



**INSTITUTE FOR ENERGY AND
ENVIRONMENTAL RESEARCH**

6935 Laurel Avenue, Suite 201
Takoma Park, MD 20912

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

**Examen Critique du Programme de l'Andra sur les
Recherches Effectuées dans le Laboratoire Souterrain de Bure et
sur la
Zone de Transposition Pour Définir une ZIRA**

RAPPORT FINAL

préparé par

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

pour

Le Comité Local d'Information et de Suivi du Laboratoire de Bure (CLIS)

Directeur du Projet
Arjun Makhijani, Ph.D.

Coordinatrice du projet
Annie Makhijani

9 mars 2011
avec corrections 20 avril 2011

Auteurs du rapport (par ordre alphabétique)

Prof. Jaak Daemen, Ph.D.
Prof. George Danko, Ph.D.
Prof. Gerhard Jentsch, Ph.D.
Elena Kalinina, Ph.D.
Arjun Makhijani, Ph.D.
Krishan Wahi, Ph.D.

L'équipe de l'IEER

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

Chapitre 1: Champ d'application du travail, conclusions et recommandations - Arjun Makhijani

Chapitre 2: Données sismiques et caractérisation sismologique de la zone de transposition - Gerhard Jentzsch

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 – Elena Kalinina

Chapitre 4: Mécanique des roches - Jaak Daemen avec la participation de Krishan Wahi

Chapitre 5: Aspects thermiques – George Danko

Chapitre 6: Comparaison avec d'autres programmes qui ont réalisé des recherches souterraines en vue de sélectionner une ZIRA - Arjun Makhijani et Krishan Wahi

Traduction et relecture de traduction: Annie Makhijani

Traduction et relecture de traduction: Jean-Luc Thierry

Appui scientifique: Annie Makhijani

Documentaliste: Lois Chalmers

Table des Matières

Chapitre 1 : Champ d'application du travail, conclusions, et recommandations	9
1.1 Introduction.....	9
1.2 Critères pour la ZIRA	10
1.3 Thèmes abordés dans le rapport.....	11
1.4 Résultats et recommandations.....	13
1.4.1 Points forts :	13
1.4.2 Conclusions:.....	14
1.4.3 Recommandations.....	17
1.5 Références.....	20
Chapitre 2 : Données sismiques et caractérisation sismologique de la zone de transposition.....	21
2.1 La collecte des données sismiques, les investigations, les recherches et analyses pour la sélection de la ZIRA	22
2.1.1 Examen de la recherche sur l'homogénéité de la zone de transposition ou son absence	24
2.1.2 La caractérisation sismique.....	26
2.1.3 Evaluation du potentiel de recherche avec une résolution 2D et 3D de 5 mètres.....	28
2.2 Les séismes.....	30
2.2.1 L'analyse des risques sismiques et catalogues de la sismicité historique pour la région	30
2.2.2 Evaluation du séisme de référence et de l'aléa sismique sur le site.....	31
2.2.3 Evaluation des événements sismiques	36
2.2.4 Détermination de la secousse sismique maximale possible sur le site de Bure.....	37
2.2.5 Réponse du site aux séismes	38
2.3 Références.....	40
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	42
3.1 Introduction.....	44
3.2 Caractérisation des milieux géologiques dans la zone de transposition	45
3.2.1 Roche-hôte de la formation du Callovo-Oxfordien	46
3.2.2 Formations encaissantes.....	91
3.2.3 Analyse de l'évaluation de sûreté	92
3.3 Résumé.....	109

3.3.1 Propriétés de transport de la roche hôte	110
3.3.2 Examen des processus de transport dans la roche hôte.....	113
3.3.3 Analyse de la sûreté	113
3.4 Références	115
Chapitre 4 : Mécanique des roches	117
4.1 Inhomogénéités potentielles dans les propriétés mécaniques de la zone de transposition et leur rôle dans la sélection de la ZIRA.....	120
4.1.1 Différences et similitudes entre les discontinuités du laboratoire souterrain et celles identifiées dans le cadre de la recherche dans la zone de transposition.....	122
4.1.2 Éventuelles différences des besoins de soutènement pour la stabilité des creusements en fonction de la sélection de l'emplacement de la ZIRA.	125
4.1.3 Adéquation de la recherche sur l'effet de la déformation sur la stabilité à long terme	128
4.2 Comparaison de l'état de contrainte in situ et des paramètres de pression interstitielle entre le laboratoire souterrain et la ZIRA. Fiabilité de la recherche qui a conduit à estimer les paramètres de mécanique des roches dans la ZIRA.....	129
4.3 Transférabilité de la recherche sur les scellements dans le laboratoire souterrain à d'autres parties de la zone de transposition, notamment à la ZIRA.	129
4.4 Lien entre les aspects de mécanique des roches entrant dans la sélection de la ZIRA et la pertinence des études sismiques sur le terrain dans la zone de transposition.	132
4.5 Effet de l'évolution des gaz dans les conteneurs de déchets sur la stabilité des scellements	132
4.6 Examen de la recherche de l'Andra sur la condition de réversibilité sur une longue période de temps (≥ 100 ans).	132
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 ?.....	133
4.8 Performances des revêtements en béton et leurs interactions avec l'EDZ	133
4.9 Observations finales et conclusions.....	135
4.10 Références.....	137
Chapitre 5 : Aspects thermiques	142
5.1 Examen de la réponse thermique couplée du site de stockage proposé et propriétés thermiques de la formation hôte.	143
5.1.1 Les scénarios de mise en stockage.....	143
5.2 Examen des propriétés thermiques de la roche hôte du Callovo-Oxfordien.....	145
5.2.1 Calculs de cadrage avec un modèle approximatif à trois dimensions pour un colis de combustible utilisé de type CU1	146
5.2.2 Les propriétés thermiques de la roche hôte Callovo-Oxfordienne	151

5.3. Revue des modèles thermiques	155
5.3.1 Le modèle thermique de l'Andra dans le contexte des calculs de cadrage de la section 5.2.1.....	156
5.3.2 Le modèle thermique de l'Andra avec un modèle analytique numérique simplifié ..	157
5.4 Revue des effets thermiques	160
5.5 Références.....	161
Chapitre 6: Comparaison avec d'autres programmes qui ont réalisé des recherches souterraines en vue de sélectionner une ZIRA.....	164
6.1 Introduction.....	164
6.2 Six programmes de comparaison	166
6.3 Collaboration de l'Andra - Mont Terri et Mol.....	172
6.4 Quelques remarques de comparaison.....	173
6.5 Projet international (ESDRED).....	175
6.6 Références.....	177

Remerciements

L'équipe de l'IEER est sensible à la confiance que le CLIS lui a témoignée pour une deuxième fois. Nous tenons à remercier le Président du CLIS, M. Canova, de l'accueil qu'il nous a réservé lors de notre visite du mois d'août. Nous tenons également à remercier le personnel du CLIS pour son accueil et sa coopération, notamment M. Benoît Jaquet qui a facilité la visite du laboratoire souterrain de toute l'équipe le 18 août 2010 ainsi que de son assistance tout au long du déroulement du projet. Nous remercions l'Andra de nous avoir fourni des documents supplémentaires dont nous avons besoin pour notre évaluation et pour son accueil lors de notre visite du laboratoire souterrain le 18 août 2010. Nous avons aussi énormément bénéficié des commentaires critiques du CLIS, de son Président, M. Canova, son Vice-président, M. Fernbach, de M Jean-Marc Fleury, membre du CLIS, et de son Secrétaire général, M. Jaquet lors de leur visite en novembre 2010 aux Etats Unis pour participer à la réunion de discussion du rapport préliminaire de l'équipe de l'IEER.

Arjun Makhijani
Annie Makhijani
11 février 2011

Postscriptum

L'IEER a présenté ce rapport au CLIS le 14 février 2011 à Saint-Dizier. Le 16 février 2011, trois membres de l'équipe de l'IEER (Elena Kalinina, Annie Makhijani, et moi-même) ont rencontré l'Andra sur le site de Bure. M. Benoit Jaquet, le Secrétaire général du CLIS était également présent. Le 15 février à la demande de l'Andra, l'IEER lui avait fait parvenir des questions, relatives aux préoccupations majeures et aux recommandations formulées dans le rapport.

L'échange a été très productif, suivi d'un lunch. Avant notre départ, l'Andra nous a également fourni certains documents que nous avons demandés. Nous avons été aimablement reçus et nous souhaitons remercier l'Andra pour l'échange d'informations scientifiques, pour les documents, et pour le délicieux lunch.

Le 28 février, l'Andra a fourni des réponses écrites à nos questions. A la suite de certaines précisions apportées sur des questions factuelles et de nouvelles recherches de l'IEER, nous avons fait quelques modifications dans le rapport présenté au CLIS comme suit:

1. Contrairement à ce que pensait l'IEER, L'Andra a utilisé des données de forage, et non pas les campagnes sismiques de surface pour conclure que les microfissures sont colmatées. L'IEER approuve cette démarche pour établir si les microfissures sont colmatées. Par conséquent, cette conclusion a été modifiée (Chapitre 1, Chapitre 2 et une modification a été effectuée dans les textes des Chapitres 2 et 3 pour tenir compte de ce fait).
2. L'Andra a indiqué qu'elle utilise des catalogues standard de séismes dans son analyse des magnitudes et des intensités des séismes devant être utilisées pour analyser les questions

sismologiques sur le site de Bure. Nous avons modifié le texte et la conclusion pour tenir compte ce fait.

3. Après avoir trouvé des résultats plus détaillés dans la littérature de l'Andra, nous avons examiné de plus près les recherches de l'Andra sur la conductivité thermique de bentonite. Nous avons modifié le texte pour tenir compte de notre présent jugement sur l'utilisation de l'Andra d'une valeur de conductivité plus élevée de la bentonite que celle utilisée dans nos calculs.
4. L'Andra a fourni à l'IEER un rapport comportant des données qui montrent qu'une faille située en partie sous la ZIRA (Figure 3-1 dans le rapport de l'IEER) ne traverse pas la formation du Callovo-Oxfordien, mais se trouve bien en dessous, dans le Dogger. Nous avons ajouté du texte indiquant que la préoccupation de l'IEER au sujet cette faille a été abordée.
5. L'Andra a déclaré suivre un processus d'analyse pour déterminer si, quand et comment les données provenant d'autres sites sont transférées pour utilisation dans la compréhension et l'analyse du site de Bure et a fourni à l'IEER un article publié dans une revue scientifique traitant de ce sujet. L'IEER a ajouté du texte dans les Chapitres 4 et 6 pour indiquer que l'Andra suit une procédure pour aborder la question de transférabilité.

À l'exception des conclusions concernant les points 1 et 2 ci-dessus et des petites modifications sur la conductivité de la bentonite (point 4 ci-dessus), toutes les autres conclusions et recommandations du rapport, présenté le 14 février 2011, restent essentiellement inchangées.

Nous avons demandé au CLIS de télécharger la réponse de l'Andra aux questions de l'IEER (la réponse contient également les questions), ainsi que le rapport de l'IEER sur son site. L'IEER estime que ses conclusions et que la réponse de l'Andra illustrent la nature du travail qui reste à faire et l'interprétation des données qui ont été déjà recueillies. Cela pourrait servir de base à un futur échange productif, si cela est souhaité.

Enfin, toute l'équipe de L'IEER, et en particulier la coordinatrice de ce projet, Annie Makhijani, et moi-même tenons à remercier le CLIS, notamment son Président M. Canova et son Secrétaire général M. Jaquet pour l'accueil chaleureux qu'ils nous ont accordés.

Arjun Makhijani
9 mars 2011

Chapitre 1 : Champ d'application du travail, conclusions, et recommandations

1.1 Introduction

En France, les recherches sur le développement d'un stockage des déchets de haute et moyenne activité et à vie longue (HA-MAVL) en formation géologique profonde se concentrent sur un site près de Bure, dans la région Meuse/Haute-Marne. L'Andra a mené plusieurs années de recherches dans un laboratoire souterrain sur le site. Elle a également étudié un périmètre de 250 kilomètres carrés (km²)¹ appelé zone de transposition dans lequel se trouve le laboratoire souterrain. La loi interdit à l'Andra d'implanter un site de stockage au même endroit que le laboratoire souterrain. Par conséquent, l'étude de la zone de transposition est nécessaire pour la sélection de l'emplacement qui doit être caractérisé pour une utilisation potentielle comme site de stockage.

En 2009, l'Andra a choisi une zone, dite « zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie », ou ZIRA, pour la caractérisation d'un site de stockage. L'objectif de cette évaluation des travaux de l'Andra sur le site de Bure consiste à déterminer si les travaux de recherche qui ont été faits dans le laboratoire souterrain et dans la zone de transposition ont été suffisamment avancés et sont suffisamment concluants pour déterminer et définir une ZIRA propice à l'implantation d'un futur stockage. Une partie de l'examen consiste à donner un avis sur les éléments favorables ainsi que défavorables révélés par les recherches menées à ce jour. Sur cette base, l'examen tire également des conclusions quant à la suffisance des travaux de recherche, en ce qui concerne les données importantes qui ont été recueillies, et détermine s'il existe, pour le moment, des lacunes importantes ou critiques dans les données qui indiqueraient que des travaux supplémentaires sont nécessaires avant d'arriver à certaines conclusions.

En bref, ce rapport porte sur la sélection de la ZIRA au sein de la zone de transposition, elle-même précédemment sélectionnée. Nous devons aussi dire ce que ce rapport n'est pas. Il ne traite pas de la sélection du site de Bure ou de la définition de la zone de transposition. Ce processus a déjà eu lieu il y a plusieurs années. Mis à part l'examen périodique par la Commission Nationale d'Evaluation (CNE), les travaux de l'Andra sur le site, y compris le laboratoire souterrain, ont fait l'objet de nombreuses évaluations, dont celle réalisée par l'Institute for Energy and Environmental Research (l'Institut de recherche sur l'énergie et l'environnement) pour le Comité Local d'Information et de Suivi (CLIS).² Dans le présent rapport, nous ferons référence aux conclusions de notre examen antérieur quand cela sera pertinent.

Dans le cadre de cet examen, toute l'équipe scientifique de l'IEER a visité le laboratoire souterrain de Bure ainsi que la bibliothèque et les bureaux du CLIS les 18-19 août 2010. Nous tenons à remercier nos hôtes, l'Andra et le CLIS, pour cette visite informative et pour l'accueil chaleureux que nous avons reçu.

¹ IRSN 2009 p. 1

² IEER 2005

1.2 Critères pour la ZIRA

L'Andra avait déjà retenu certains critères lors de son choix de la zone de transposition. Les critères pour le choix de la ZIRA doivent être considérés dans ce contexte. Selon l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), les critères de l'Andra pour la zone de transposition étaient :

- une épaisseur de la formation argileuse du Callovo-Oxfordien (formation « hôte » retenue pour l'implantation des ouvrages souterrains) supérieure à 130 m ;
- un cadre structural similaire à celui défini dans l'environnement immédiat du laboratoire de Meuse/Haute-Marne, caractérisé notamment par l'absence de structure tectonique identifiée dans la formation du Callovo-Oxfordien, et un éloignement d'un kilomètre des failles majeures de Gondrecourt à l'Est de la zone, et de 1,5 km de la faille de la Marne au Sud-Ouest de la zone ;
- l'homogénéité minéralogique de la formation du Callovo-Oxfordien attestant d'une similitude des propriétés mécaniques, de transport et de rétention de cette formation à l'échelle de la zone de transposition ;
- une profondeur du milieu de la couche du Callovo-Oxfordien ne dépassant pas 630 m, en vue de limiter les perturbations géomécaniques occasionnées par le creusement de la roche.³

Les cinq critères spécifiques retenus pour la sélection de la ZIRA sont les suivants:

- une épaisseur de la formation hôte de plus de 140 m,
- un gradient de charge hydraulique inférieur à 0,2 m/m,
- une profondeur du milieu de la couche ne dépassant pas 600 mètres,
- la possibilité d'implanter les infrastructures souterraines perpendiculairement au pendage de la couche hôte,
- une épaisseur réduite de couches karstiques (Barrois) à traverser pour établir les liaisons jour-fond (puits ou descenderie).⁴

L'Andra a sélectionné une ZIRA de 30 kilomètres carrés dans le sud-est de la zone de transposition. Selon l'IRSN, c'est environ deux fois la superficie jugée nécessaire pour un stockage des déchets.⁵

Ce rapport examine l'état des données (dans la mesure où celles-ci sont à notre disposition), leur analyse par l'Andra, ainsi que les conclusions que l'Andra en tire pour évaluer dans quelle mesure les connaissances acquises dans le laboratoire souterrain et de la recherche dans la zone de transposition permettent de confirmer que la sélection de la ZIRA répond à ces critères. Comme indiqué, nous recommandons également des recherches supplémentaires dans les

³ IRSN 2009 pp. 1-2

⁴ IRSN 2009 pp. 3-4

⁵ IRSN 2009 p. 4

domaines où cela s'avère nécessaire ou souhaitable pour garantir que ces critères soient remplis. En ce qui concerne les critères eux-mêmes, nous les jugeons également pertinents.

D'autres critères pour la ZIRA ont traités à des caractéristiques de surface, comme les eaux de surface, l'emplacement des installations de surface à proximité des villages, etc. Le présent rapport ne tient pas compte de ces critères, car sa portée est limitée aux considérations géologiques relatives à la sélection de la ZIRA.

1.3 Thèmes abordés dans le rapport

Ce rapport comporte cinq chapitres qui suivent cette introduction (dont l'auteur est Arjun Makhijani). L'auteur (ou les auteurs) de chaque chapitre est indiqué, mais il convient de noter qu'il s'est agi d'un effort de collaboration avec, pour chaque chapitre (dont cette introduction), l'apport et les suggestions de toute l'équipe.

