fonctions de sûreté des composants du stockage et du Callovo-Oxfordien.

Les études sont conduites à différentes échelles, en particulier du matériau à l'ouvrage, en laboratoire jour et en laboratoire souterrain. Pour ce faire, un groupement de laboratoires a été spécifiquement mis en place par l'Andra réunissant des laboratoires de recherche aux compétences diverses. Un projet Européen, FORGE, réunit des agences européennes homologues de l'Andra et un large panel de laboratoires européens sur le thème des gaz. Ce projet permet notamment de croiser les informations et de disposer d'un corpus de connaissances aussi large que possible tant sur les milieux géologiques que sur les matériaux et les ouvrages, afin de dégager de manière cohérente et indépendante les éléments qualitatifs et quantitatifs sur la migration des gaz. Par exemple, les essais d'injection de gaz à l'interface argilite/bentonite (Davy et al., 2009) ou directement à travers la bentonite (Projet Forge, rapport D2.2, 2010) montrent que les processus sont plutôt réversibles : le gaz passe lorsqu'une pression limite est atteinte (pression proportionnelle à la pression de gonflement plus la pression d'eau pour les bentonites) et ne passe plus si la pression de gaz redescend en dessous de cette valeur limite.

La thématique des gaz est explicitement prise en compte dans les études sur l'évolution chimique du stockage et des argilites du Callovo-Oxfordien : par exemple l'Andra fait actuellement évaluer le devenir chimique de l'hydrogène dans les argilites et, si cela est le cas, les éventuelles conséquences sur la chimie des eaux interstitielles. Il en va de même pour le comportement mécanique des argilites et des matériaux du stockage, dont les bentonites, à l'échelle du matériau et à l'échelle d'un ouvrage ou du Callovo-Oxfordien.

Plusieurs expériences sont ainsi menées en laboratoire souterrain sur la compréhension de la saturation de noyau en bentonite soumis à un flux de gaz, et sur la quantification des pressions d'entrée de gaz et de fracturation des argilites par le gaz. En parallèle, sur la base des connaissances élémentaires ainsi acquises, des simulations numériques en diphasique eau-gaz sont menées sur le comportement hydraulique-gaz du stockage aux différentes échelles afin notamment de quantifier les pressions de gaz qui seraient atteintes, les flux d'eau potentiellement générés par la production de gaz, les voies de migration préférentielles des gaz à l'état gaz et à l'état dissous, et les temps caractéristiques associés. Il en est de même pour le comportement hydromécanique des différents ouvrages.

4.7 Les caractéristiques géomécaniques/géotechniques de la ZIRA déterminées par la campagne de reconnaissance sismique dans la zone de transposition sont-elles comparables à celle du laboratoire ?

Page 133 « **Vraisemblablement, des informations complémentaires à cet égard seront disponibles avec les résultats des récentes études sismiques 3D (2010) centrées sur la ZIRA en complément de la campagne sismique de 1999-2000 centrée sur le laboratoire souterrain. On peut probablement s'attendre à ce que l'une des premières activités dans l'exploration de la ZIRA sera de confirmer les caractéristiques prévues sur la base des travaux antérieurs, ou de déterminer là où des modifications dans les extrapolations des caractéristiques prévues pourraient être nécessaires** ».

Le traitement de la sismique 3D, notamment l'inversion stratigraphique, donnera une image plus précise des variations d'impédance acoustique de chacune des trois grandes séquences sédimentaires du Callovo-Oxfordien. L'impédance acoustique étant reliée aux caractéristiques mécaniques, on disposera d'une méthode indirecte d'étude de leurs variations spatiales, mais intégrant un volume équivalent à la taille des ouvrages.

4.8 Performance des revêtements en béton et leurs interactions avec l'EDZ

Page 134 « **Les mesures effectuées sur le site du laboratoire Meuse/Haute-Marne montrent que la perméabilité de l'argilite augmente de 3 à 5 ordres de grandeur, soit un facteur 1000 à 100 000. Il est difficile de croire que la charge/décharge de ces fractures dans la zone perturbée soit un processus élastique. En d'autre terme, il est douteux que la perméabilité de la zone perturbée puisse être sensiblement restaurée pour se rapprocher de la valeur d'origine. Quels tests ont été effectués (ou conçus) pour démontrer cette cicatrisation quasi-totale de fractures** ».