Avant d'énumérer les chapitres et leur contenu, il convient de noter que cette évaluation a été réalisée dans une période très courte vu le volume de la documentation à examiner. La courte durée de cette étude a été rendue nécessaire par les exigences auxquelles le CLIS se trouvait lui-même confronté. En outre, nous avons constaté que, souvent, l'Andra émet ses conclusions sans fournir les références aux données sous-jacentes ou aux matériaux d'analyse. Il est donc très difficile de retrouver sur quelle base reposent les conclusions de l'Andra. Dans ces conditions, nous ne pouvons pas être certains que les lacunes que nous avons constatées sont, dans tous les cas, des lacunes réelles ou si les données sont « enfouies » dans une quelconque publication, par exemple une thèse de doctorat, qui contiendrait les informations nécessaires sur les lacunes identifiées. Bien sûr, nous avons essayé d'être aussi prudents que possible dans l'identification des lacunes et la formulation de nos recommandations, mais cette interrogation doit être gardée à l'esprit. Nous conseillons que l'Andra, dans l'éventualité où elle affirmerait disposer de données ou d'analyses qui combleraient les lacunes identifiées ou si elle a déjà effectué des recherches recommandées, fournisse au CLIS et à ses évaluateurs les informations spécifiques pour permettre une vérification de ses déclarations. Le fait que nous n'avons pas toujours pu retrouver comment l'Andra est arrivée à ses conclusions nous a conduit, en partie, à mener notre propre vérification des évaluations de l'Andra dans les Chapitres 3 et 5. Notre propre vérification a aidé l'équipe de l'IEER à évaluer certaines des conclusions de l'Andra se rapportant à la pertinence de la sélection de la ZIRA par rapport aux critères spécifiés.

Les autres chapitres sont:

Chapitre 2 : Les données sismiques et la caractérisation sismique (Auteur: Gerhard Jentzsch). L'homogénéité de la zone de transposition et, par conséquent, de la ZIRA est un des critères les plus importants. L'absence de microfissures, l'étendue du fossé de Gondrecourt et de la faille de la Marne, et l'évaluation des recherches 2D et 3D effectuées jusqu'à présent sont abordées dans ce chapitre. En outre, la caractérisation sismologique du site et de ses environs est abordée. La caractérisation de l'aléa sismique dans la région, la capacité d'estimer l'intensité maximale prévue pour servir de base à la conception des structures souterraines et de surface sont également abordées dans ce chapitre.

Chapitre 3 : Les paramètres hydrogéologiques (Auteur: Elena Kalinina). Ce chapitre évalue l'état des recherches de l'Andra sur les caractéristiques et les propriétés de la roche hôte ainsi que celles des formations encaissantes de la zone de transposition. Il s'agit de déterminer comment ces propriétés sont susceptibles d'affecter le transport des contaminants dans les milieux géologiques et si les divers facteurs qui influent sur le transport à long terme et la performance du site de stockage ont été suffisamment pris en compte. Le chapitre examine l'homogénéité horizontale et verticale (ou son absence), les variations et les incertitudes de la conductivité hydraulique, et d'autres questions hydrogéologiques d'importance. L'objectif n'est pas d'évaluer les performances du site de stockage. Pour cela il faudra attendre la caractérisation de la ZIRA. Les objectifs sont: (i) de déterminer si ces incertitudes peuvent ou devraient avoir été réduites grâce à des travaux supplémentaires dans la zone de transposition, et (ii) d'indiquer les domaines de recherche et les méthodes d'analyse qui peuvent apporter une image plus précise des incertitudes, à ce stade, avant la caractérisation de la ZIRA.

Chapitre 4 : Mécanique des roches (Auteur: Jaak Daemen avec la participation de Krishan Wahi). Ce chapitre examine les recherches faites par l'Andra sur la réponse mécanique et thermomécanique du site de stockage proposé et sur les propriétés de l'argilite. Les implications des inhomogénéités sur la stabilité des alvéoles ou sur la construction de l'infrastructure sont examinées. Par exemple, l'évidence du déplacement de cisaillement le long de certaines fractures et les problèmes potentiels qu'il peut présenter pour un scellement satisfaisant de l'alvéole sont discutés. L'étendue de la recherche de l'Andra et les éléments de preuve présentés sur divers sujets apparentés sont examinés.

Chapitre 5 : Aspects thermiques (Auteur: George Danko). Ce chapitre examine les différents objectifs thermiques qui doivent être atteints pour un site de stockage dans la zone de transposition. Il examine les caractéristiques thermiques de la zone de transposition ainsi que le dimensionnement du site de stockage afin de répondre aux critères de température déterminés par l'Andra. Tout en reconnaissant que les critères de conception ne sont pas tenus de prendre en compte le stockage de combustibles usés non retraités, le chapitre examine les questions qui pourraient se poser si cette éventualité se concrétisait dans le futur.

Chapitre 6 : Comparaison avec d'autres programmes (Auteurs: Krishan Wahi et Arjun Makhijani). Il existe un certain nombre de programmes de site de stockage en profondeur dans le monde. Les plus avancés, en termes de recherches et de planning, se trouvent en Europe. Plusieurs d'entre eux ont des laboratoires de recherche souterrains qui leur sont associés. Ce chapitre examine brièvement certains travaux effectués sur d'autres sites de stockage et évalue leur pertinence pour le projet de Bure. Il résume certaines des importantes collaborations entre l'Andra et d'autres programmes, notamment ceux du Mont Terri en Suisse et de Mol en Belgique. Il examine aussi brièvement le programme Engineering Studies and Demonstration of Repository Designs (ESDRED) dont l'Andra a été le coordinateur.

Chaque chapitre énumère ses propres conclusions et recommandations. Pour faciliter la lecture, quelques unes des plus importantes sont résumées ci-dessous.

1.4 Résultats et recommandations

1.4.1 Points forts :

1. **L'Andra et la recherche du site de stockage :** dans un certain nombre de domaines, l'Andra est à l'avant-garde en ce qui concerne la recherche en laboratoire souterrain. Son excellent travail, seule ou en collaboration avec des organismes internationaux, a fait avancer l'état de l'art de la science et l'ingénierie de mise en stockage. Ses efforts de recherche, à l'appui de son programme de stockage de Bure, sont remarquables et impressionnants. Le large éventail des efforts approfondis est absolument remarquable. Lors de sa visite du 18 août 2010, l'équipe de l'IEER a été très impressionnée par le travail effectué dans le laboratoire souterrain. Néanmoins, nous formulons aussi des réserves et des inquiétudes qui sont décrites ci-dessous.
2. **Sélection de la ZIRA :** 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. Les critères des données d'entrées basés principalement sur la sédimentologie, l'épaisseur et la profondeur ont été respectés. Une ZIRA de 30 km² a été sélectionnée au sein de cette zone à partir de critères socio-économiques de surface, en consultation avec les collectivités locales de la région. Nous n'avons pas examiné les considérations socio-économiques relatives à la sélection de la ZIRA parce qu'ils ne relèvent pas de cette évaluation. Toutefois, nous notons que, puisque des considérations socio-économiques ont été utilisées pour passer de 100 km² à 30 km², la question de savoir si la ZIRA, retenue au sein des 100 km², est la meilleure d'un point de vue géologique, n'a pas pu être abordée dans notre examen.
3. **Les failles majeures et les données sismiques :** Les failles majeures, le fossé de Gondrecourt et la faille de la Marne, sont en dehors de la ZIRA et pourraient offrir des caractéristiques hydrogéologiques favorables dans les directions où elles se trouvent. Cependant, il n'y a pas de caractéristiques hydrogéologiques similaires dans les autres directions. Les campagnes sismiques 2D (2007-2008) sur toute la zone de transposition et 3D (1999-2000) centrées sur le laboratoire (sont convaincantes).
4. **La conception modulaire :** La méthode de la conception modulaire pour le plan du site de stockage est un principe solide. L'importante distance entre les modules de différents types de déchets améliore considérablement la crédibilité des arguments à l'appui des performances de confinement et d'isolement et de la mise en œuvre de la réversibilité, bien que le coût supplémentaire puisse être considérable.
5. **Propriétés thermiques :** Les méthodes de mesure utilisées par l'Andra sont crédibles et jugées susceptibles d'évaluer correctement les propriétés thermiques, même dans une roche anisotrope. L'anisotropie de la conductivité thermique de l'argilite est un détail important dans la réalisation de calculs thermiques prédictifs. Nos analyses confirment

qu'une valeur isotrope « équivalente » (par exemple, la moyenne géométrique des valeurs des composants dans les différentes directions) peut être utilisée pour produire une réponse thermique suffisamment « équivalente » et prudente.

1.4.2 Conclusions:

1. **Une vision optimiste des performances :** Dans l'ensemble, en ce qui concerne les performances du stockage, la préoccupation la plus grande résulte probablement d'un optimisme excessif et généralisé dans l'interprétation de phénomènes complexes. Un exemple frappant se retrouve dans plusieurs rapports : le postulat selon lequel le site de stockage, sur le très long terme, se comportera essentiellement comme un fluide idéal sur une période de plus d'un million d'années: tous les vides seront fermés et scellés, y compris les espaces vides dans les colis de déchets primaires, les alvéoles de stockage, la roche perturbée (fracturée et microfissurée), et les scellements. Toutes les contraintes déviatoriques disparaîtront. En fait, l'Andra suppose que le site de stockage reviendra à un état de pré-construction ou tout du moins proche, pour ce qui est des caractéristiques d'isolement des déchets et de comportement. Les hypothèses de l'Andra sur les performances semblent souvent trop optimistes.
2. **Le calendrier :** Compte tenu des recherches et de la caractérisation qui restent à faire, le calendrier officiel pour le projet de site de stockage est beaucoup trop tendu. Des travaux supplémentaires sur une période de temps supérieure à quelques années seront nécessaires; cependant, comme beaucoup de travail reste à faire, nous ne pouvons pas proposer une estimation plus précise de la durée de temps supplémentaire qui sera nécessaire. En tout état de cause, nous sommes convaincus qu'un allongement important du calendrier actuel sera nécessaire.⁶
3. **Le terme source :** A ce jour le terme source n'a pas encore été clairement défini. La conception du site de stockage, les évaluations des performances, le type d'alvéoles à creuser dépendent tous des quantités et des types spécifiques de déchets qui seront enfouis. L'Andra a été autorisée à poursuivre son travail en supposant que tous les déchets seront retraités. Dans le même temps il a été suggéré (sans que cela soit obligatoire) que l'évacuation du combustible usé non retraité devrait être envisagée. Aucune limite quantitative pour chaque type de déchets ainsi que pour la totalité du terme source n'a été spécifiée. Cette importante lacune laisse planer le doute sur de nombreux autres aspects, par exemple (i) les résultats de la performance, (ii) la taille du site de stockage, et (iii) si le type de roche et la conception du site de stockage peuvent accueillir convenablement les quantités et les types de déchets qui peuvent être évacués, notamment du combustible usé.

⁶ Le calendrier actuel est : débat public en 2013; dépôt d'une demande d'autorisation en 2015, décision sur les conditions de réversibilité en 2015, début de l'accueil des déchets en 2025. Voir http://www.jaif.or.jp/ja/wnu_si_intro/document/2009/Andra-geological_disposal-general.pdf (Andra [undated]).

4. **L'homogénéité et l'isotropie (ou leur absence) :** Dans ses évaluations des performances à long terme du site de stockage, l'Andra se repose sur l'homogénéité et l'isotropie de la formation du Callovo-Oxfordien. Toutefois, l'approche de l'Andra ne représente pas adéquatement l'éventail des possibilités. En outre, dans certains cas, la façon dont certaines données expérimentales ont été exclues a abouti à des valeurs moyennes biaisées et à une sous-estimation de la gamme observée des valeurs des paramètres. Cette considération insuffisante de la variabilité dans les propriétés de la roche hôte dans la zone de transposition est une préoccupation majeure. En outre, la ZIRA elle-même n'est pas homogène : les propriétés varient au sein de la roche hôte. En particulier, les propriétés sont différentes dans le sud-ouest ou au sud de la ZIRA de celles du nord ou du nord-est. Cette conclusion sur l'hétérogénéité est basée sur de nombreuses preuves, y compris celles citées par l'Andra (comme nous le verrons dans le Chapitre 3). Cependant, l'Andra a largement ignoré cette hétérogénéité dans son évaluation de la performance, à l'exception d'une analyse de sensibilité que l'IEER considère insuffisante. Bien que l'impact des hétérogénéités sur les propriétés de transport et la rétention puisse se révéler faible, l'Andra n'a pas établi la nature de l'hétérogénéité au sein de la ZIRA. L'hypothèse de l'Andra que les inhomogénéités ne sont pas importantes pour la performance est prématurée.
5. **Le transport diffusif et convectif :** l'Andra estime que le transport diffusif sera dominant dans le Callovo-Oxfordien. Toutefois, une analyse probabiliste des nombres de Peclet ainsi que les données des traceurs indiquent qu'il existe un potentiel important pour un transport mixte.
6. **Les résultats de la performance :** L'analyse des performances de l'Andra n'utilise qu'une analyse de sensibilité limitée pour explorer les effets de la plage des valeurs des paramètres sur les performances. Par ailleurs, l'Andra n'a pas fait une analyse probabiliste complète en utilisant les gammes de paramètres appropriées et suppose également que seul le transport diffusif se manifesterait. Une analyse probabiliste de sûreté simplifiée, avec des gammes de paramètres conformes à celles définies par l'Andra, indique que les incertitudes des paramètres d'entrée ont pour conséquence une incertitude de cinq ordres de grandeur, soit d'un facteur 100 000 pour la dose maximale totale. Par contre, l'éventail potentiel de la dose totale maximale définie par l'Andra comme étant d'un ordre de grandeur, soit un facteur 10 (ou d'un facteur deux quand le site de stockage proposé est placé dans le laboratoire souterrain) pourrait être très sous-estimé. Méthodologiquement, la poursuite de la sélection de la ZIRA, sans avoir auparavant fait une telle analyse probabiliste de la performance à partir des données disponibles, n'est pas judicieuse. La poursuite des travaux, sans une analyse complète probabiliste et un examen indépendant des paramètres utilisés dans cette analyse, est également déconseillée.
7. **Potentiel de séismes :** 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.

8. **Microfissures colmatées ?**: Les microfissures que l'Andra a détectées dans le laboratoire souterrain étaient colmatées. Il reste à déterminer si cela sera aussi le cas dans 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.

9. **La variabilité de la perméabilité dans l'EDZ** : Nous avons un certain nombre de préoccupations sur divers aspects de la performance mécanique du site de stockage revendiqués par l'Andra, au cours de la période d'ouverture ainsi qu'après la fermeture. Plus précisément, comme l'indiquent certaines mesures, la perméabilité de la roche hôte pourrait augmenter de 3 à 5 ordres de grandeur (d'un facteur 1000 à un facteur 100 000) dans la zone de mise en place, plutôt que de revenir en-dessous d'un ordre de grandeur, soit d'un facteur 10 comme présumé par l'Andra.

10. **Les saignées : Le processus proposé de pose de scellements d'argile gonflante est accompagné** par le découpage de saignées dans la roche, à des intervalles déterminés, dont le but est d'interrompre les circulations le long de l'interface revêtement/argilite. Certaines parties du revêtement de béton sont enlevées pour faire des saignées à ces intervalles. Cependant, la méthode pour enlever des sections du revêtement en béton n'est pas mentionnée. Nous craignons que, dans le cadre du projet proposé, des dommages mécaniques affectant les autres parties du revêtement soient inévitables. Une option consisterait à faire les saignées (et les scellements associés) et la pose du revêtement simultanément pour éviter d'enlever des sections du revêtement.

11. **Les mesures de la conductivité thermique** : Malgré une présentation très complète des méthodes de mesures des propriétés thermiques, le choix de la méthode « flash » laissera entière la question de la validité des résultats de conductivité dans les milieux non isotropes comme l'argilite du Callovo-Oxfordien. Des valeurs incohérentes de conductivité thermique dans les documents ultérieurs de l'Andra suscitent certaines inquiétudes et nécessitent une vérification de la traçabilité et du programme d'assurance de la qualité, même si les écarts sont faibles et sont considérés négligeables.

12. **Recherches thermiques in situ et de mise en stockage** : l'Andra n'a pas encore mené suffisamment de recherches dans le laboratoire souterrain pour s'assurer que les critères mécaniques, thermiques, et autres pour l'enfouissement seront respectés. Plus précisément, l'Andra n'a pas mis en place un ou plusieurs conteneurs de déchets simulés, dégageant de la chaleur, de grandeur nature, scellé les alvéoles et testé différentes procédures, hypothèses et conclusions. Comme indiqué précédemment, l'Andra a fait et continue de faire un excellent travail de collaboration avec d'autres programmes. Toutefois, bien que cette collaboration puisse fournir et a fourni une expérience et des

informations de grande importance pour poursuivre des recherches à Bure, elle ne peut pas se substituer à une recherche in situ, essentielle, dans son propre laboratoire souterrain. Des questions spécifiques au site, par exemple les dommages causés lors des essais du creusement des alvéoles, indiquent clairement que des travaux supplémentaires sont nécessaires.

13. La mise en stockage de combustible usé : Nous sommes conscients du fait qu'à l'heure actuelle, l'Andra n'est pas mandatée pour prendre en compte l'enfouissement du combustible usé non retraité (d'uranium ou de MOX) et que la conception du site de stockage se poursuit sur la base de l'élimination des déchets vitrifiés de haute activité et des déchets d'activité moyenne à vie longue. Toutefois, il est suggéré que l'Andra étudie également des scénarios dans lesquels l'évacuation du combustible usé est incluse. Les exigences liées au creusement des alvéoles pour l'évacuation du combustible usé sont radicalement différentes et plus dures à gérer que celles pour l'élimination des déchets vitrifiés de haute activité. Plus précisément, le creusement d'une alvéole de 3,3 m de diamètre pour le combustible irradié présenterait de très grandes difficultés, notamment vues les difficultés déjà rencontrées lors du creusement d'une alvéole de 0,7 m de diamètre.