Les perméabilités de 3 à 5 ordres de grandeur supérieure à celle du Callovo-Oxfordien ne représentent pas la perméabilité d'un milieu poreux, mais la transmissivité de certaines des fractures induites par le creusement. La diminution de la transmissivité de ces fractures n'est pas un processus purement mécanique. D'une part, une augmentation de la contrainte normale à une fracture conduit à une diminution au carré de son ouverture géométrique et donc sa transmissivité. D'autre part, l'arrivée d'eau dans les fractures provoque le gonflement des particules argileuses en paroi et donc la fermeture des fractures. Ce phénomène n'est effectivement pas réversible. Le gonflement se maintient même à faible contrainte, maintenant fermée la fracture.

Plusieurs types d'essais ont été réalisés en laboratoire de surface sur des échantillons fracturés et montrent que :

- l'augmentation de la pression sur un échantillon fracturé conduit à une décroissance de la transmissivité des fractures en fonction de la pression de confinement,
- la circulation d'eau, ayant la composition de l'eau porale des argilites, dans une fracture provoque une décroissance de sa transmissivité en fonction du temps, d'abord rapide puis ralentissant progressivement. Des images par microtomographie X ont mis en évidence la fermeture de la fracture par le gonflement et le réarrangement des particules argileuses à ses épontes.

Des tests hydrauliques réalisés dans le Laboratoire souterrain ont montré qu'*in situ*, les transmissivités décroissent avec l'injection d'eau dans les fractures. L'essai CDZ « compression de l'EDZ » en cours a pour but de voir l'impact d'un chargement mécanique sur la connectivité du réseau de fracture (application de l'effort sur 1 m²) et sera suivi d'une phase d'injection d'eau dans la zone fracturée puis d'un nouveau chargement mécanique. Tout au long de cet essai des mesures de perméabilité seront réalisés.

Enfin, comme indiqué lors de la rencontre entre l'Andra et l'IEER du 16 février, un ouvrage international récent a compilé l'ensemble des données acquises sur les différentes formations argileuses (Self-Sealing of Fractures in Argillaceous Formations in Context with the Geological Disposal of Radioactive Waste, Editor : H. Bock, document OECD/NEA n° 6184, 2010). Il y est mis en évidence que les processus d'auto-colmatage sont les mêmes dans les différentes formations analysées dans ce rapport.

Page 134 « Plus précisément, les essais montrent que la contrainte de déformation, la saturation et la température ont toutes une influence significative sur le taux de fluage... Une meilleure intégration de l'influence combinée de ces facteurs est nécessaire pour démontrer l'étendue des avantages (et l'absence de contre-performance). Par exemple, la citation suivante illustre le problème ainsi que le caractère non concluant des affirmations ».

L'influence de la température sur la vitesse de fluage s'exprime par la formule :

$$\dot{\epsilon}^{vp} = A_0 e^{-\frac{B}{RT}} \dot{\epsilon}_{20^\circ}^{vp}$$

avec B est l'énergie d'activation (J·mol⁻¹),
 R est la constante de Boltzmann ($R = 8,32 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$),
 T est la température absolue (K),

Cette équation conduit à multiplier la vitesse de fluage par un facteur de 1,5 environ lorsque la température passe de 20°C à 50°C.

Pour ce qui concerne les effets de la désaturation, ceux-ci seront forcément limités de l'ordre du mètre en périphérie des ouvrages ventilés. De ce fait, si effectivement la vitesse de fluage diminue fortement lorsque l'argilite est très désaturée, ceci n'aura qu'une très faible répercussion sur les déformations d'ensemble du massif rocheux.

4.9 Observations finales et conclusions.

Page 135 « Cette hypothèse d'une éventuelle restauration d'un état apparemment intact, sous des contraintes isotropes, semble excessivement optimiste. Par exemple, l'état de pré-construction comprend des contraintes déviatoriques, comme le reconnaît explicitement l'Andra, comme elle l'affirme à plusieurs reprises dans ses réflexions sur les concepts de stockage. Une hypothèse raisonnablement prudente, et qui emporterait notre adhésion, serait de supposer que l'EDZ ne se répare pas entièrement elle-même pour créer une perméabilité et/ou un état de contrainte *in situ* sans altération par rapport à la situation avant la construction. En fait, il peut être préférable (et il serait certainement plus prudent) de considérer que l'EDZ conserve le pire état de dommages estimé tout au long de la durée de vie du stockage ».

L'Andra a adopté cette démarche pour le Dossier 2005. Par prudence, pour les évaluations de sûreté post fermeture, l'Andra n'a pas pris en compte la capacité d'auto-colmatage des argilites et la récupération par l'EDZ d'une perméabilité proche de celles des argilites non perturbées. Pour tous les scénarios de sûreté, une EDZ continue le long des ouvrages du stockage a été considérée avec des propriétés de l'EDZ initiale, et maintenue constante sur le million d'années, durée retenue pour les évaluations. Spécifiquement au droit des scellements, notamment les scellements de galeries du fait des coupures hydrauliques, la zone fracturée de l'EDZ a été représentée comme interrompue, en fonctionnement normal. Cependant, un scénario « défaut de tous scellements » a été étudié pour lequel l'EDZ (zone fracturée et zone microfissurée) est continue partout dans le stockage jusqu'au toit du Callovo-Oxfordien au niveau des ouvrages de liaison surface-fond.

4.4 Chapitre 5 - Aspects thermiques

4.4.1 Conclusions

Conclusion 1 : « La documentation des modèles thermiques concernant les hypothèses, les conditions et les données d'entrée, est tellement dispersée qu'il est impossible de les retrouver et de les vérifier [...] par conséquent la présentation des résultats et les conclusions présentées dans les documents manquent de transparence ».

La description de la charge thermique du stockage est synthétisée dans le tome « évolution phénoménologique du stockage » et de façon plus détaillée dans le rapport Andra n°.NT.ASIT.03.0118 intitulée « La charge thermique d'un stockage - Site de Meuse / Haute-Marne »

Le document Andra n° C.NT.ASIT.03.0118 cité dans le rapport IEER décrit :

- les données d'entrée de toutes natures (colis, scénarios, critères thermiques, architectures, concepts,...) ;
- les valeurs des paramètres utilisées (les références afférentes aux choix des valeurs de paramètre sont référencées dans cette note conceptuelle) ;
- les phénomènes pris en compte ;
- les résultats.

Conclusion 2 : « Pour la conductivité thermique de la bentonite l'Andra a utilisé une valeur plutôt élevée en supposant que sa saturation initiale serait élevée et qu'elle se resaturerait à 100 %. Bien que ces hypothèses puissent être raisonnables pour l'évacuation des déchets vitrifiés, elles pourraient ne pas s'appliquer à l'évacuation du combustible usé, où une période de faible saturation pourrait se produire dans les 100 premières années, indiquant une plus faible valeur de la conductivité thermique ».

Les simulations thermiques ont tenu compte du couplage entre l'état de saturation en eau de la bentonite et la conductivité thermique, soit de manière totalement couplée avec notamment des paramètres thermiques évalués en fonction du degré de saturation en eau, soit de manière simplifiée et enveloppe en considérant deux états de saturation en eau successifs dans le temps :

- De 0 à 100 ans, des caractéristiques thermiques associés un état de saturation de 80 % ;
- Au delà de 100 ans, des caractéristiques thermiques associés un état de saturation de 100 %.

Conclusion 3. « L'utilisation de données puisées dans la littérature ouverte au publique a abouti, pour les propriétés thermiques de l'argile gonflante dans le scénario S2, à un objectif légèrement dépassé. Nous reconnaissons que nous avons utilisé un modèle simplifié, bien que réaliste. Il est essentiel pour l'Andra d'aborder et de résoudre cette question en détail (voir la recommandation ci dessous) ».

Il est montré ci-après que le modèle simplifié utilisé par l'IEER introduit un biais dans la simulation expliquant que la température obtenue soit supérieure à celle calculée par l'Andra.

Conclusion 4. « Malgré une présentation très complète des méthodes de mesures des propriétés thermiques, le choix de la méthode « flash » laissera planer un doute sur la validité des résultats de conductivité dans les milieux non isotropes tels que l'argilite du Callovo-Oxfordien ».

La méthode flash n'a pas été la seule utilisée ; toutes les méthodes mises en œuvre ont fourni les mêmes valeurs. Les températures mesurées *in situ* lors des essais thermiques dans le Laboratoire souterrain correspondent aussi aux mêmes conductivités thermiques. Par ailleurs, ces différentes méthodes ont été comparées sur des matériaux standards internationaux.

Conclusion 5. « Des valeurs incohérentes de conductivité thermique dans les documents ultérieurs au Dossier 2005 Argile sont une source de préoccupation et demandent une vérification de la traçabilité et du programme d'assurance de la qualité, même si les différences sont petites et sont considérées comme négligeables ».