1.4.3 Recommandations

1. **Evaluation externe :** L'Andra a fait beaucoup de bons, et dans de nombreux cas d'excellents travaux scientifiques. Toutefois, ses évaluations des performances ont tendance à être systématiquement optimistes et ne reflètent pas pleinement les détails des données disponibles. Au cours de cet examen, nous n'avons pas pu déterminer certains éléments essentiels des travaux scientifiques que l'Andra a faits, mais il semble que certaines données ont été omises ou minimisées dans les évaluations des performances. Pour éviter de telles évaluations optimistes, un niveau important d'évaluations supplémentaires indépendantes externes, allant bien au-delà des évaluations externes actuelles doit se poursuivre. Ces examens devraient coïncider avec la recherche, et continuer tout au long de toutes les phases, y compris après le démarrage de l'exploitation du site de stockage, si celui-ci reçoit l'autorisation. L'examen pourrait être fait par l'IRSN, mais il lui faudrait le personnel qualifié dans les spécialisations requises et suffisamment de financement. Il est nécessaire de mener un examen indépendant et de bien évaluer tous les aspects des travaux scientifiques volumineux de l'Andra et comment ils sont incorporés dans ses évaluations des performances et de sûreté.
2. **Redondance :** Les évaluations des performances de l'Andra font l'hypothèse que le milieu géologique suffira par lui-même à satisfaire les critères de performance radiologique sur le long terme. Toutefois, comme on l'a souligné plus haut, les évaluations de l'Andra sont optimistes. Une évaluation probabiliste utilisant toute la gamme des paramètres donne un éventail beaucoup plus large de résultats comparé à ceux obtenus par l'Andra à partir d'une analyse limitée de sensibilité. De plus, beaucoup de recherches restent encore à faire. En outre, le terme source n'est pas encore

précisément défini. La combinaison de ces facteurs aboutit à de grandes incertitudes dans l'évaluation des performances qui indiquent la nécessité pour l'Andra d'envisager d'autres modèles conceptuels y compris avec des conteneurs de déchets beaucoup plus durables qui seraient conçus pour jouer un rôle dans la limitation du terme source au-delà des barrières ouvragées. Actuellement, l'Andra suppose que les caractéristiques géologiques de la roche hôte seront suffisantes à elles seules pour garantir des performances satisfaisantes sur des périodes très longues. Une approche dans laquelle les barrières ouvragées fourniraient une capacité redondante d'isolement pour la performance permettrait également de réduire les incertitudes pour s'assurer que les objectifs de performance peuvent être satisfaits. Elle est donc aussi souhaitable de ce point de vue. Dans son rapport de 2005 l'IEER avait déjà recommandé une manière d'aborder la conception qui intégrait une telle redondance.⁷

3. **Terme source :** Les quantités et les types de déchets qui seront mis en stockage doivent être définitivement précisés le plus rapidement possible. Les incertitudes autour de la question de l'élimination du combustible usé et sur les quantités finales de produits de fission et d'actinides, dont les radionucléides transuraniens, pourraient entraîner de graves problèmes techniques à l'avenir. Par exemple, l'Andra ne se prépare pas activement pour l'élimination du combustible usé, bien que les conditions requises de sa mise en stockage soient beaucoup plus complexes et difficiles du point de vue minier et de la stabilité.
4. **Évaluation de la performance :** L'Andra doit effectuer une évaluation de la performance probabiliste en utilisant les fourchettes complètes des valeurs des paramètres. L'Andra doit mieux prendre en compte les questions de l'hétérogénéité, le potentiel de transport convectif et diffusif dans les voies d'écoulement verticales. Les circonstances qui créent la possibilité d'un non-respect des critères de dose doivent être identifiées et prises en compte dans les mesures de conception, par exemple la réduction du terme source dans le champ lointain. Ces mesures doivent être évaluées du point de vue de leur capacité à résoudre le problème, s'il venait à se produire.
5. **Évolution de l'EDZ :** Une hypothèse raisonnablement prudente, que nous approuvons, serait de supposer que l'EDZ ne se cicatrise pas complètement pour donner lieu à une perméabilité in situ et/ou un état de contrainte. En fait il pourrait être préférable de présumer que les dégâts les plus pénalisants estimés pour l'EDZ vont se maintenir tout au long de la vie du site de stockage.
6. **Les facteurs du fluage de l'argilite :** Dans un site de stockage, le comportement du fluage de l'argilite est une fonction complexe avec au moins trois paramètres qui varient tous, dans l'espace et le temps. Plus précisément, les tests montrent que la contrainte déviatorique, la saturation et la température affectent toutes, de manière significative, le taux de fluage. L'interrelation de ces facteurs environnementaux et leurs effets sur la

⁷ IEER 2005 p. 24

performance du stockage semble avoir été traités de façon plutôt qualitative. Une meilleure intégration de l'influence combinée de ces facteurs est nécessaire.

7. **Prototype de site de stockage :** L'Andra devrait envisager de construire dans le laboratoire souterrain un Démonstration de concept de stockage s'inspirant du «Prototype Repository» que la Suède a construit dans son laboratoire souterrain. Il devrait être conçu pour montrer, autant que possible, dans une expérience s'étendant sur plusieurs années, la façon dont le site de stockage réel pourrait fonctionner dans la pratique, et pour déterminer de façon plus réaliste certains des paramètres de performance spécifiques à Bure, notamment la performance in situ des conteneurs de déchets de haute activité sous contrainte thermique.

8. **Mise en place horizontale et verticale :** Nous reconnaissons qu'il y a d'importants avantages associés à une configuration horizontale, notamment la réduction de l'occupation verticale des colis de déchets. Toutefois, étant donné les difficultés qui accompagnent les forages de grands diamètres dans ce type de roches sédimentaires, comme en témoignent les fractures et les déformations dans plusieurs alvéoles creusées dans le laboratoire souterrain, la possibilité d'une mise en place des déchets dans des alvéoles verticales devrait être réévaluée, notamment pour l'évacuation du combustible usé. Les alvéoles nécessaires pour le combustible usé seront très grandes, 3,3 m de diamètre et, s'assurer de leur stabilité en utilisant le positionnement horizontal présentera des défis énormes dans l'argilite de Bure, dans l'éventualité où l'évacuation du combustible usé deviendrait nécessaire.

1.5 Références

-
- Andra [undated] Marielle Girard. *The Meuse/Haute Marne Centre: Underground Research Laboratory Technological Exhibition Facility*. [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, [undated]. Site Web http://www.jaif.or.jp/ja/wnu_si_intro/document/2009/andra-geological_disposal-general.pdf. Aurait pu être présenté lors de la World Nuclear University Summer Institute en 2009.
-
- IEER 2005 Institute for Energy and Environmental Research. *Examen critique du programme de recherche de l'ANDRA pour déterminer l'aptitude du site de Bure au confinement géologique des déchets à haute activité et à vie longue: Rapport final*, Préparé pour le Comité Local d'Information et de Suivi; Directeur du projet: Arjun Makhijani; Coordinatrice du projet: Annie Makhijani; Auteurs du rapport (par ordre alphabétique): Detlef Appel, Jaak Daemen, George Danko, Yuri Dublyansky, Rod Ewing, Gerhard Jentzsch, Horst Letz, Arjun Makhijani. Takoma Park, Maryland, IEER, 27 décembre 2004, avec corrections 11 janvier 2005. Site Web <http://www.ieer.org/reports/bure/1204index.html>.
-
- IRSN 2009 *Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire. Avis de l'IRSN sur les critères retenus par l'Andra pour le choix d'une « zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (ZIRA) » en vue du projet HA-MAVL - Site de Meuse/Haute-Marne.* (Lettre IRSN/2009-166) Fontenay-aux-Roses: IRSN, 22 décembre 2009. Site Web http://www.irsn.fr/FR/expertise/avis/Documents/Avis_IRSN_ZIRA_22122009.pdf.
-

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

Points forts

1. A notre avis, les recherches menées à Bure sont tout à fait convaincantes. Par exemple, les études sismiques couvrent toute la zone et elles traversent aussi les failles aux limites. Par conséquent, ces limites sont complètement caractérisées. C'est ce qui ressort des figures provenant de documents de l'Andra que nous avons reproduites ci-dessous.
2. Globalement, les travaux de recherche de l'Andra sont de bonne qualité mais l'analyse présente des lacunes.
3. Les travaux 2D et 3D de l'Andra sont scientifiquement solides.

Conclusions

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.
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.
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.
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.

Recommandations

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.

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

Concernant la sismicité, les principales failles sont bien étudiées et documentées.⁸ Les résultats sismiques 3D sont décrits dans deux volumes (dès l'année 2001) ; en outre, de nouvelles expériences sont envisagées.⁹

La zone de transposition a été définie ; une des justifications principales est que les caractéristiques de cette zone sont similaires à celles du laboratoire souterrain. Selon le Dossier 2005 Argile:

Enfin, **la zone de transposition** est définie comme la superficie sur laquelle les propriétés du Callovo-Oxfordien et la géologie des formations encaissantes sont similaires à celles déterminées sur le site du laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne.... Elle représente une extension de l'ordre de 200 km.¹⁰

A cela s'ajoutent des affirmations sur l'homogénéité dans la ZIRA (Zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie). Cependant, comme nous le verrons dans le chapitre suivant, ni la zone de transposition, ni la ZIRA ne sont homogènes. La zone de transposition comprend la roche hôte et, par conséquent, la barrière géologique. Elle devrait couvrir le volume de la roche dans laquelle les radionucléides sont piégés pour la période d'isolement déterminée. Un rapport de l'Andra contient une brève description de la zone de transposition, comme étant suffisamment apte et stable pour permettre la construction d'installations souterraines:

Elle est apte au creusement par des techniques de travaux souterrains et la réalisation d'ouvrages n'y induit que des perturbations modérées qui ne sont, a priori, pas susceptibles de créer des chemins d'écoulement préférentiels. Il existe une zone de 250 km² où ces propriétés sont a priori réunies (zone dite de transposition).¹¹

Il semble que les campagnes sismiques couvrent toute la zone et qu'elles traversent aussi les failles aux limites. Par conséquent, ces limites sont complètement caractérisées. Selon le Dossier 2005 Argile : **Le secteur des recherches de l'Andra** est limité par :

- au sud-est, le fossé de Gondrecourt-le-Château de direction nord-est/sud-ouest,
- au sud-ouest, le fossé de la Marne orienté nord/nord-ouest. Il est prolongé vers le sud par la faille de Poisson qui lui est parallèle,
- vers le nord, la structure d'Aulnois-Saint-Amand qui correspond à une légère inclinaison des couches.

⁸ Andra Cartographie 2001 Figure 39ff.

⁹ Andra Sismique 2001

¹⁰ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 66.

¹¹ Andra Sûreté 2010 p.17

La formation du Callovo-Oxfordien est composée de roches argileuses, les argilites, dont l'épaisseur est comprise entre 130 et 160 m sur le secteur étudié. L'ensemble des couches constituées par le Callovo-Oxfordien et ses encaissants y est pratiquement horizontal avec un faible plongement de 1° à 1,5° vers l'ouest et le centre du bassin parisien.¹²

La Figure 2-1 représente un diagramme du secteur de Meuse / Haute-Marne.

¹² Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 65. C'est l'Andra qui souligne.

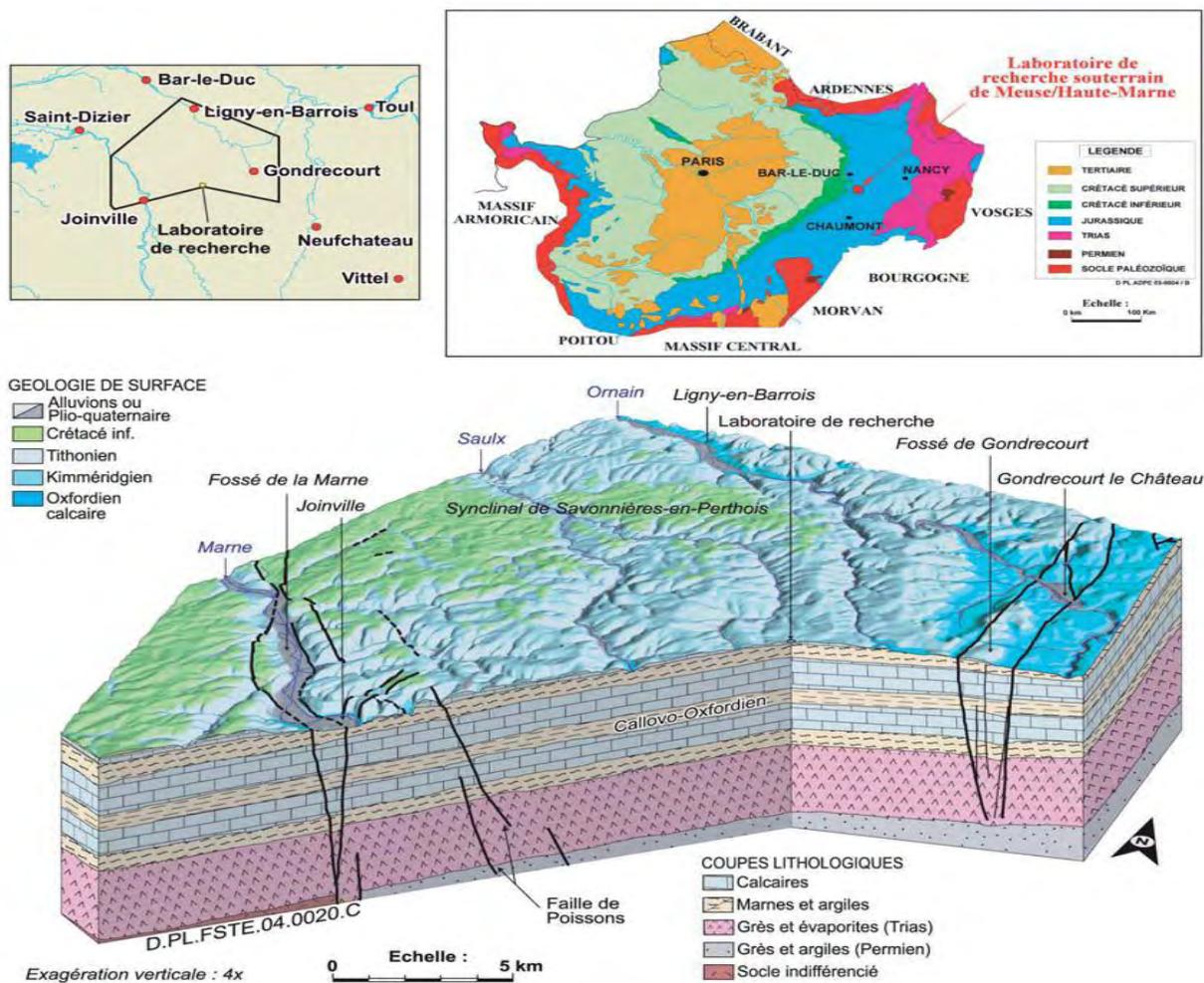


Figure 2-1. Bloc diagramme géologique 3D du secteur de Meuse/Haute-Marne (Source : Dossier 2005 Argile, Synthèse p.66)

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

Dans la Synthèse du programme de reconnaissance de la zone de transposition 2007-2008¹³ 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 à¹⁴ 10 m » soit exclue il n'existe pas assez de données pour exclure un rejet entre 5 et 10.¹⁵ 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. Pour le moment nous ne pouvons pas déterminer si les voies d'écoulement vertical sont dues, ou non, aux petites failles.

¹³ Andra ZT 2009 Section 4.2.1.3 Les microstructures (p. 70)

¹⁴ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 88

¹⁵ Andra ZT 2009 p. 12

Comme l'indique le Dossier 2005 Argile:

Du fait des faibles perméabilités de l'Oxfordien et du Dogger, les écoulements y sont lents : les modélisations hydrogéologiques montrent, sur la zone de transposition, des vitesses de l'ordre du kilomètre par centaine de milliers d'années dans l'Oxfordien et même plus faibles pour le Dogger. Ces vitesses sont cohérentes avec les résultats des analyses isotopiques du chlore 36 et du carbone 14. *Les âges moyens des eaux de l'Oxfordien et du Dogger sont respectivement de l'ordre de 400 000 ans et de 1 million d'années au centre du secteur étudié.*

Enfin, les pressions hydrauliques mesurées dans l'Oxfordien et le Dogger sont proches et ne constituent pas, à l'échelle de la zone de transposition, un moteur efficace pour le déplacement de l'eau au sein du Callovo-Oxfordien. Compte tenu de la faible perméabilité des argilites, la vitesse d'écoulement vertical de l'eau (appréciée par la vitesse de Darcy) est de l'ordre de quelques centimètres en 100 000 ans dans le Callovo-Oxfordien.¹⁶

Cette dernière affirmation ne vaut que pour les roches de très faible perméabilité, sans la présence de microfractures ou pour celles dont les microfissures sont colmatées. Des éléments de preuve recueillis des forages dans le laboratoire souterrain indiquent que c'est le cas. Des recherches sur ce sujet restent à faire dans la ZIRA.

La reconstitution de la morphologie de la couche Oxfordienne à partir des campagnes de 3D montre que les roches dans cette couche ont des perméabilités allant de 10^{-9} m/s jusqu'à 10^{-7} m/s. (Voir le Chapitre 3 pour une discussion plus approfondie) La longueur de la section donnée est d'environ 3 km (Figure 2-2).

¹⁶ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 95. C'est l'Andra qui souligne.

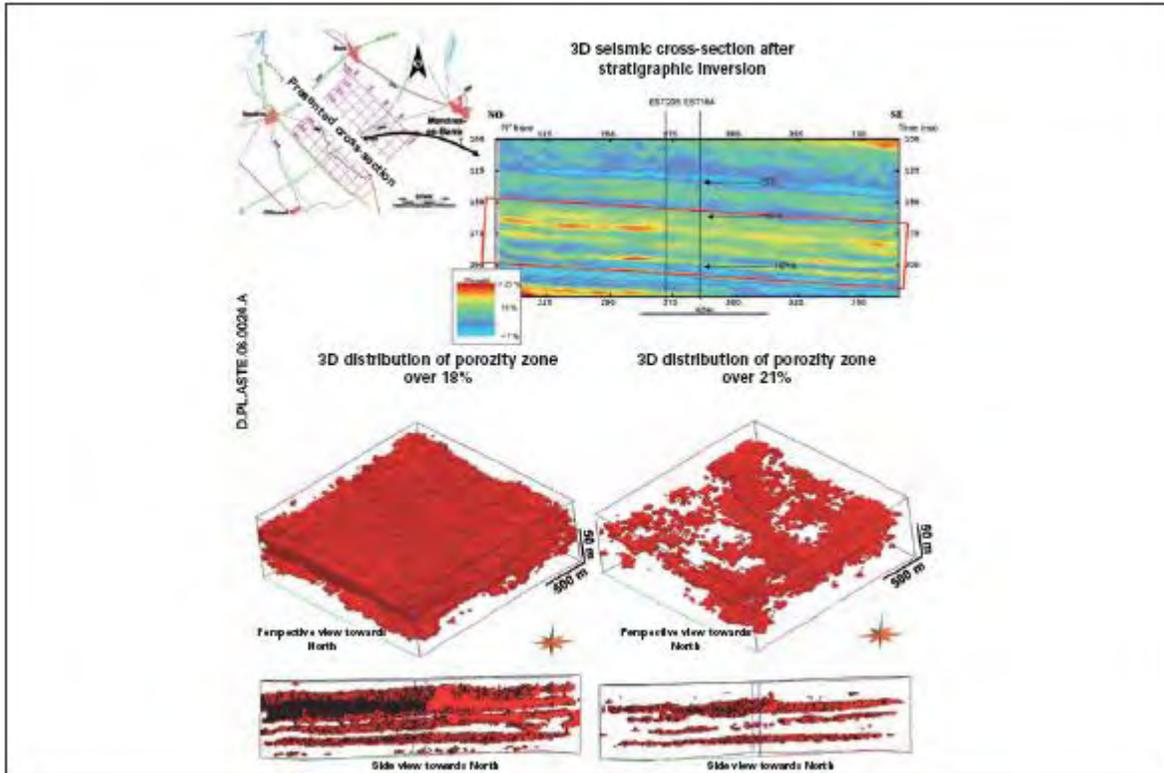


Figure 2-2. Reconstitution de la morphologie des horizons poreux dans l'Oxfordien à partir de données sismiques 3D (Source : Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 95)

2.1.2 La caractérisation sismique

L'Andra a effectué une caractérisation sismique (plus de 170 km de lignes sismiques et campagnes sismiques 2D et 3D) ainsi que des mesures de contraintes. Outre les lignes déjà disponibles, de nouvelles lignes sismiques ont été identifiées (Figure 2-3).

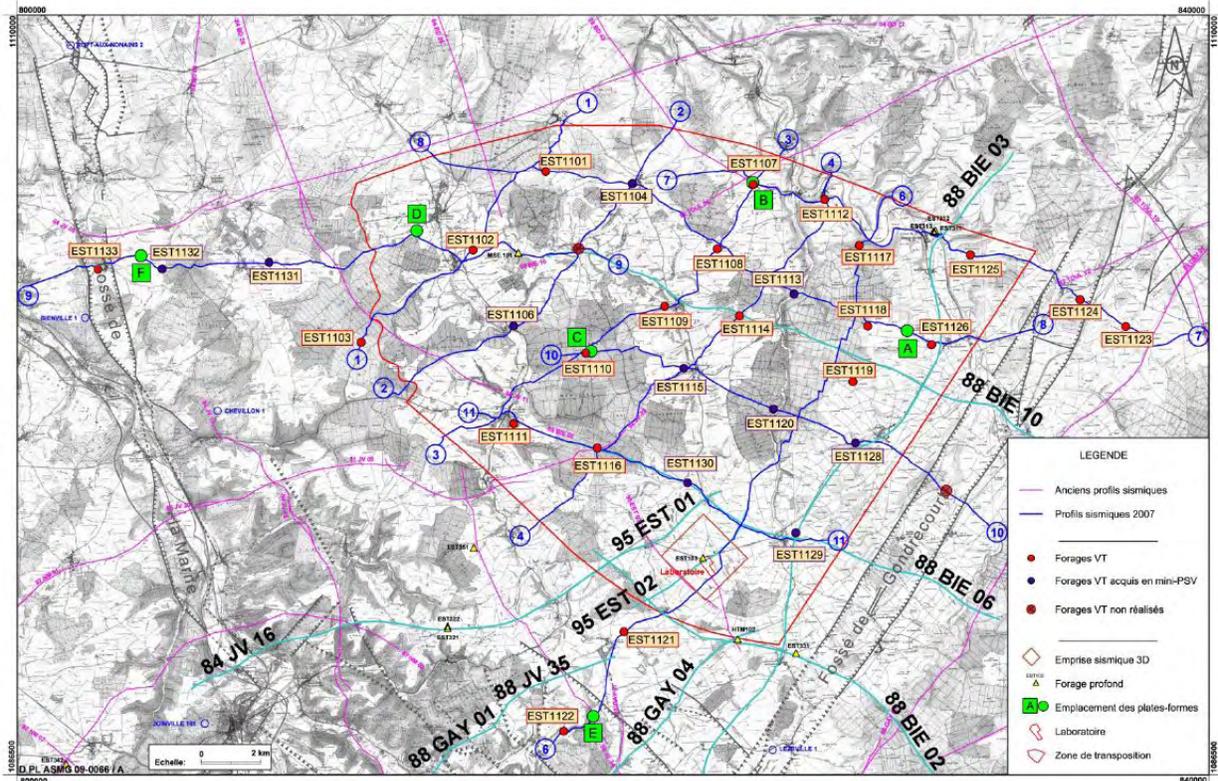


Figure 2-3. Localisation des travaux de sismique 2D: nouvelles lignes (en bleu foncé), anciennes lignes retraitées (en bleu clair) et forages VT (Source : Andra ZT 2009 Figure 2-3 (page 18))

La Figure 2-3 est à rapprocher de la Figure 2-4, ci-dessous, du Dossier 2005, qui indique des mesures sismiques.

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. Leur organisation apparaît directement liée aux conditions initiales de dépôt des sédiments. Cela explique leur géométrie globale organisée selon la stratification comme le montrent les données de sismique 3D enregistrées sur le site. C'est principalement dans ces niveaux, également plus perméables (jusqu'à 10^{-7} m/s), que se font les circulations d'eau en profondeur.¹⁷

¹⁷ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 94

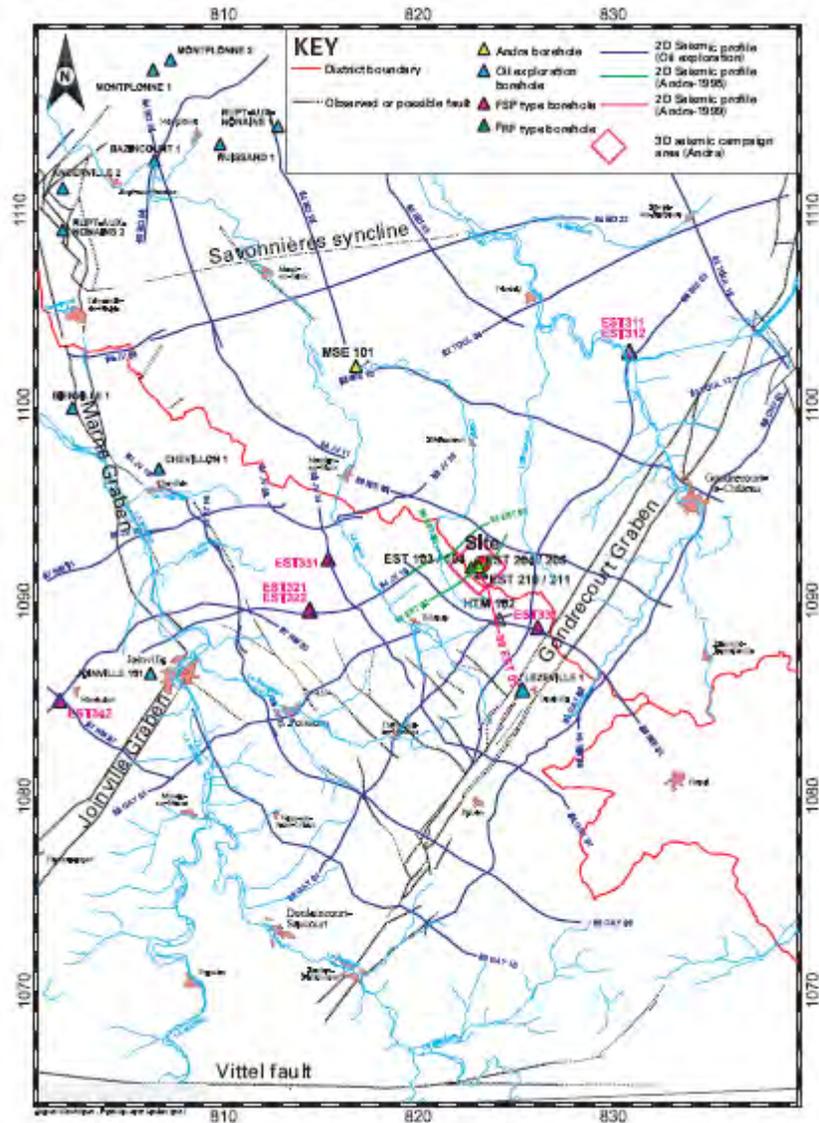


Figure 2-4. Position des forages réalisés par l’Andra sur le secteur et mesures sismiques (Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 71).

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

La résolution des données sismiques est préoccupante. En particulier, le taux de numérisation des données anciennes (le nombre d’échantillons par seconde) pourrait ne pas être aussi élevé que celui des nouvelles données. Toutefois, il est possible que le taux de numérisation ne soit pas le problème le plus important. En revanche, le problème pourrait venir des distances entre les géophones et les lignes sismiques, qui définissent la résolution des ouvrages souterrains. Selon le Dossier 2005 Argile:

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 montre que les déformations tectoniques

qui ont affecté la région depuis 150 millions d'années sont faibles et se limitent essentiellement aux fossés de Gondrecourt et de la Marne, en bordure du secteur d'études. Entre ces failles, la couche du Callovo-Oxfordien est régulière et pratiquement plane, ce qui facilite la conception d'une architecture de stockage.¹⁸

Cette assertion est en principe correcte.

Le Dossier 2005 Argile, Synthèse, indique en outre:

A l'échelle du site du laboratoire, la campagne de sismique 3D de 4 km² en fin 1999 et début 2000 et les forages carottés EST204 et EST205 dans l'axe de chacun des deux puits en 2000 ont précisé la géométrie des couches composant le sous-sol du site du laboratoire.

La campagne de sismique 3D a permis d'obtenir une image en volume du site du laboratoire avec un niveau de détail plus grand. Elle a confirmé que la couche argileuse du Callovo-Oxfordien est régulière avec une épaisseur supérieure à 130 m et une géométrie conforme à l'histoire des dépôts qui se sont succédé au Callovo-Oxfordien. Il n'y a donc pas eu de phénomène perturbateur sur la zone du laboratoire depuis la formation du Callovo-Oxfordien (grande stabilité).¹⁹

Cette assertion semble être aussi correcte. Tout du moins, les données fournies ne révèlent pas de *phénomènes perturbateurs*. Toutefois, la question se pose de savoir si l'absence d'observation de phénomènes perturbateurs pourrait être due à des distances trop grandes entre les géophones et/ou les lignes sismiques.

En outre, selon le Dossier 2005 Argile, Synthèse :

Ces trois derniers forages ont reconnu la formation-hôte sur 1500 m et permis de comparer ses caractéristiques sédimentologiques et pétrophysiques à l'échelle de l'emprise du laboratoire avec les informations de la campagne sismique 3D sur le site. Ils ont montré qu'il n'y avait pas *de fractures et très peu de microfissures dans le Callovo-Oxfordien sur le site du laboratoire et que celles-ci étaient colmatées*. Elles sont, de plus, préférentiellement localisées au toit et au mur de la couche et sont espacées d'une (ou plusieurs) centaine de mètres. Leur extension serait d'ordre métrique. *Des mesures in situ ont vérifié la très faible perméabilité de l'argilite.*²⁰

La conclusion de l'Andra, à partir des données de forage, que les microfissures dans les échantillons du laboratoire sont colmatées est la bonne méthode pour déterminer l'état des microfissures. Les investigations de surface n'ont pas la résolution nécessaire pour permettre de déterminer si les microfissures sont ou ne sont pas colmatées. Par conséquent, à l'heure actuelle, la conclusion que les microfissures sont colmatées ne peut pas être élargie à la ZIRA étant donné que la caractérisation de son sous-sol n'a pas encore été faite. Il serait prématuré de la part de

¹⁸ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 84. C'est l'Andra qui souligne.

¹⁹ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 70. C'est l'Andra qui souligne.

²⁰ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 73. C'est l'Andra qui souligne.

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. En plus des données de forage, il semble que les campagnes de sismiques - 2D et 3D en particulier – sont scientifiquement solides, bien que les résultats soient disséminés et enfouis dans plusieurs rapports et que les conclusions tirées ne soient pas toujours démontrées en faisant référence explicitement aux données.

2.2 Les séismes

2.2.1 L'analyse des risques sismiques et catalogues de la sismicité historique pour la région

Au sujet de l'activité sismique, le Dossier 2005 Argile conclut comme suit :

L'activité tectonique de la région du site de Meuse/Haute-Marne est très faible (activité sismique restreinte, faibles déplacements de la croûte, orientation pérenne des contraintes) et le bâti géologique est stable, comme l'atteste l'absence d'indices quaternaires d'activité tectonique sur les failles encadrant le secteur d'étude. Dans ces conditions, les mouvements tectoniques possibles sont limités à de très faibles rejeux de failles préexistantes qui structurent le socle.²¹

Cependant, on ne peut totalement exclure le risque d'un séisme proche du site à l'échelle de plusieurs centaines de milliers d'années. Pour estimer l'aléa sismique pertinent sur de très longues durées, on fait l'hypothèse que les failles proches du site sont actives et on considère les valeurs des séismes maximums physiquement possibles (SMPP), malgré l'absence de sismicité et de déformations tectoniques récentes. On fait donc l'hypothèse, très pénalisante, d'un séisme hypothétique de magnitude $6,1 \pm 0,4$ supposé se produire à 6 km du site. Par précaution, on vérifie que les ouvrages d'un stockage résistent à un séisme d'une telle intensité.²²

L'évaluation de l'aléa sismique pour un site spécifique nécessite d'abord l'évaluation de la sismicité connue et de sa distribution. Ainsi, il est nécessaire de recueillir tous les événements sismiques qui se sont produits dans cette région et de les rassembler dans un tableau accompagné d'une carte des épacentres. L'étape suivante consiste à concevoir un modèle sismotectonique de la zone d'étude. Habituellement, tous les événements sismiques dans un rayon de 200 km autour du site sont utilisés. Cela conduit à une approche déterministe.

Dans le cas de Bure, la chose la plus importante est d'utiliser un catalogue complet avec les événements historiques.²³

En conséquence, nous lisons à propos de la conversion des intensités et des grandeurs :

²¹ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 60

²² Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 85. C'est l'Andra qui souligne.

²³ Voir par exemple Gutdeutsch, Kaiser et Jentsch 2002.

[L]es magnitudes sont déduites de celles des SMHV par une majoration de l'intensité de 1 degré suivant la relation : $ISMS = ISMHV + 1$; cette augmentation d'intensité de 1 degré correspond à une augmentation de la magnitude du séisme de référence conventionnellement fixée à 0,5²⁴

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 cela semble être une petite correction, il convient de noter qu'une augmentation de magnitude de 0,2 degré correspond à un doublement de l'énergie libérée.²⁵ 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.

Différents modèles sismotectoniques ont été développés pour tester des solutions et résoudre le problème du choix du dimensionnement du site en fonction de l'intensité. La Figure 2-5 ci-dessous présente un modèle (MS1) pour les sources locales.²⁶

Dans la légende de la Figure 2-5, les valeurs des magnitudes sont qualifiées de très élevées par rapport au contexte sismotectonique récent dans cette partie de l'Est de la France, qui fait partie d'une région tectoniquement stable, avec une sismicité très faible (qui pourrait même être caractérisée comme asismique).

2.2.2 Evaluation du séisme de référence et de l'aléa sismique sur le site

L'estimation de l'aléa sismique est une condition préalable pour obtenir la charge sismique à partir de l'intensité possible (y compris l'accélération maximale du sol (PGA) ou de la vitesse ou la déformation) et la durée des vibrations maximum. Ces valeurs sont importantes pour la construction de bâtiments et aussi pour l'examen de leurs effets sur les installations mobiles, notamment les ascenseurs ou les grues qui déplacent les conteneurs de déchets nucléaires.

La Figure 2-5 donne l'élaboration préliminaire d'un modèle sismotectonique.(MS1) Ici, seule la géologie de surface est corrélée avec le séisme physique maximal possible. Par la suite, des zones sismiques ont été définies avec un séisme de référence pour chacune. Les dernières versions sont les modèles SM2 et SM3. Le modèle MS4 dans la Figure 2-6 ci-dessous.

²⁴ Référentiel du Site 2010 Tome 3, p. 53

²⁵ D'un autre côté une diminution de 0,2 correspond à une énergie deux fois plus petite.

²⁶ Reproduite du Référentiel du Site 2010 Tome 3, Figure 28-2.

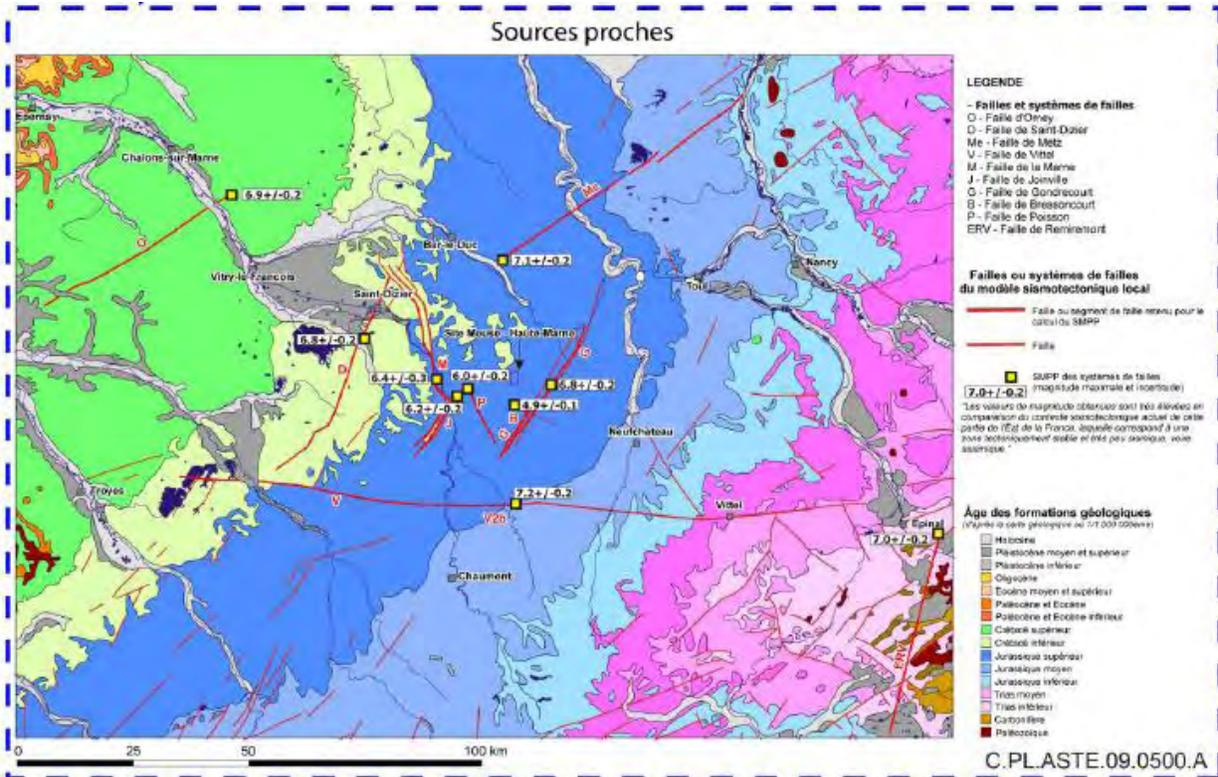


Figure 2-5. Zones sismotectoniques à l'échelle locale avec des valeurs de référence pour les séismes maximum possibles (Source: Référentiel du Site 2010 Tome 3, fait partie de la Figure 28-2 (p. 71))

La Figure 2-6 indique spécifiquement des zones sismotectoniques régionales avec des magnitudes obtenues à partir des séismes historiques. Elle montre que le site est situé près de la limite sud-est de l'unité sismotectonique du Bassin parisien dans laquelle les magnitudes SMS et SMPP sont supposées être $M = 5,0$ et $6,1$ respectivement. Toutefois, dans ces zones régionales, le site de Bure est situé dans la zone Vosges-Lorraine où les valeurs équivalentes sont $M = 4,8$ et $6,1$ respectivement. Les zones voisines indiquent les magnitudes SMS et SMPP de $5,0$ et $6,1$ respectivement (Bourgogne-Morvan) et de $6,5$ et $7,0$ respectivement (Epinal-Remiremont-Vesoul).