Il n'y a pas de valeur incohérente. Chaque expérimentation fait l'objet d'une traçabilité depuis la conception jusqu'à l'analyse des résultats. L'ensemble des données concernant les principaux paramètres fait l'objet d'une analyse critique.

4.4.2 Analyse détaillée du rapport

5.1 Examen de la réponse thermique couplée du site de stockage proposé et propriétés thermiques de la formation hôte.

5.1.1 Les scénarios de mise en stockage

Page 143 « Bien que n'étant pas envisagé par l'Andra dans la présente conception du site de stockage, du combustible nucléaire irradié non retraité de type CU, d'un volume et d'un dégagement thermique très importants ».

Voir la position de l'Andra vis-à-vis des recommandations du chapitre 3.

5.2 Examen des propriétés thermiques de la roche hôte du Callovo-Oxfordien

5.2.1 Calculs de cadrage avec un modèle approximatif à trois dimensions pour un colis de combustible usé de type CU1

Page 147 « Le problème avec les valeurs de conductivité présentées dans le Tableau 3.4.1 est que leur usage dans une situation de désaturation de MX80 n'est pas réaliste si la saturation est considérablement diminuée par la chaleur et des températures élevées pendant la période thermique. A une température près de, ou supérieure à 90 °C, la saturation peut être réduite de 80 % à 20 %, ou 10 %, voire presque zéro ».

Dans le dossier 2005, les concepts d'alvéoles considérés pour les combustibles usés étaient équipés d'une barrière ouvragée à base d'argile gonflante.

Dans les conditions du stockage sur la base des importantes données expérimentales et de simulation disponibles, il n'est pas attendu que cette barrière ouvragée se désature au cours des premiers siècles qui constituent la phase thermique et ce, pour les principales raisons suivantes :

1. Par conception, la température maximale dans la barrière ouvragée à base de bentonite sera inférieure à 100°C ; il n'est donc pas attendu de processus de vaporisation-condensation susceptible d'entraîner une désaturation significative de zone interne de la barrière ouvragée (i.e. au contact des colis de stockage).
2. Le potentiel de succion (potentiel négatif) de l'eau interstitielle dans la bentonite mise en place à l'état non saturé sera très élevé (plusieurs dizaines à centaines de bars) ; ce potentiel limite fortement de manière générale tout effet de désaturation, et surtout génère un appel d'eau préférentiel vers la bentonite depuis les argilites qui elles sont saturées (ou éventuellement faiblement désaturées en paroi) et avec un potentiel de l'eau nul ou positif.
3. Durant la période thermique, la production d'hydrogène par corrosion anoxique n'est pas suffisante pour désaturer la bentonite par sa face interne.

Indépendamment de la thermique, l'absence de ventilation de l'alvéole après mise en place des colis exclut une désaturation tant de la barrière ouvragée que des argilites en champ proche. Globalement, le transitoire de resaturation de la bentonite s'amorce à partir de l'interface avec l'argilite, et non l'inverse. L'atteinte de la saturation totale de la barrière ouvragée est rapide, de l'ordre de quelques dizaines d'années. Par conséquent, la prise en compte de paramètres thermiques représentatifs d'un état hydraulique fortement désaturé de la bentonite ne se justifie pas.

Page 148 « Il est difficile de savoir, à partir des documents de l'Andra, si un modèle isotrope ou anisotrope a été utilisé pour les études de référence ».

L'Andra a utilisé un modèle anisotrope représentatif de la réalité géologique, donné par le tableau suivant (cf. le rapport Andra n° C.NT.ASIT.03.0118)

Tableau 3.3.1 Propriétés thermiques du milieu géologique au droit du laboratoire souterrain de Meuse/Haute Marne [4]

Formation géologique	Profondeur [m]	Gradient géothermique [°C] (z = profondeur [m])	Masse volumique [g.cm ⁻³]	Conductivité thermique à 20°C λ_0 [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Chaleur spécifique à 20°C C_p [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Variation avec la température
Marnes du Kimméridgien	0 à -125	$T = 10 - 0,03z$	2,45	1,3	1024	pas de mesures
Oxfordien calcaire	-125 à -418	$T = 14,14 - 0,02(z+125)$	2,47	2,3	925	pas de mesures
Argilites du Callovo-Oxfordien	-418 à -473,5	$T = 19,63 - 0,03(z+418)$	2,46	1,6 \perp 2,2 //	996	$C_p = 2,0 T + 956$ (20 °C $\leq T \leq 200$ °C) $\lambda = \lambda_0(1 - 0,0009(T-20))$ (20 °C $\leq T \leq 80$ °C)
	-473,5 à -516	$T = 21,12 - 0,03(z+473,5)$	2,39	1,3 \perp 1,9 //	1136	$C_p = 2,6 T + 1084$ (20 °C $\leq T \leq 200$ °C) $\lambda = \lambda_0(1 - 0,0009(T-20))$ (20 °C $\leq T \leq 80$ °C)
	-516 à -548	$T = 22,53 - 0,02(z+516)$	2,42	1,9 \perp 2,7 //	1144	$C_p = 3,6 T + 1072$ (20 °C $\leq T \leq 200$ °C) $\lambda = \lambda_0(1 - 0,0009(T-20))$ (20 °C $\leq T \leq 80$ °C)
Dogger carbonaté	< -548	$T = 23,25 - 0,02(z+548)$	2,47	2,3 \perp 3,4 //	925	pas de mesures

\perp perpendiculaire à la stratification

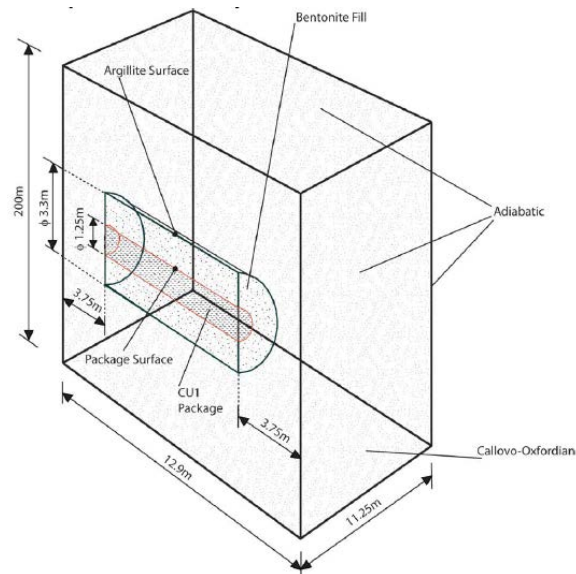
// parallèle à la stratification

Page 148 « D'après notre exercice simplifié de modélisation, il semble que l'objectif thermique maximal de 90 °C à l'interface colis/argile gonflante pourrait ne pas être obtenu pour les colis de type CU1 ».

L'IEER a retenu dans ses évaluations une hypothèse particulièrement pénalisante de conductivité thermique de la bentonite, correspondant à un état fortement désaturé,

Par ailleurs, la modélisation simplificatrice effectuée par l'IEER conduit également à surestimer les niveaux de température.

Figure 5-1 du rapport IEER



Le modèle conceptuel utilisé par l'IEER (figure ci-dessus) représente un motif élémentaire d'alvéole constitué par :

- un colis CU1 encadré par deux demi-intercalaires. Les demi-intercalaires ne sont pas explicitement représentés, ils sont remplacés par le milieu géologique,
- un bloc de roche hôte.

Ce choix conceptuel, à travers les plans de symétrie mis en jeu, représente *in fine* une alvéole de longueur infinie. Cette hypothèse de modélisation conduit à surestimer les niveaux de température en champ proche (95 à 105 °C pour modèle IEER contre 90 °C environ pour le modèle Andra).

Par ailleurs, la simplification conduisant à représenter des intercalaires par du massif géologique tend à annihiler les échanges thermiques longitudinaux et, par conséquent, à maximiser les transferts radiaux ce qui contribue, une nouvelle fois, à surestimer l'intensité du pic thermique en paroi des argillites.

La modélisation de l'IEER tend à surestimer le temps d'atteinte du paroxysme thermique (25 ans pour le modèle IEER, 15 ans environ pour le modèle Andra).

5.2.2 Les propriétés thermiques de la roche hôte Callovo-Oxfordienne

5.2.2.2 Revue des mesures in situ des propriétés thermiques

Page 154 « [La première présentation des mesures de conductivité thermique in situ pour l'argilite, le matériau le plus critique, se trouve dans Référentiel du Site 2005.](#) » (Référence à Référentiel du Site 2005 Tome 2 Figure 27-5 (p. 225)) ».