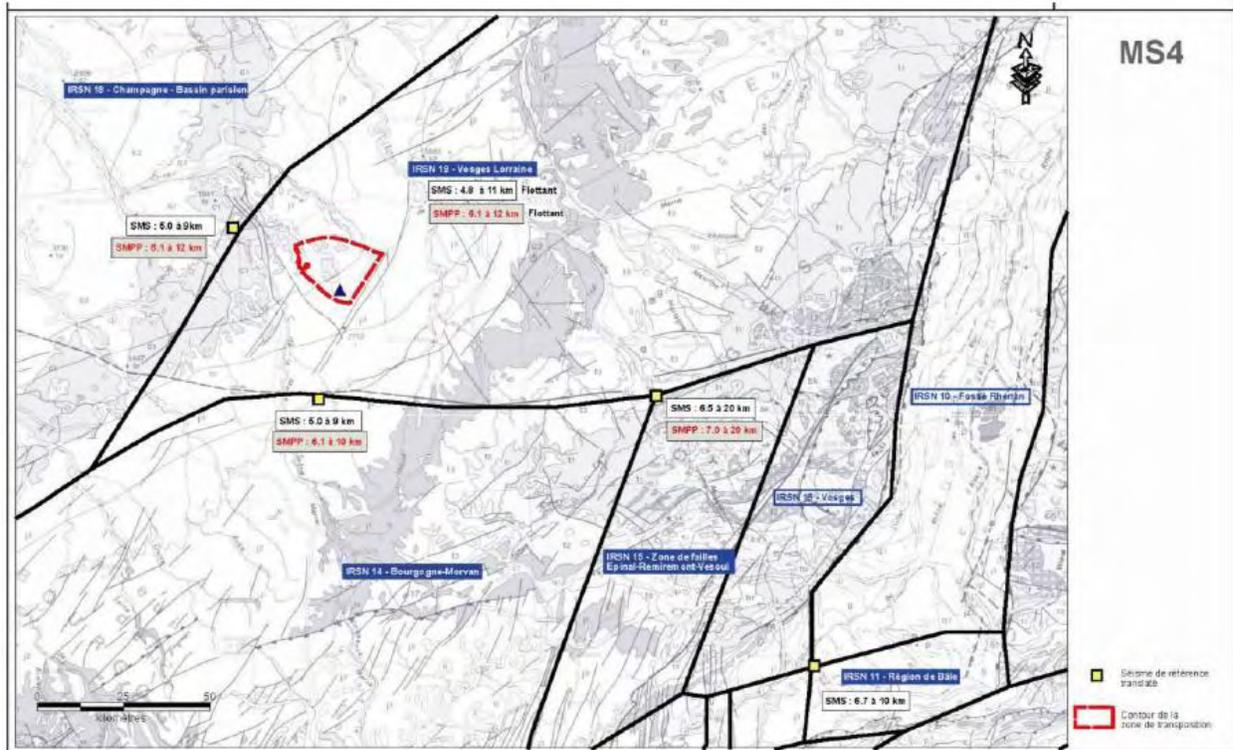


Figure 2-6. Modèle sismotectonique MS4 : zonage et valeur des séismes de référence par zone, niveau SMHV et niveau SMPP (Source: Référentiel du Site 2010 Tome 3, une partie de Figure 28-7 (p. 78))

Dans le zonage des failles locales, l'Andra indique les valeurs suivantes pour le SMS et le SMPP :²⁷

- Faille de la Marne : SMS 4,0 (profondeur de 10 km); SMPP 6,1 (profondeur de 10 km)
- Faille de Joinville : SMS 4,0 (profondeur de 2 km); SMPP 5,2 (profondeur de 2 km)
- Fossé de Gondrecourt : SMS 4,0 (profondeur de 2 km); SMPP 5,2 (profondeur de 2 km)
- Faille de Poisson : SMS 4,0 (profondeur de 10 km); SMPP 6,1 (profondeur de 10 km)
- Faille de Vittel : SMS 4,8 (profondeur de 11 km); SMPP 6,1 (profondeur de 10 km)
- Système Metz-Mayence-Hunsrück : SMS 5,8 (profondeur de 15 km), SMPP, 6,1 (profondeur de 15 km)

Selon la pratique internationale, les épicentres des séismes dans les zones avoisinantes doivent être hypothétiquement déplacés à un point le plus proche de Bure à la limite de la zone sismotectonique. Si leur effet sur le site est supérieur à celui du séisme de référence dans la zone du site, il doit être utilisé comme référence pour le site de Bure. Ceci peut amener à retenir une secousse sismique supérieure à Bure pour la conception des installations.

²⁷ Référentiel du Site 2010 Tome 3, Figure 28-6 (p. 77)

Il aurait été utile à ce stade si L'Andra avait comparé la charge et l'accélération sur le site de Bure en se rapportant aux analyses par zones indiquées dans la Figure 2-6 ci-dessus ainsi que des valeurs du SMS indiquées ci-dessus.

La détermination des zones sismiques est la première étape de l'évaluation de l'aléa sismique. L'étape suivante consiste à déterminer les conditions du site même. Les caractéristiques géomécaniques locales du sous-sol déterminent l'amplitude de la secousse (ou de la résonance en réponse aux fréquences des ondes incidentes). Par conséquent, elles déterminent le plateau d'accélération des spectres situés entre 1 et 10 Hz. Habituellement, les sols sont classifiés selon leur nature : sols meubles ou durs.

La réponse du site est également dépendante des caractéristiques de la fréquence des ondes sismiques incidentes : les séismes locaux se manifestent par des fréquences plus élevées que les séismes lointains. Cette question est abordée dans la Figure 2-7 ci-dessous.²⁸ Cette figure montre comment le spectre de réponse sur le site de Bure a été déterminé (seul le résultat important est inclus). SL est le spectre de séismes locaux, et SR celui des séismes régionaux. Si l'unité d'accélération m^2/s était utilisée les courbes de la zone seraient comprises entre 1 et 10, où $10 m/s^2$ est approximativement égale à l'accélération de la gravitation à la surface de la terre (1 g). Dans ce type de figure, le plateau d'accélération des spectres indiquerait la réponse du site, et l'accélération constante au-dessus de 10 Hz représenterait la magnitude de la charge sismique. La règle de sûreté exige que l'Andra considère des fréquences allant de 0,1 à 34 Hz.²⁹

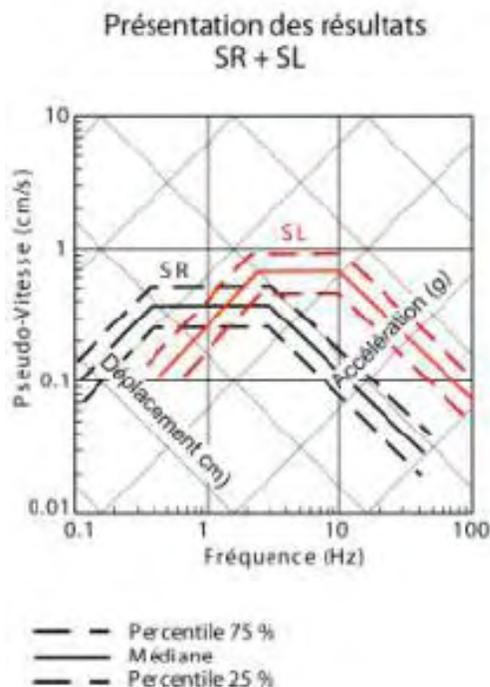


Figure 2-7. Réponse spectrale pour deux types de séisme : SL – local, SR – régional (Source: Référentiel du Site 2010 Tome 3, élément de la Figure 27-2 (p. 55))

²⁸ Référentiel du Site 2010 Tome 3, Figure 27-2 (p. 55)

²⁹ Règle de sûreté citée par l'Andra dans le Référentiel du Site 2010 Tome 3, p. 68.

Nous ne sommes pas certains que la réponse du site ait été référencée et nous recommandons que l'Andra le fasse. L'augmentation de la pseudo-vélocité entre 1 et 10 Hz dépend en grande partie des propriétés géomécaniques du sous-sol. La magnitude est plus importante pour les roches souterraines meubles, comme les roches sédimentaires, et plus faible pour les roches dures ; les fréquences où les changements de pseudo-vélocité se produisent peuvent aussi se déplacer.

En outre, la valeur de haute fréquence (courte période) devrait être une constante indiquant la charge sismique sans amplification locale. Les spectres donnés sont des spectres de vitesse qui n'indiquent ni l'accélération ni la charge sismique. Par conséquent, la charge sismique n'est pas claire sur ce graphique. Plus loin, l'Andra reconnaît que les spectres de vitesse ne font pas apparaître les propriétés locales aussi clairement sur le site, et l'Andra utilise donc l'accélération, ce qui est conforme à la norme scientifique:

Sélection des valeurs des accélérations spectrales : accélération maximale (PGA) et accélérations pour les périodes caractéristiques des spectres : $\approx 0s, 0,2s, 0,5s$ et $2s$ ³⁵. Localiser les zones où, en surface, les mouvements seraient susceptibles d'être amplifiés du fait de la nature des sols (lithologie) et de la topographie (pentes) ; Quantifier les amplifications locales là où de telles zones sont identifiées.³⁰

La note 35 de la citation ci-dessus indique que :

Ces points correspondent : à l'accélération maximale (0s), à l'accélération sur le plateau d'accélération des spectres (0.2s), à l'accélération de la branche descendante du spectre (0.5s) et à la partie du spectre correspondant aux mouvements à hautes fréquences (2s).³¹

Ici, le terme « fréquences élevées » prête à confusion : une période de 0,5 s correspond à une fréquence plus élevée de 2 Hz, alors qu'une période de 2 s qui correspond à 0,5 Hz. Par conséquent, aux fréquences les plus hautes correspondent des périodes très courtes (la plus courte est indiquée à ≈ 0 s, impossible à interpréter en termes de fréquence sauf pour une fréquence infinie). A toutes fins utiles, la limite supérieure des fréquences semble être de 34 Hz, ce qui est requis par la règle de sûreté³²; nous présumons que cela est considéré comme l'équivalent fonctionnel d'une période infinie ou d'une fréquence nulle.

La discussion relative aux percentiles est la suivante:

Les calculs de spectre des mouvements du sol sont décrits suivant des grandeurs statistiques : mouvements médians et percentiles 15 % et 85 %, permettant de quantifier les incertitudes. Les codes de calcul utilisés sont Crisis® et Geosis®.³³

Le calcul est conforme. Il est important de souligner qu'une valeur de percentile de 85 %, c'est-à-dire à peu près un écart-type, est la valeur importante. Cette valeur est utilisée par prudence

³⁰ Référentiel du Site 2010 Tome 3, p. 60

³¹ Référentiel du Site 2010 Tome 3, p. 60, note 35

³² Cité dans le Référentiel du Site 2010 Tome 3, p. 94. Voir également le Référentiel du Site 2010 Tome 3, p. 68.

³³ Référentiel du Site 2010 Tome 3, p. 57

puisqu'elle assure que presque 85 % des séismes se trouveront en dessous de la valeur sélectionnée.

La Figure 2-8 compare l'accélération de surface anticipée à celle du sous-sol. L'accélération de surface est d'un facteur 1,5 supérieur à l'accélération du sous-sol. Mais le spectre donne une autre indication. De nouveau, les deux courbes indiquent la pseudo-vitesse en fonction de la fréquence. L'Andra n'indique pas comment l'accélération est déduite de ces courbes, Vu que l'accélération est un paramètre indispensable pour déterminer la charge, l'Andra devrait expliquer clairement comment elle arrive aux valeurs de 0,12 et 0,19 g.

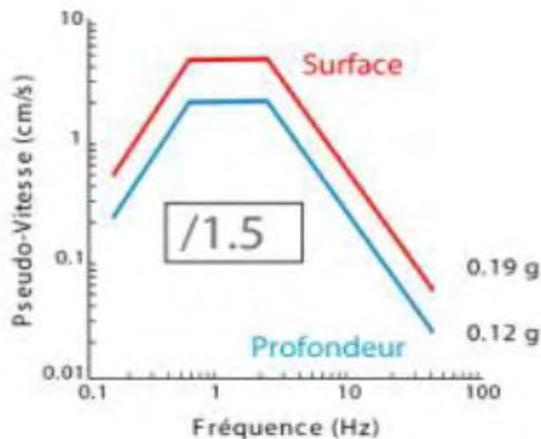


Figure 2-8. Comparaison entre les vibrations de surface et celles du sous-sol pour les vitesses du spectre et leur relation avec l'accélération (Source: Référentiel du Site 2010 Tome 3, fait partie de la Figure 27-5 (p. 61))

En plus de l'approche déterministe de l'évaluation de l'aléa sismique, l'Andra indique qu'une approche probabiliste a également été appliquée. La période de retour est un paramètre important qui permet d'estimer le temps entre des séismes de force particulière (généralement le séisme le plus fort possible est utilisé).

Différentes périodes de retour sont étudiées: 1 000, 5 000, 10 000, 100 000 et 1 million d'années.

Les probabilités annuelles de dépasser différents niveaux d'accélération maximale du sol sont testées jusqu'à 10^{-6} , en réalisant des calculs pour des périodes de retour de : 1.000 ans, 5.000, ans, 10.000 ans, 100.000 ans et 1.000.000 d'années.³⁴

2.2.3 Evaluation des événements sismiques

La réponse du site local est obtenue à partir de la loi d'atténuation qui montre de combien l'onde sismique est amortie sur le parcours au site. Par conséquent, l'amortissement est fonction de la profondeur de la source et de la structure des couches de la croûte terrestre.

³⁴ Référentiel du Site 2010 Tome 3, p. 57

Dans les Tableaux 2-1 et 2-2, reproduits du Référentiel du Site,³⁵ les séismes de référence pour le site de Bure sont énumérés pour les différentes unités sismiques et failles. Mais encore une fois, les résultats proposés ne sont pas suffisamment expliqués. Par exemple il est important de connaître la raison pour des incertitudes si différentes (de 0,2 à 0,4). Il serait très important de consulter la base de données, par exemple la liste spécifique des séismes qui a été utilisée pour déterminer la magnitude, la profondeur et l'endroit à utiliser pour la conception.

Nous pouvons lire une estimation de la période de retour

Les vitesses de glissement seraient *a priori* plus faibles pour les failles actives des Vosges, dépourvues de tout indice de déformation détectable en surface ; avec de telles vitesses, il est possible d'engendrer des séismes de magnitude $7,0 \pm 0,4$, avec une période de retour comprise entre 10.000 ans et 250.000 ans ;³⁶

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

Le Tableau 2-1 donne la magnitude des séismes maximaux pour la région ainsi que localement. De nouveau, le sens du mot magnitude n'est pas mentionné et il pourrait s'agir de la magnitude locale (ML).

Tableau 2-1 : Valeurs SMPP retenues pour le modèle MS4 utilisé en 2008

Modèle	Source	Magnitude MSMS	Profondeur (km)
Régional	IRSN 14 Bourgogne - Morvan	$6,1 \pm 0,4$	10 ± 5
	IRSN 15 Zone des failles est Vosges Epinal - Vesoul	$7,0 \pm 0,4$	20 ± 5
	IRSN 18 Champagne Bassin de Paris	$6,1 \pm 0,4$	12 ± 5
Local	IRSN 19 Vosges - lorraine	$6,1 \pm 0,4$	12 ± 5

Source: (Référentiel du Site 2010 Tome 3, Tableau 28-4 (p. 83))

Cela indique l'hypothèse d'un séisme local de magnitude $6,1 \pm 0,4$ à une profondeur d'environ 12 km. Dans des conditions normales, ce type de séisme causerait une secousse d'une intensité de $I \approx VIII$ à l'épicentre en utilisant la formule simple empirique, qui s'applique à 10 kilomètres de profondeur :

$$I_0 = 1,5M_L - 1,0 (\pm 0,6) \quad \text{or} \quad M_L = 0,67I_0 + 0,67 \pm 0,4$$

Où, M_L est la magnitude locale (Richter) d'un séisme à une profondeur de 10 km, et I_0 l'intensité à l'épicentre.

³⁵ Référentiel du Site 2010 Tome 3, Tableaux 28-5 (p.84) and. 28-6 (p. 85)

³⁶ Référentiel du Site 2010 Tome 3, p. 85

Des discussions plus sophistiquées sur cette relation ont été déjà présentées par Gutenberg et Richter (1956) qui ont développé des formules empiriques, ainsi que par Ambraseys (1985) et Gutdeutsch et al. (2002), qui ont discuté de plusieurs détails de la relation entre différentes magnitudes et intensités.