Les mesures de conductivité thermique présentées dans le Référentiel de Site 2005, Tome 2, figure 27-5 sont des mesures sur échantillons prélevés lors du forage EST205, et pour certains désaturés. Ce ne sont pas des mesures in situ.

Page 155 « [La différence entre les résultats pour \$\lambda_{\text{perp}}\$ indiquée à la figure 27-5 du rapport 2005 et dans la figure 19-5 du rapport 2009 demande à être justifiée](#) ».

Dans la figure 27-5 du rapport 2005, les conductivités reportées sont les mesures directes sur échantillons dans l'état où ces derniers se trouvent après prélèvement, c'est-à-dire légèrement désaturés. La mesure de conductivité thermique dépend du degré de saturation de l'échantillon. La thèse « Etude expérimentale de la conductivité thermique- Application au forage EST205 du site de Meuse/haute Marne (ANDRA) », de R. Jorand (2006) donne les degrés de saturation des différents échantillons du forage EST205 (tableau 6.3, p.160) qui varient entre 28 % à 62 %. Il est vrai que cette précision sur le degré de saturation des échantillons aurait du être apportée dans la figure 27-5 du Dossier 2005. Pour comparer différentes mesures issues de différentes expérimentations, il est nécessaire de corriger les mesures pour avoir les valeurs à saturation, les valeurs du forage EST 205 ont donc été corrigées pour être données à saturation dans la figure 19-5 du rapport 2009.

5.3. Revue des modèles thermiques

5.3.2 Le modèle thermique de l'Andra avec un modèle analytique numérique simplifié

Page 159 « [Toutefois, une différence subsiste encore quant à la forme des courbes de température comme le montre la Figure 5-6. Le résultat de la température issu du modèle de l'Andra tend également à être inférieur pendant le pic thermique](#) ».

L'IEER présente ici un second modèle utilisé pour évaluer le transitoire thermique sur 0-100 ans. Les différences entre les calculs IEER et les calculs Andra résultent des hypothèses simplificatrices retenues dans ce modèle de l'IEER :

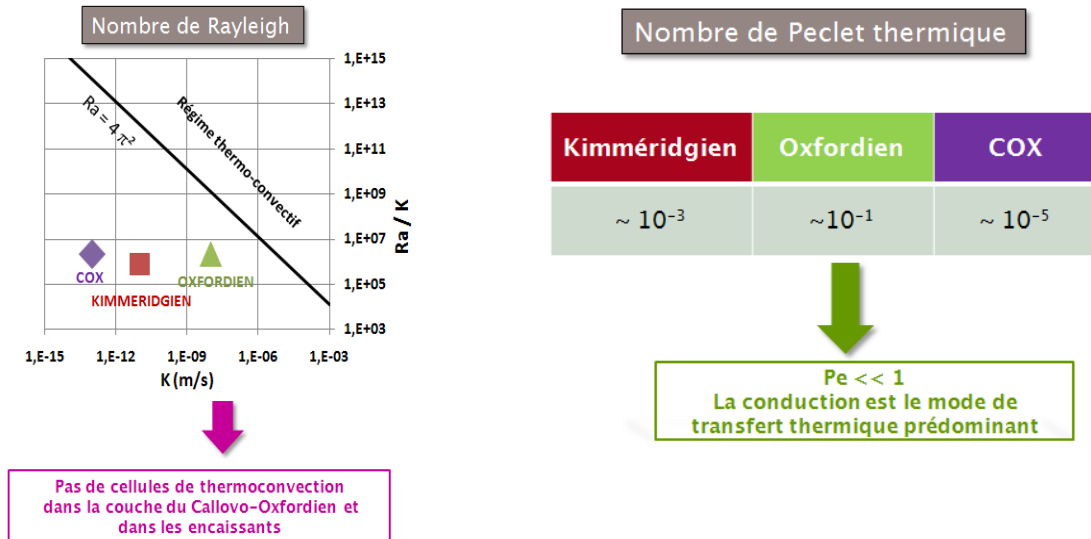
- la prise en compte d'une longueur d'alvéole de 200 m tend à maximiser le niveau de température par rapport à une alvéole de 30 m de partie utile (correspondant au concept Andra en 2005). De ce fait, il est normal que l'IEER obtienne (i) un paroxysme thermique plus élevé et (ii) plus tardif,
- dans le modèle IEER, la prise en compte d'un nombre limité d'alvéoles adjacentes (2 alvéoles de part et d'autre d'une alvéole courante), et la non prise en compte des alvéoles situées en vis-à-vis de la galerie d'accès et en vis-à-vis du fond d'alvéole, tend, à plus long terme, à sous-estimer les interactions thermiques entre alvéoles, ce qui se traduit par une phase de décroissance thermique plus précoce dans le cas du modèle IEER comparativement au modèle Andra qui prend en compte la présence des ces alvéoles.

5.4 Revue des effets thermiques

Page 159 premier paragraphe : « [Nous avons choisi la convection thermique comme l'élément le plus critique pour le transport potentiel de radionucléides dans l'environnement](#) ».

Au delà des processus purement thermiques, l'Andra a évalué les conséquences de la charge thermique vis-à-vis des autres processus phénoménologiques : thermo-mécanique, thermo-hydraulique, thermo-aéraulique, thermo-chimie etc...

En ce qui concerne les couplages thermo-hydrauliques, l'Andra a mené des évaluations visant à montrer, à travers les indicateurs adimensionnels que sont le nombre de Rayleigh et le nombre de Peclet, que le transitoire thermique n'est pas susceptible de générer de boucles thermo-convectives dans le Callovo-Oxfordien et dans les encaissants et que la conduction restait le mode de transfert dominant dans le milieu géologique.



Par conséquent, le choix de la convection thermique comme « élément le plus critique pour le transport potentiel de radionucléide » n'est pas justifié.

Il faut par ailleurs noter que l'Andra a pris en compte, dans les modèles de transport, l'effet de la température à travers :

- une dépendance du coefficient de diffusion effective des solutés à la température,
- une dépendance de la perméabilité à la température (liés aux effets de viscosité),
- les effets thermo-diffusion sous gradient de température (effet Soret).

« Bien que les analyses thermiques de l'Andra aient montré que les critères spécifiques de température sont respectés, nous sommes de l'avis qu'il existe des facteurs qui peuvent entraîner un dépassement potentiel du critère de température maximale dans le site de stockage. Par exemple, une conductivité thermique relativement faible de l'argilite (ou de la bentonite, le cas échéant) à l'horizon de la mise en stockage, une densité de mise en stockage plus importante que prévu en raison d'un inventaire plus important (ou différent), ou une roche non homogène, peuvent toutes entraîner une température de quasi-ébullition à l'interface avec l'argilite ».

La maîtrise de la température dans le stockage sera assurée par le dimensionnement des alvéoles de stockage. Celui-ci sera calé sur les conductivités des argilites mesurées localement et sur la puissance thermique des colis de déchets placés dans chaque alvéole, qui sera contrôlée.

« Des températures localisées plus élevées et des variations de température dans le plan horizontal peuvent engendrer une convection thermique localisée durant le pic thermique ».

Voir commentaire ci-dessus.

4.5 Chapitre 6 - Comparaison avec d'autres programmes qui ont réalisé des recherches souterraines en vue de sélectionner une ZIRA

4.5.1 Conclusions

Conclusion 1 : « Dans certains domaines, comme les scellements et les essais thermiques dans les forages en vraie grandeur, les programmes internationaux de collaboration ne peuvent pas se

substituer à des essais dans le laboratoire souterrain de Bure, même si le type de roche est similaire. Par exemple, les problèmes rencontrés avec des déformations de forages de 0,7 m de diamètre, ont dû être résolus d'une manière propre au site. Dans ce domaine, des travaux considérables restent à faire sur le site de Bure ».

L'Andra a présenté dans son dossier de demande de renouvellement de l'exploitation du Laboratoire souterrain son programme d'essais technologiques et d'expérimentations pour les années à venir, notamment concernant les scellements et l'essai thermique dans un forage en vraie grandeur.

Conclusion 2 : « Bien que la mise en stockage du combustible usé ne soit pas requise par la loi, des recherches pour son évacuation ont été suggérées. Les difficultés de la stabilisation de forages de 3,3 m de diamètre risquent d'être sérieuses et nécessitent des recherches sur le site ».

Voir la position de l'Andra vis-à-vis des recommandations du chapitre 3.

4.5.2 Analyse détaillée du rapport

6.2 Six programmes de comparaison

Pages 168-169 « L'une des préoccupations que nous avons porte sur la déformation du chemisage et/ou de l'alvéole, rendant très problématique la reprise des conteneurs ».

La reprise des conteneurs est conditionnée par l'intégrité du chemisage. L'épaisseur d'acier de ce dernier est calculée pour reprendre la charge du terrain, en tenant compte de la corrosion.