Nous remarquons que le Tome 3 donne une magnitude de $5,2 \pm 0,2$ ³⁷ pour le SMPP. Dans le cas de la magnitude la plus petite, une profondeur focale de seulement 2 km est postulée, ce qui provoquerait une vibration très forte à la surface, notamment parce que la distance n'est que de 6 km. Les conséquences sur la conception des ouvrages du sous-sol et sur l'évaluation de la période après la fermeture ne sont pas bien présentées.

2.2.5 Réponse du site aux séismes

Pour concevoir les installations il est important d'estimer l'effet du séisme maximum qui est physiquement possible, à la surface ainsi que dans le sous-sol du laboratoire. Pour la période d'exploitation, l'Andra a dérivé une accélération de 0,23 g pour une fréquence de 9 Hz pour le laboratoire souterrain et la majorité de la zone de transposition,³⁸ vraisemblablement pour une utilisation dans la conception des installations de surface.

Les vitesses d'accélération et de déplacement pour les séismes SMPPs, pour une utilisation après la fermeture, sont, comme prévu, beaucoup plus importantes.

Le spectre du séisme de référence à la surface est présenté dans le Tableau 2-2, reproduit ci-après, ainsi que l'accélération, la vitesse et le déplacement. Comme on le voit, l'effet calculé pour les fréquences entre 5 et 9 Hz est assez grand : une accélération de plus de 1,25 g.

Tableau 2-2 : Caractéristiques du spectre de référence SMPP en surface, calculé pour le site du laboratoire souterrain

SPECTRE DE REFERENCE EN SURFACE POUR LE NIVEAU SMPP									
Valeurs d'accélération, vitesse et déplacement. Composante horizontale. Amortissement 5%.									
Fréquence (Hz)	Accélération (g)			Vitesse (cm/s ²)			Déplacement (cm/s)		
	Per. 15%	Médiane	Per. 85%	Per. 15%	Médiane	Per. 85%	Per. 15%	Médiane	Per. 85%
0.1	0,0007	0,002	0,0042	1,17	2,7	6,7	1,857	4,24	10,611
0.3	0,007	0,015	0,038	3,5	8,0	20,0	1,857	4,24	10,610
1	0,057	0,11	0,251	9,0	17,0	40,0	1,432	2,71	6,366
5	0,283	0,535	1,257	9,0	17,0	40,0	0,286	0,54	1,273
9	0,283	0,535	1,257	5,0	9,44	22,2	0,088	0,17	0,393
34	0,139	0,22	0,427	0,65	1,0	2,0	0,003	0,005	0,009

(Source: Référentiel du Site 2010 Tome 3, Tableau 29-4 (p. 103))

Le spectre pour le site du laboratoire souterrain (voir Tableau 2-3) montre des propriétés similaires ; l'accélération maximale est réduite à un peu plus de 0,8 g, ce qui est raisonnable.

³⁷ Référentiel du Site 2010 Tome 3, Tableau 29-3 (p. 82)

³⁸ Référentiel du Site 2010 Tome 3, Tableau 29-1 et le texte s'y rapportant pp. 94-95.

Nous notons qu'il y a des erreurs qui ne devraient pas exister dans un rapport officiel. Premièrement, dans les deux tableaux³⁹ la vitesse est exprimée en cm/s² (au lieu de cm/s) et le déplacement en cm/s (au lieu de cm). Deuxièmement, les longues périodes correspondent à des basses fréquences (et non à des hautes fréquences) Cette erreur apparaît dans la citation suivante:⁴⁰

- T = 0s (accélération aux très basses fréquences des spectres),
- T = 0,2s (accélération au pic \dot{R} maximum - des spectres),
- T = 0,5s (accélération sur la branche descendante des spectres),
- T = 2s (accélération aux plus hautes fréquences des spectres).

Tableau 2-3 : Caractéristiques du spectre en profondeur, dans la couche hôte ; période post-fermeture d'un stockage ; pour le site du laboratoire souterrain.

SPECTRE DE REFERENCE NIVEAU SMPP EN PROFONDEUR (dans le COX)									
Valeurs d'accélération, vitesse et déplacement. Composante horizontale. Amortissement 5%.									
Fréquence (Hz)	Accélération (g)			Vitesse (cm/s ²)			Déplacement (cm/s)		
	Per. 15%	Médiane	Per. 85%	Per. 15%	Médiane	Per. 85%	Per. 15%	Médiane	Per. 85%
0,1	0,0005	0,0011	0,0028	0,778	1,78	4,445	1,238	2,83	7,074
0,3	0,004	0,010	0,025	2,333	5,33	13,333	1,238	2,83	7,074
1	0,038	0,071	0,168	6,000	11,33	26,667	0,955	1,80	4,244
5	0,188	0,355	0,838	6,000	11,33	26,667	0,191	0,36	0,849
9	0,188	0,355	0,838	3,333	6,30	14,815	0,059	0,11	0,262
34	0,093	0,14	0,285	0,433	0,67	1,333	0,002	0,003	0,006

(Source: Référentiel du Site 2010 Tome 3, Tableau 29.5 (p. 105))

³⁹ Référentiel du Site 2010 Tome 3, Tableaux 29.4 (p. 103) et 29.5 (p. 105)

⁴⁰ Voir, par exemple, Référentiel du Site 2010 Tome 3, p. 103.

2.3 Références

Ambraseys 1985	N. Ambraseys. "Intensity-attenuation and magnitude-intensity relationships for Northwest European earthquakes," <i>Earthquake Engineering and Structural Dynamics</i> 13 (1985): 733–778.
Andra Cartographie e 2001	Andra. <i>Site Meuse/Haute-Marne: Cartographie géologique et structurale de l'environnement régional du site. Volume 1. Texte. Volume 2. Figures et planches hors texte. Volume 3. Fiches de sites micro tectoniques.</i> (D RP 0G2R 00-003/A) [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, avril 2001. Titre courant: D RP 0G2R 00-003/A A1-2.
Andra Sismique 2001	Andra. <i>Laboratoire de Recherche Souterrain Meuse / Haute-Marne, Lot 1 Sismique 3D, Rapport de Synthèse.</i> (B RP 0ANT 00-073/A) [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, 29 Janvier 2001. Figures dans le volume associé.
Andra Site Est 1998	Andra. <i>Site Est: Actualisation de l'analyse sismotectonique, zonage et évaluation de l'aléa sismique régional sur le Site de l'Est de la France.</i> (D RP 0ANT 98-044/A). [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, décembre 1998.
Andra Sûreté 2010	Andra. <i>Options de sûreté du stockage en formation géologique profonde.</i> (C.NT.ASSN.09.0029.B) [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, 26 février 2010. Titre courant: JALON 2009 HA-MAVL.
Andra ZT 2009	Andra. <i>Synthèse du programme de reconnaissance de la zone de transposition 2007-2008: Centre de Meuse/Haute-Marne.</i> (D.RP.ALS.08.1356.B) [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, 21 juillet 2009. Titre courant: JALON 2009 HA-MAVL.
Dossier 2001 Argile	Andra. <i>Dossier 2001 Argile sur l'avancement des études & recherches relatives à la faisabilité d'un stockage de déchets à haute activité et à vie longue en formation géologique profonde - Rapport de synthèse.</i> [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, décembre 2001. Titre courant: <i>Dossier de synthèse 2001.</i> Partie A et B.
Dossier 2005 Argile, Synthèse	Andra. <i>Dossier 2005 Argile: Synthèse: Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse.</i> Seconde éd. (Collection les rapports) (266 B) [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, décembre 2005.
Giardini et al. 2004	Domenico Giardini, Stefan Wiemer, Donat Fäh and Nicolas Deichmann, et al. <i>Seismic Hazard Assessment of Switzerland, 2004.</i> Vers. 1.1. Zürich: Swiss Seismological Service, ETH Zurich, november 25, 2004. Site Web http://www.seismoatschool.ethz.ch/Hazard_report_2004.pdf .

Gutdeutsch, Kaiser, and Jentzsch 2002	Rolf Gutdeutsch, Diethelm Kaiser, and Gerhard Jentzsch. "Estimation of earthquake magnitudes from epicentral intensities and other focal parameters in Central and Southern Europe," <i>Geophysical Journal International</i> 151(3) (2002): 824-834.
Gutenberg and Richter 1956	B. Gutenberg and C.F. Richter. "Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration (Second Paper), <i>Bulletin of the Seismological Society of America</i> 46 (1956): 105-145.
Référentiel du Site 2010	Andra. <i>Référentiel du Site Meuse/Haute-Marne</i> . (C.RP.ADS.A09.0007.B) [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, 29 Janvier 2010. Titre courant: Jalon 2009 HA-MAVL. "Document interne."

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

Points forts

1. Recherches expérimentales et in situ : Des recherches approfondies ont été menées par l'Andra, en laboratoire et in situ, pour caractériser les milieux géologiques au sein de la zone de transposition. Un certain nombre d'expériences menées pour obtenir les propriétés de transport des argilites ont nécessité des techniques d'avant-garde pour surmonter les difficultés liées à la faible perméabilité, à la forte capacité de sorption, à l'exclusion anionique, et à d'autres facteurs spécifiques à l'argilite.

2. Utilisation de données complémentaires : L'expérience et les données acquises sur des sites argileux similaires ont été utilisées pour compléter et corroborer les données expérimentales obtenues pour les argilites du Callovo-Oxfordien. Cet effort a abouti à un exceptionnel ensemble de données spécifiques au site documenté dans le *Dossier 2005 Argile, le Référentiel du Site 2010*, et de nombreux rapports et articles de revues.

Conclusions

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.

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.

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.

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 95^e percentile) n'a pas été envisagée. En conséquence, les impacts potentiels de la variabilité des paramètres n'ont pas été évalués.

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.

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).

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.

Recommandations

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 Peclet (au lieu d'une valeur unique) à partir de la variation des paramètres.

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.

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.

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.

3.1 Introduction

Des recherches approfondies ont été effectuées par l'Andra, et par d'autres organismes en collaboration avec l'Andra, dans le Laboratoire de recherche souterrain (LRS) de Bure et sur le site pour définir les caractéristiques et les propriétés des formations hôte et encaissantes dans la zone de transposition (ZT) et caractériser les variabilités et les incertitudes associées. Les principaux résultats de cette recherche, fondée sur tout le travail fait jusqu'à mars 2009, sont documentés dans le *Référentiel du Site 2010*. Les détails des études spécifiques sont présentés dans un certain nombre de rapports scientifiques et de publications référencées dans le *Référentiel du Site 2010*.

Les caractéristiques et propriétés des formations hôtes et encaissantes ont été utilisées pour élaborer un modèle conceptuel de scénario de référence (ou scénario d'évolution normale) des milieux géologiques au sein de la zone de transposition.⁴¹ Des modèles conceptuels alternatifs (ou altérés) ont aussi été élaborés pour intégrer les incertitudes conceptuelles qui ne sont pas représentées dans le scénario d'évolution normale. Le modèle conceptuel du scénario de référence a fourni une base pour un certain nombre de modèles simulant le transport de contaminants dans les différents compartiments du stockage et dans les milieux géologiques, et aussi pour l'évaluation de la sûreté à long terme.

Les conclusions sur l'adéquation et la robustesse du stockage, relatives à l'objectif de confinement à long terme des déchets radioactifs par rapport à la biosphère, apportées par l'Andra dans le Dossier 2005 Argile, se fondent largement sur l'intégration des connaissances scientifiques et la gestion des incertitudes liées aux caractéristiques et propriétés des formations hôte et encaissantes. Ces conclusions, ainsi que des considérations de surface, ont conduit à la sélection de la zone d'intérêt pour la caractérisation du futur site (la Zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie ou ZIRA).

La sélection de la ZIRA implique que la variabilité et les incertitudes associées aux processus et aux paramètres au sein de la zone de transposition ont été suffisamment caractérisées et pleinement prises en compte dans les modèles de processus et l'analyse de sûreté. Le *Dossier 2005 Argile*, *Référentiel du Site 2010*, et un certain nombre de publications connexes ont été examinés pour évaluer ces conclusions. Les résultats de cette évaluation indépendante sont présentés dans la discussion qui suit.

⁴¹ Dossier 2005 Argile, Sûreté

Vues des contraintes de temps et de budget, seules les questions jugées importantes pour les impacts radiologiques ont été examinées. Il s'agit notamment de l'analyse des propriétés de transport de la formation du Callovo-Oxfordien, du scénario d'évolution normale, et de la méthodologie d'évaluation de la sûreté.

Les questions suivantes, de moindre importance, n'ont pas été examinées ou ont fait l'objet d'un examen limité :

- Les propriétés de sorption des radionucléides et des contaminants toxiques non conservatifs.
- Les propriétés de transport des formations adjacentes.
- Les modèles d'écoulement des formations adjacentes carbonatées.
- Les paramètres d'exposition.
- Les scénarios d'évolution altérée.

3.2 Caractérisation des milieux géologiques dans la zone de transposition

Deux types de milieux géologiques peuvent être définis en ce qui concerne la conception du stockage et ses performances. Le premier type représente le milieu géologique d'accueil et le second type représente les formations encaissantes.

Le milieu d'accueil est la formation géologique qui contient le stockage et représente la barrière géologique principale. Ce milieu joue un rôle essentiel dans la performance à long terme du site de stockage. Comme l'indique le *Dossier 2005 Argile* : « *Les barrières du système de confinement jouent des rôles complémentaires, la barrière géologique assurant un rôle essentiel en particulier à long terme.* »⁴² Le rôle de la barrière géologique dans la conception d'un stockage en profondeur est de « *s'opposer à la dissémination des radionucléides contenus dans les déchets, ou la ralentir au maximum (absence de circulation d'eau, milieu réducteur).* »⁴³ Par conséquent, l'objectif majeur de la caractérisation de la roche-hôte est de définir sa capacité à retenir les radionucléides et les contaminants toxiques. Comme il est précisé dans le *Dossier 2005 Argile* : « *ces propriétés doivent être appréciées et garanties sur de très longues échelles de temps (du millier d'années à plusieurs centaines de milliers d'années)* »⁴⁴

Les formations encaissantes incluent les voies d'écoulement qui relient les flux de contaminants quittant la roche-hôte avec les exutoires où l'exposition d'un membre du groupe critique se produit. Le rôle de ces milieux est de retarder et de disperser les contaminants et non pas de les retenir. La caractérisation de leurs propriétés doit être suffisante pour définir ces capacités.

Les processus et les propriétés importants de la roche-hôte sont ceux qui influent considérablement sur le moment de l'arrivée des contaminants aux limites de la formation (haut et bas), le flux de contaminants maximal, et la masse totale sur une période d'un million

⁴² Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 56

⁴³ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 56

⁴⁴ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 56

d'années. Ces critères sont utilisés par l'Andra comme indicateurs complémentaires. De même, les processus et les propriétés des formations adjacentes affectent sensiblement les concentrations des contaminants aux points d'exposition. Par conséquent, il est essentiel d'examiner l'évaluation des performances de l'Andra pour évaluer si les propriétés qu'elle attribue à la ZIRA et si sa démarche de modélisation de la barrière géologique sont suffisantes pour démontrer que les normes de radioprotection seront respectées.

Le rôle des processus et des propriétés du milieu géologique dans les performances à long terme ne peut être évalué qu'en fonction de l'analyse de sûreté dans laquelle les incertitudes sur les paramètres des formations hôte et encaissantes sont correctement intégrées. Les paramètres importants sont ceux qui ont le plus d'impacts sur l'incertitude dans la mesure des performances (dose). Par conséquent, la caractérisation appropriée de la variabilité spatiale et temporelle et des incertitudes est l'un des principaux objectifs de la caractérisation des paramètres.

La discussion des processus et des paramètres liés aux milieux géologiques dans la zone de transposition et la ZIRA est donnée ci-dessous pour la formation hôte (section 3.2.1) et les formations encaissantes (section 3.2.2). La discussion sur la façon dont ces paramètres influencent le transport dans les milieux géologiques et les performances à long terme du stockage est donnée dans la section 3.2.3.