Page 172 « Dans une présentation par M. J. Delay (Andra) à la Conférence TOPSEAL de 2006, ...il était indiqué que : "Les travaux futurs dans le laboratoire comporteront la construction en vraie grandeur des différents composants d'un site de stockage, tels que les voûtes ou les scellements des voûtes et galeries." Nous n'avons pas trouvé de description des performances de ces tests dans les publications de l'Andra depuis 2006. Il serait instructif d'obtenir des informations sur ces essais (si, effectivement, ils ont été effectués) ».

Les alvéoles HA ont déjà fait l'objet d'une première série de tests. Un ouvrage d'un diamètre proche d'alvéoles MAVL et un test de construction et de performance d'un noyau d'argile de scellement et de son massif d'appui en béton seront réalisés à partir de 2012-2013.

6.4 Quelques remarques de comparaison

Page 174 « Nous sommes conscients du fait que les travaux dans le laboratoire souterrain de Bure se poursuivront pendant encore quelques dizaines d'années en parallèle avec d'autres aspects du programme du site de stockage. Nous savons aussi que certains des éléments énumérés dans la liste ci-dessus ont été étudiés par l'Andra. Toutefois, il aurait été souhaitable d'avoir réalisé un programme comparable [au Prototype Repository d'Äspö] pour tester l'ensemble du concept de stockage in-situ, même sans conteneurs en vraie grandeur, dans le laboratoire de Bure, avant la sélection de la ZIRA, pour une caractérisation ».

L'Andra va réaliser en 2012 dans le cadre du projet européen LUCOEX (Large Underground CONcept EXperiment) un essai de démonstration en vraie grandeur d'une alvéole HA soumise à un chauffage correspondant à la dissipation de chaleur par les colis de déchets vitrifiés. Il a pour but :

- de tester les modalités de construction d'une tête d'alvéole comme décrite dans le dossier 2009,
- de vérifier le fonctionnement de cette tête lors de la phase thermique,
- d'analyser l'impact thermo-mécanique sur la galerie d'accès,
- de vérifier le comportement THM de la roche autour de l'alvéole.

Les paramètres qui seront suivis sont entre autres :

- la distribution de la température dans le chemisage, la tête d'alvéole, la roche et la paroi de galerie ;
- la contrainte et le déplacement dans le champ proche de la roche ;
- la montée de la pression de l'eau et la répartition de la pression dans la roche.

Au bout de quelques années de chauffage, la tête d'alvéole sera obturée par un bouchon de bentonite dans lequel seront mesurés :

- l'absorption de l'eau ;

- la pression de fluide ;
- la pression de gonflement de la bentonite ;
- le déplacement du bouchon de béton bloquant le bouchon de bentonite.

6.5 Projet international (ESDRED)

Page 176 « Plus précisément, des essais in situ de mise en place en vraie grandeur d'un conteneur de déchets HAVL et de simulation d'essais thermiques après scellement sont importants ».

L'Andra a opté pour des essais de mise en place de conteneurs en vraie grandeur dans un tubage acier réalisés en atelier. Cela a permis d'imposer des rayons de courbure et des désaffleurements de tubes plus importants que ce qui pourrait être obtenu au Laboratoire souterrain.

Pour les essais thermiques voir supra.

Page 176 « Puisqu'il a été demandé à l'Andra (mais sans obligation de le faire) de considérer la mise en stockage du combustible usé, il serait très souhaitable d'aborder la question de la stabilité de forages de grandes dimensions dès que possible. Dans ce contexte, l'Andra devrait évaluer expérimentalement, dans le laboratoire de Bure, si des forages verticaux seraient plus adaptés et, dans quelle mesure ils pourraient ou non compromettre l'exigence de l'épaisseur de la roche hôte de la ZIRA dans l'éventualité où l'élimination d'une importante quantité de combustible usé deviendrait nécessaire ».

L'Andra a déjà évalué les avantages et inconvénients d'alvéoles verticales par rapport aux alvéoles horizontales (voir Dossier 2005 Tome Architecture et gestion du stockage géologique p 194). Les alvéoles verticales n'ont pas été retenues, du fait des nombreux avantages des alvéoles horizontales : moindre impact sur la formation géologique en termes de volume excavé et d'emprise du stockage, épaisseur de garde d'argilite non perturbée maximale, possibilité d'augmenter la longueur des alvéoles.