3.2.1 Roche-hôte de la formation du Callovo-Oxfordien

L'Andra décrit la formation du Callovo-Oxfordien dans la zone de transposition comme

« ...une couche homogène, peu perméable, dont le toit se trouve à une profondeur variant de 420 mètres (correspondant au site du laboratoire) à plus de 600 mètres suivant la direction du pendage, et dont l'épaisseur varie aussi progressivement de 130 mètres au Sud à 160 mètres au Nord de la zone. »⁴⁵

L'Andra considère que la roche-hôte de la formation du Callovo-Oxfordien est « *un composant essentiel du système, dans la mesure où elle contribue à l'ensemble des fonctions qui ont été définies.* »⁴⁶. Les fonctions de sûreté visées dans cette déclaration sont les suivantes :

- s'opposer à la circulation de l'eau
- limiter le relâchement des radionucléides et les immobiliser dans le stockage
- retarder et atténuer la migration des radionucléides

La fonction de prévention de la circulation de l'eau « *s'accomplit grâce au choix d'une roche, le Callovo-Oxfordien, très peu perméable et suffisamment homogène, et présentant des gradients hydrauliques faibles en son sein.* »⁴⁷ Cela implique également qu'il n'y a pas de fractures conductrices et/ou des anomalies qui peuvent jouer le rôle de voies rapides (flux convectif). « *La thèse générale qui veut que les fractures dans les milieux argileux soient peu fréquentes et/ou*

⁴⁵ Dossier 2005 Argile, Sûreté p. 85

⁴⁶ Dossier 2005 Argile, Sûreté p.697 (dans la Section 8.1.1)

⁴⁷ Dossier 2005 Argile, Sûreté p. 138

insignifiantes d'un point de vue hydraulique est l'un des principaux arguments pour envisager ces roches pour l'isolement des déchets. »⁴⁸

La fonction de limitation de la vitesse de relâchement des radionucléides est assurée « *en imposant des conditions physico-chimiques favorables. La roche contribue à imposer un pH proche de la neutralité et de conditions réductrices qui sont propices à la maîtrise des relâchements, notamment pour les déchets vitrifiés. La solubilité de nombreux éléments y est réduite. Sa faible porosité contribue également à limiter les risques de transport colloïdal »⁴⁹*

La fonction de retardement et d'atténuation de la migration des radionucléides est assurée par *les faibles vitesses de diffusion, ainsi que les capacités de sorption élevées des argilites. »⁵⁰*

La conclusion de l'Andra sur la formation du Callovo-Oxfordien est que :

« Cette analyse des fonctions montre que le Callovo-Oxfordien est un composant particulièrement important, dont les caractéristiques permettent d'assurer un bon niveau de performances des fonctions de sûreté, même en cas de fonctionnement médiocre des autres composants (conteneurs défailants, scellements peu efficaces) ou même de propriétés dégradées du milieu géologique lui-même. »⁵¹

En résumé, dans son évaluation de la roche-hôte, l'Andra s'appuie notamment sur les propriétés suivantes de la formation du Callovo-Oxfordien :

- Homogénéité (y compris absence de fractures et de failles conductrices)
- Faible perméabilité
- Faible gradient hydraulique
- Faible diffusion effective
- Absorption élevée des radionucléides

Sur la base des recherches menées dans le Laboratoire souterrain et dans la zone de transposition les conclusions suivantes ont été formulées par l'Andra concernant ces propriétés importantes :

- *« Les propriétés de la roche sont désormais bien connues grâce à un important programme de caractérisation en forage et dans le laboratoire ;*
- *les principales grandeurs ne présentent pas plus d'un facteur dix d'incertitude. »⁵²*

Les conclusions de l'Andra sur l'importance des propriétés de la roche hôte sur la performance sont :

⁴⁸ Mazurek et al. 2008 p.S101

⁴⁹ Dossier 2005 Argile, Sûreté p. 697

⁵⁰ Dossier 2005 Argile, Sûreté p. 697

⁵¹ Dossier 2005 Argile, Sûreté pp. 370-371

⁵² Dossier 2005 Argile, Sûreté p. 697

- (1) « *Le transport des solutés dans le Callovo-Oxfordien s'effectue majoritairement par diffusion.* »⁵³ Cette conclusion a été appuyée par la modélisation : sur cette base, l'Andra a déclaré que « *le calcul des flux diffusif et convectif, tiré des résultats des simulations numériques, confirme cette dominance du flux diffusif, de près de deux ordres de grandeur.* »⁵⁴ Ces résultats de la modélisation ont été considérés par l'Andra comme une limite (conservatrice) parce qu'ils ont été obtenus avec « *un gradient hydraulique conservateur, qui est avec un gradient hydraulique vertical maximal, ascendant, correspondant à un emplacement particulier au sein de la zone de transposition et au modèle hydrogéologique à un million d'années (0,4 m/m).* »⁵⁵ Il est intéressant de remarquer que les autres paramètres de modélisation affectant le transport dans la formation hôte ont été spécifiés à leurs valeurs attendues (non conservatrices)
- (2) « *seuls quatre éléments (iode 129, chlore 36 et sélénium 79 et calcium 41) présentent encore un flux au toit du Callovo-Oxfordien. Le calcium 41 et le sélénium 79 sont cependant déjà très fortement atténués* »⁵⁶ Cette conclusion est basée sur la modélisation des 15 éléments (¹²⁹I, ¹⁰⁷Pd, ¹³⁵Cs, ¹⁰Be, ⁹³Zr (⁹³Nb), ³⁶Cl, ⁹⁹Tc, ⁴¹Ca, ¹²⁶Sn, ⁵⁹Ni, ⁷⁹Se, ⁹⁴Nb, ¹⁴C, ⁹³Mo, et ¹⁶⁶Ho) « *les radionucléides de période supérieure à 1000 ans et présentant a priori les comportements les plus pénalisants.* »⁵⁷ Des analyses complémentaires (calculs de transport) effectués par l'Andra « *ont permis de vérifier que les radionucléides qui n'ont pas été sélectionnés ne contribuent effectivement pas à l'impact.* »⁵⁸
- (3) « *Pour les toxiques chimiques associés aux déchets et aux composants du stockage, on a traité quelques éléments chimiques paraissant les plus significatifs : le bore, le nickel, l'antimoine et le sélénium.* »⁵⁹

L'examen des propriétés de la roche est fourni à la section ci-dessous.

3.2.1.1 Examen des propriétés de transport de la roche-hôte

3.2.1.1.1 Absence de fractures et de failles conductrices

Consciente de l'impact potentiel énorme des failles et des fractures sur les propriétés hydrogéologiques de la roche hôte, l'Andra a mené de nombreuses études géophysiques complétées par des observations dans les forages et les puits dans la zone de transposition. L'Andra est arrivée aux conclusions suivantes sur la base de ces études :

- « *Aucune faille n'a été, jusqu'à présent, mise en évidence dans la formation du Callovo-Oxfordien et ses encaissants sur une zone de 250 km² au nord et au nord-ouest du laboratoire. Les seules failles connues sont situées hors de cette zone : failles de la Marne (de direction N-NO) et fossé de Gondrecourt (de direction N-E) qui constituent les limites ouest, sud et est du secteur étudié.* »⁶⁰

⁵³ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 175

⁵⁴ Dossier 2005 Argile, Sûreté 289

⁵⁵ Dossier 2005 Argile, Sûreté 289

⁵⁶ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 212

⁵⁷ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 197

⁵⁸ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 197

⁵⁹ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 197

⁶⁰ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 88

Les travaux de cartographie géologique et la campagne de sismique réflexion permettent d'écartier la présence de failles à rejet vertical supérieur à quelques mètres (seuil de détection de 2 m avec les techniques de traitement fin de la sismique 3D). Des failles plus petites, dites secondaires, si elles existent, ont une extension limitée (quelques centaines de mètres d'extension maximum). »⁶¹

Sur la base de ces conclusions, 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. Bien qu'une recherche dans le laboratoire souterrain sur le transport convectif soit justifiable il existe des incertitudes quant à la façon dont celui-ci pourrait avoir une incidence sur un site de stockage situé dans la ZIRA.

Il y a deux problèmes liés à ces conclusions sur la base des études mentionnées dans le *Référentiel du Site 2010*.

La première préoccupation concerne les failles révélées par la récente campagne sismique 2D de 2007-2008 dans les parties nord et nord-ouest de la zone de transposition et à proximité de sa bordure occidentale. L'ampleur de ces failles est de l'ordre de quelques kilomètres avec un rejet vertical pouvant atteindre jusqu'à 20 m dans la partie profonde. Comme il a été souligné dans le *Référentiel du Site 2010*, l'orientation de ces failles a été difficile à déterminer parce que, dans de nombreux cas, une faille « *ne recoupe qu'un seul profil sismique* ». ⁶² Les emplacements des nouvelles failles sont indiqués dans les Figures 3-1 et 3-2. Une partie d'une de ces failles est située dans la ZIRA. ⁶³ Il faut noter que la coupe verticale de cette faille n'est pas fournie. L'impact potentiel de ces failles sur les propriétés de la roche-hôte dans la zone de transposition et la ZIRA n'a pas été pris en compte dans le *Référentiel du site 2010*. Lors d'une rencontre à Bure, le 16 février 2011, pour discuter des conclusions de l'équipe de l'IEER, l'Andra a informé l'IEER que la faille partiellement située dans la ZIRA se trouve dans la formation du Dogger, très en-dessous du Callovo-Oxfordien. L'Andra a fourni la documentation à cet effet à l'IEER. ⁶⁴ En conséquence, l'inquiétude soulevée par l'IEER lors de la présentation de son rapport au Clis, le 14 février 2011 a été résolue.

⁶¹ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 88

⁶² Référentiel du Site 2010, Tome 1 Section 9.2.6 (p. 210)

⁶³ La ZIRA n'apparaît pas dans la figure mais nous avons vérifié que c'est effectivement le cas en superposant des cartes.

⁶⁴ Andra Campagne Sismique 2008, Figure 3.5 (pdf p. 46)

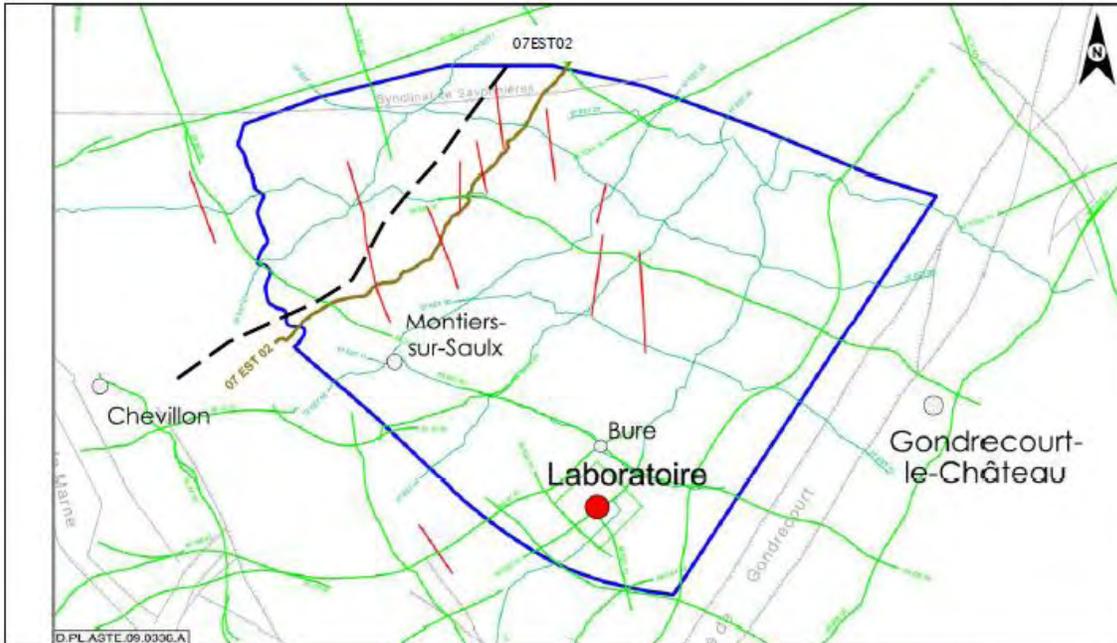


Figure 3-1 Disposition des failles mises en évidence avec la nouvelle (2007-2008) campagne de sismique réflexion (Source : Référentiel du site 2010, Tome 1, Figure 9-14 (page 212))

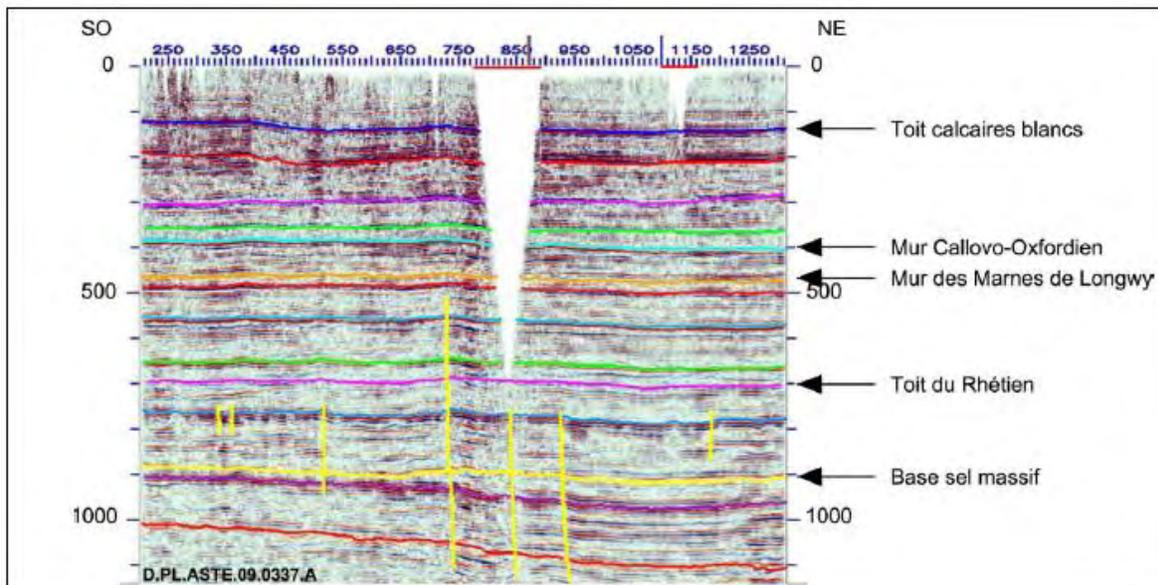


Figure 3-2. Géométrie des failles profondes sur le profil sismique 07EST02 [localisation sur Figure 3-1] (Source : Référentiel du site 2010, Tome 1, Figure 9-15 (page 212))

La deuxième préoccupation porte sur les microfractures observées dans les forages EST211, EST207, EST209, et EST361 et dans les puits principaux et auxiliaires. Ces microfractures sont considérées comme des fentes de tension.⁶⁵ Les microfractures avaient un développement de l'ordre de quelques mètres ou moins et étaient subverticales.

⁶⁵ Référentiel du Site 2010, Tome 1 Section 9.4.3.2 (pp. 226-228)

La fréquence des fractures est plus élevée dans le forage EST211 que dans les autres forages. Toutefois, les microfractures ont été observées dans le même intervalle de profondeur dans tous les forages et puits. Cela suggère⁶⁶ que la couche microfracturée peut avoir une extension de l'ordre de quelques dizaines de mètres à quelques kilomètres.

La plupart des joints ou diaclases ont été découverts dans la séquence argilite supérieure d'une teneur en carbonates plus élevée. Comme le suggère l'Andra, il existe une corrélation positive entre le nombre de fractures et la teneur en carbonate. La répartition des fractures est représentée sur la Figure 3-3 ci-dessous.

Les structures relevées correspondent principalement à des diaclases ou joints, des fentes de tension et quelques rares joints stylolithiques sub-verticaux. Les deux microfailles à jeu normal, de continuité métrique à infra-métrique, observées à environ 451 mètres de profondeur sont probablement liées à la compaction et n'ont pas d'incidence sur la géométrie des unités sédimentaires.

Par ailleurs, les diaclases observées sont présentes dans la partie supérieure du Callovo-Oxfordien qui correspond aux horizons les plus carbonatés, suggérant une relation entre la fréquence de la fracturation et l'argilosité (Figure 9-27) [i.e., Figure 3-3]. Un niveau à fentes de tension, à remplissage de calcite, est observé aux mêmes profondeurs dans les forages EST211 et EST361, il est retrouvé dans les puits principal et auxiliaire (434-440 mètres). De ce fait, il est probable que l'espacement pluri-décamétrique des quelques structures présentes, proches des épontes carbonatées, devienne progressivement hectométrique à kilométrique dans la partie plus argileuse de la formation.⁶⁷

L'Andra souligne que la principale incertitude des concepts reliés aux fractures tient à la quantification de la proportion de fractures ouvertes et de fractures remplies de calcite :

« la principale incertitude provient de la distinction des fractures réellement productrices de celles qui montrent un remplissage de calcite. »⁶⁸

L'Andra n'a pas développé de représentation conceptuelle de la couche microfracturée que ce soit dans la zone de transposition ou dans la ZIRA. 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 :

“Il est donc difficile de quantifier l'espacement entre micro-fractures. On peut supposer qu'il est d'ordre hectométrique, voire plus, sans conséquence sur les propriétés de la formation argileuse du Callovo-Oxfordien. »⁶⁹

⁶⁶ Référentiel du Site 2010, Tome 1 Section 9.4.3.2 (pp. 226-228)

⁶⁷ Référentiel du Site 2010, Tome 1, p. 228

⁶⁸ Référentiel du Site 2010, Tome 1 p. 239 dans la Section 9.5.2

⁶⁹ Référentiel du Site 2010, Tome 1 p. 242 dans la Section 9.5.3

Il semble qu'il y a une raison permettant d'émettre l'hypothèse que ces microfractures n'auraient pas d'effet significatif sur la performance. Au cours de la réunion du 16 février entre l'IEER et l'Andra, cette dernière a déclaré qu'elle avait constaté que toutes les microfractures étaient colmatées. Si cela s'avérait être aussi le cas dans la ZIRA, alors la préoccupation sur la question de l'espacement des microfractures serait de moindre importance.

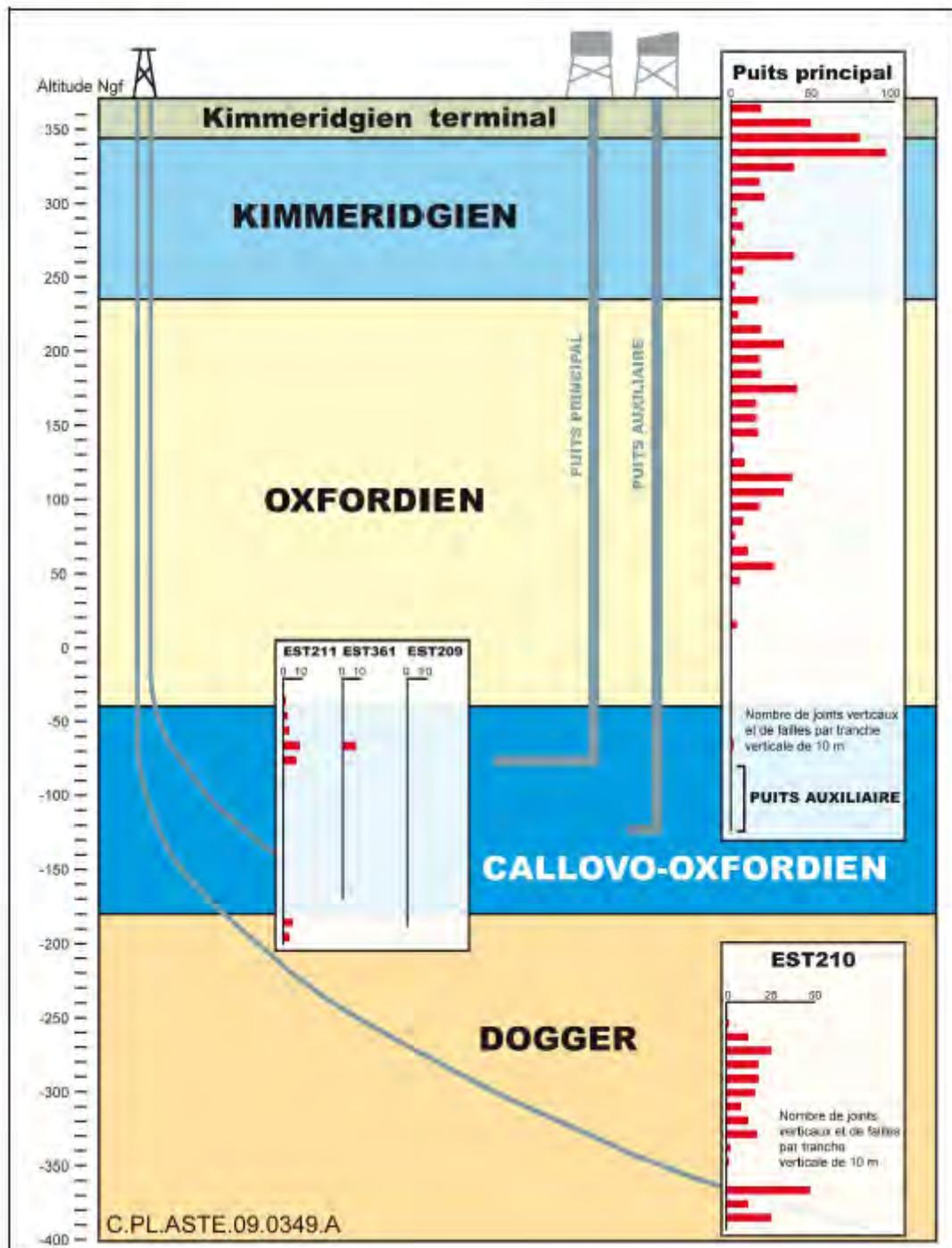


Figure 3-3. Fréquence de la fracturation en forages et en puits (Source : Référentiel du Site 2010, Tome 1, Figure 9-27 (p. 230))

3.2.1.1.2 Homogénéité

Comme indiqué plus haut, la formation hôte est supposée homogène. Cette hypothèse touche également la composition chimique de l'eau interstitielle dans le Callovo-Oxfordien qui « *est considérée homogène sur toute l'épaisseur de la formation, en cohérence avec l'homogénéité lithologique globale de celle-ci.* »⁷⁰

Sur la base de cette hypothèse, l'Andra suppose que les propriétés de transport sont aussi homogènes.

*« La variabilité « attendue » est couverte en représentant la formation hôte comme un milieu homogène et uniforme, et par la définition d'intervalles de variation (définition d'une valeur « phénoménologique » et d'une valeur « conservative ») pour l'ensemble des paramètres introduits dans le scénario d'évolution normale. Quand un nombre suffisant de mesures existe, la valeur « phénoménologique » est utilisée en référence et la valeur « conservative » en sensibilité, sinon seule la valeur conservative est prise en compte. »*⁷¹

L'Andra s'est servie des valeurs attendues (ou nominales) des paramètres correspondants dans le scénario d'évolution normale et a effectué une analyse de sensibilité :

*« Afin de compléter le traitement du scénario d'évolution normale, d'autres calculs sont effectués. Ce sont les analyses de sensibilité sur le modèle de sûreté. Elles entendent tester des jeux de paramètres ou des modèles différents de ceux retenus comme les plus représentatifs : valeurs extrêmes de certains paramètres correspondant à des situations très pénalisantes, mais aussi valeurs plus favorables. »*⁷²

Les paramètres utilisés dans les analyses de sensibilité sont résumés dans le Tableau 5.5-17.⁷³ La conductivité hydraulique du Callovo-Oxfordien prise en compte dans l'analyse de sensibilité n'était supérieure que d'un ordre de grandeur (d'un facteur 10) à celle du scénario d'évolution normale. Ce paramètre définit le débit du transport (en particulier significatif pour les radionucléides non absorbants) à travers les argilites.

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. La composition minéralogique ainsi que la composition de l'eau interstitielle changent verticalement et horizontalement. Ces deux caractéristiques ont un impact sur les propriétés de transport de l'argilite comme la porosité, la perméabilité, la diffusion et la sorption.

Des recherches approfondies ont été effectuées pour étudier les propriétés des formations argileuses. Une conclusion importante déduite de ces études est que « *dans les formations*

⁷⁰ Dossier 2005 Argile, Sûreté Section 2.2.2.4 (p. 88)

⁷¹ Dossier 2005 Argile, Sûreté Section 6.2.1.1 (p. 390)

⁷² Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 192

⁷³ Dossier 2005 Argile, Sûreté p.329

argileuses, la structure microscopique régit de nombreuses propriétés macroscopiques, notamment, entre autres, le transport et les propriétés géomécaniques. »⁷⁴ Par conséquent, « une bonne connaissance de la minéralogie, de l'évolution diagénétique et de la tectonique, l'enfouissement et l'histoire thermique est essentielle pour l'appréciation de la transférabilité. »⁷⁵

L'hétérogénéité de la composition minéralogique et de la composition de l'eau interstitielle est discutée ci-dessous. L'hétérogénéité qui en résulte dans les propriétés de transport est décrite dans les sections suivantes.

Composition minéralogique

Une analyse détaillée spécifique de la composition minéralogique des argilites du Callovo-Oxfordien considérée dans le contexte de l'histoire sédimentaire et paléo-géographique de la zone est présentée au Chapitre 10 du *Référentiel du Site 2010*. La conclusion importante basée sur cette analyse est résumée ci-dessous.

La composition minéralogique de la formation du Callovo-Oxfordien est hétérogène en coupe verticale. La description de cette hétérogénéité est présentée dans le *Dossier 2005 Argile* :

« Verticalement, les proportions des phases minéralogiques principales varient et s'organisent en trois séquences sédimentaires. La séquence supérieure se caractérise par une teneur en carbonates plus élevée. »⁷⁶,

L'épaisseur de la séquence supérieure dans la zone de transposition⁷⁷ augmente du nord-est (8 m) au sud-ouest (20 m). L'épaisseur de la séquence moyenne dans la zone de transposition⁷⁸ diminue du nord-est (110 m) au sud-ouest (70 m). L'épaisseur de la séquence inférieure dans la zone de transposition⁷⁹ diminue du nord (48 m) au sud-ouest (32 m).

La composition minéralogique des trois séquences sur la base des échantillons provenant des différents intervalles de profondeur dans les différents forages est présentée dans la Figure 3-4 ci-dessous. Comme on peut le voir sur cette figure, la composition minéralogique présente une variabilité importante dans les trois séquences à la fois verticalement (différents intervalles de profondeur dans un forage) et latéralement (forages différents).

Un avis émis dans le *Référentiel du Site 2010* ne reconnaît une variabilité minéralogique notable que dans la partie supérieure et la direction latérale, indiquant un enrichissement en carbonates. La teneur élevée en argile dans la séquence moyenne de la partie nord-est de la zone de transposition est également reconnue. 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

⁷⁴ Mazurek et al. 2008 p. S97

⁷⁵ Mazurek et al. 2008 p. S98

⁷⁶ Dossier 2005 Argile, Sûreté p. 85

⁷⁷ Référentiel du Site 2010, Tome 1 Figure 10-9 (p. 269)

⁷⁸ Référentiel du Site 2010, Tome 1 Figure 10-8 (p. 268)

⁷⁹ Référentiel du Site 2010, Tome 1 Figure 10-4 (p. 264)

basse est qualifiée de faible.⁸⁰ Cette conclusion est en désaccord avec les résultats présentés dans la Figure 3-4.

« La superposition des compositions minéralogiques des forages EST413, EST423, EST441 à celles des forages antérieurs met clairement en évidence la variabilité minéralogique faible pour les séquences moyenne et inférieure. Pour la séquence supérieure, l'étalement constaté sur le diagramme ternaire illustre l'enrichissement en carbonates et les alternances marno-calcaires (Figure 10-27 [Figure 3-4]. »⁸¹

et

« Dans la phase d'accélération de la baisse du niveau marin de la séquence médiane, les diagraphies révèlent un comportement plus rigide dans les forages du NE de la zone de transposition, à mettre en relation avec les proportions plus élevées en silts. »⁸²

⁸⁰ Référentiel du Site 2010, Tome 1 p.291

⁸¹ Référentiel du Site 2010, Tome 1 p.291

⁸² Référentiel du Site 2010, Tome 1 p.270 dans la Section 10.1.1.4

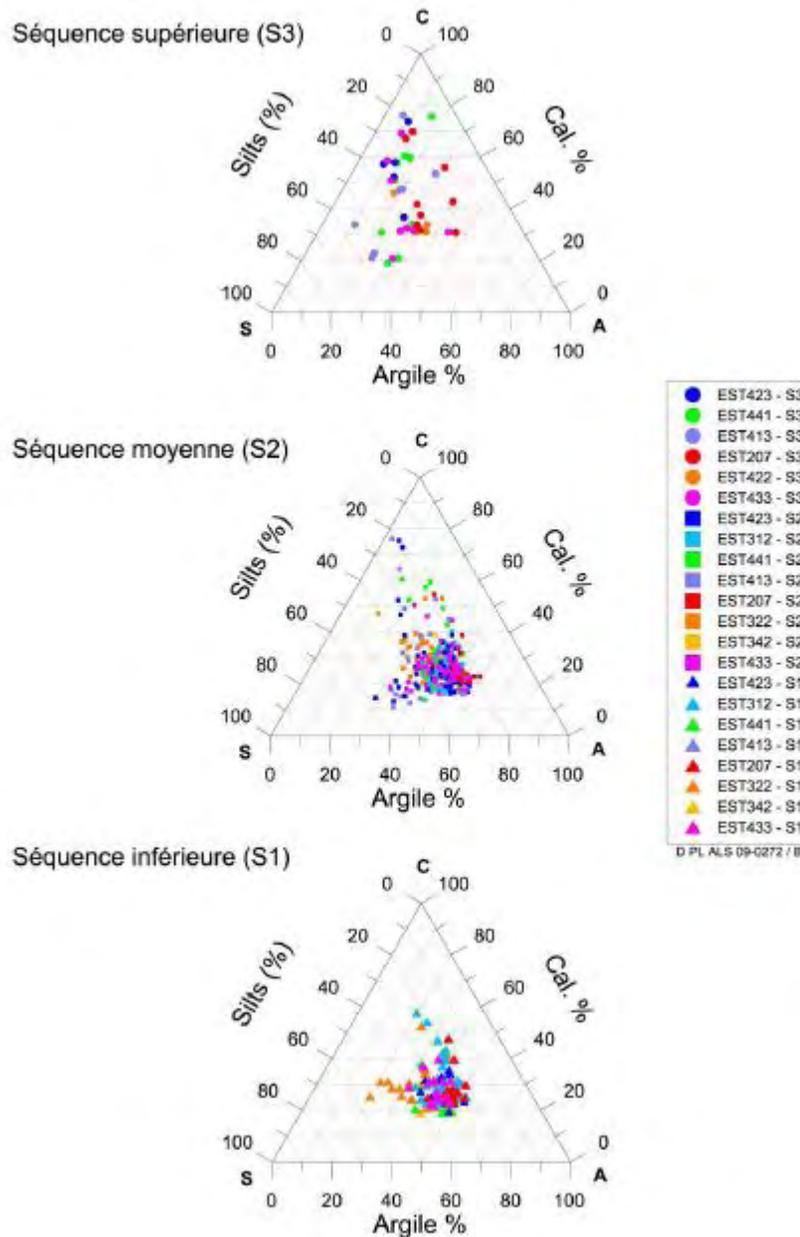


Figure 3-4. Répartition des principales phases minérales dans les trois séquences du Callovo-Oxfordien (analyses sur échantillons carottés) (Source : Référentiel du Site 2010, Tome 1 Figure 10-27 (p. 294))

Note : S1, S2 et S3 sont respectivement les séquences inférieure, moyenne et supérieure

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 paléo-géographiques des conditions de dépôt et (2) au développement des dépressions locales en raison des variations latérales dans les déplacements tectoniques.⁸³

⁸³ Référentiel du Site 2010, Tome 1 p. 270 dans la Section 10.1.1.4

Enfin, la Figure 3-5 témoigne de l'hétérogénéité verticale et horizontale de la formation du Callovo-Oxfordien en fonction des différents faciès sédimentaires dans la zone de transposition.

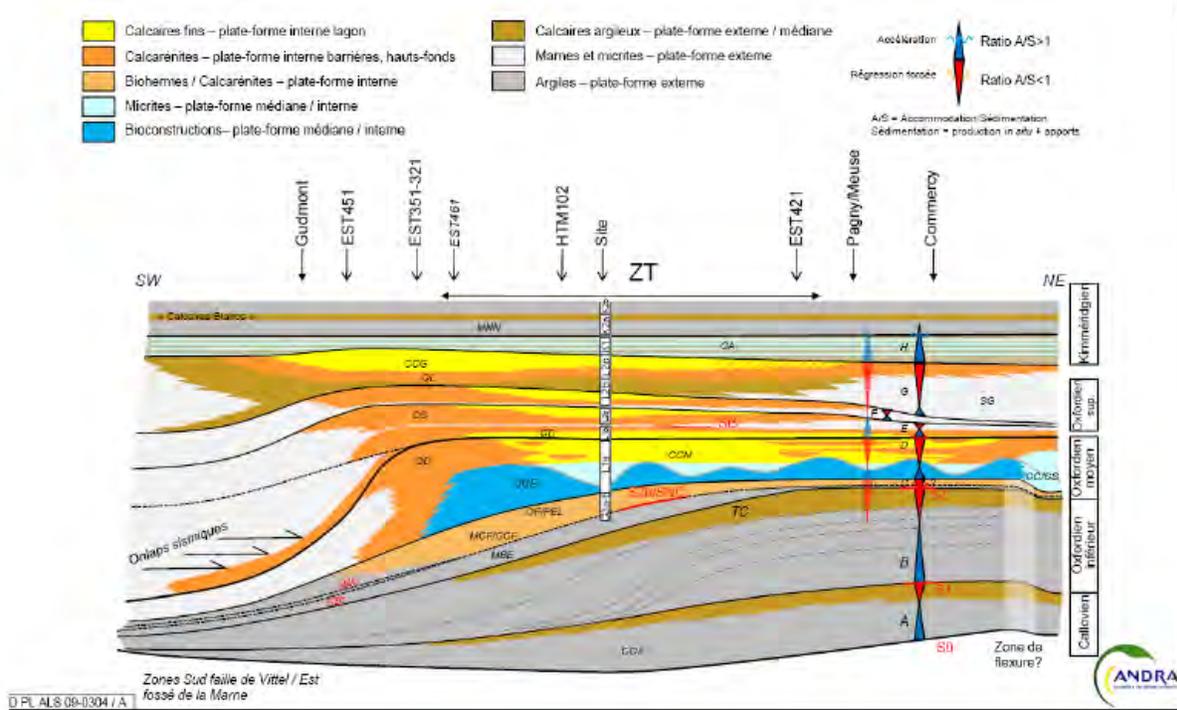


Figure 3-5. Modèle stratigraphique du Callovo-oxfordien et de la plate-forme oxfordienne (Source: Référentiel du Site 2010, Tome 1 Figure 10-40 (p. 314))

Composition de l'eau interstitielle

Les caractéristiques géochimiques de l'eau interstitielle dans le Callovo-Oxfordien sont étudiées en détail dans le *Chapitre 13* du *Référentiel du site 2010*. Ce chapitre analyse aussi un modèle géochimique développé pour simuler la composition de l'eau interstitielle. Les conclusions importantes basées sur cette analyse sont résumées ci-dessous.

L'eau d'origine marine contenue dans l'espace des pores des argilites du Callovo-Oxfordien a été sensiblement remplacée par les eaux d'infiltration.⁸⁴ Ce processus a progressivement changé la composition de l'eau interstitielle d'origine et a abouti à la composition observée actuellement sur le site.

Les teneurs en chlorure changent de façon significative au sein de la zone de transposition. La Figure 3-6 montre que les teneurs en chlorures sont significativement plus élevées dans les forages situés dans la partie nord-est de la zone de transposition (forages EST312, EST413, et EST423) que dans les forages situés dans les parties ouest et sud-ouest (forages EST443, EST433, et EST207/209).⁸⁵

⁸⁴ Référentiel du Site 2010, Tome 1 p. 462 dans la Section 13.3.1

⁸⁵ Référentiel du Site 2010, Tome 1 Section 13.1.3.2 (pp. 432-437)

Par ailleurs, comme on peut le voir sur le Tableau 3-1, la porosité accessible aux chlorures dans EST423 est inférieure de moitié à la valeur moyenne. La différence dans les teneurs en chlorure dans la zone de transposition aboutit à la différence correspondante dans la force ionique. La force ionique varie de 0,17 M (M = moles par litre) dans le nord-est à 0,07 M dans le sud-ouest.⁸⁶

La variation des concentrations des cations échangeables est mineure latéralement, mais elle est importante dans la coupe verticale. Le ratio entre la capacité d'échange cationique (CEC) et le contenu en minéraux argileux est très différent pour les séquences supérieure et inférieure.⁸⁷

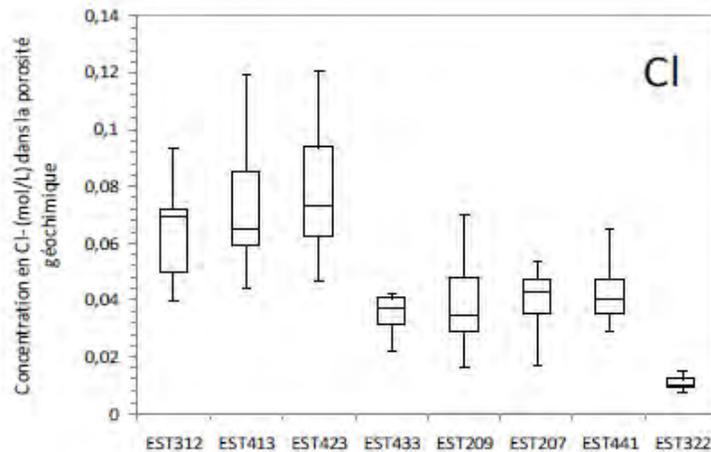


Figure 3-6 : Médianes, 1er et 3ième quartiles et valeurs minimum – maximum pour les concentrations en chlorure dans la solution mobile (F= 50%) pour divers forages de la zone de transposition (+ EST322) (Source : Référentiel du Site 2010, Tome 1 Figure 13-6 (p. 435))

La composition de l'eau interstitielle pour les principaux constituants est différente dans les zones sud-ouest et nord-est de la Zone Transposition⁸⁸ La composition de l'eau dans les forages EST423 et EST322, qui représentent les valeurs extrêmes, sera choisie pour représenter la variabilité de la composition de l'eau interstitielle.⁸⁹

L'emplacement des forages est indiqué dans la Figure 3-7

⁸⁶ Référentiel du Site 2010, Tome 1 p. 485 dans la Section 14.3.1.2

⁸⁷ Référentiel du Site 2010, Tome 1 Section 13.1.3.2 (pp. 432-437)

⁸⁸ Référentiel du Site 2010, Tome I Tableau 13-5 (p. 438)

⁸⁹ Référentiel du Site 2010, Tome 1 Section 13.1.4 (pp. 438-439)

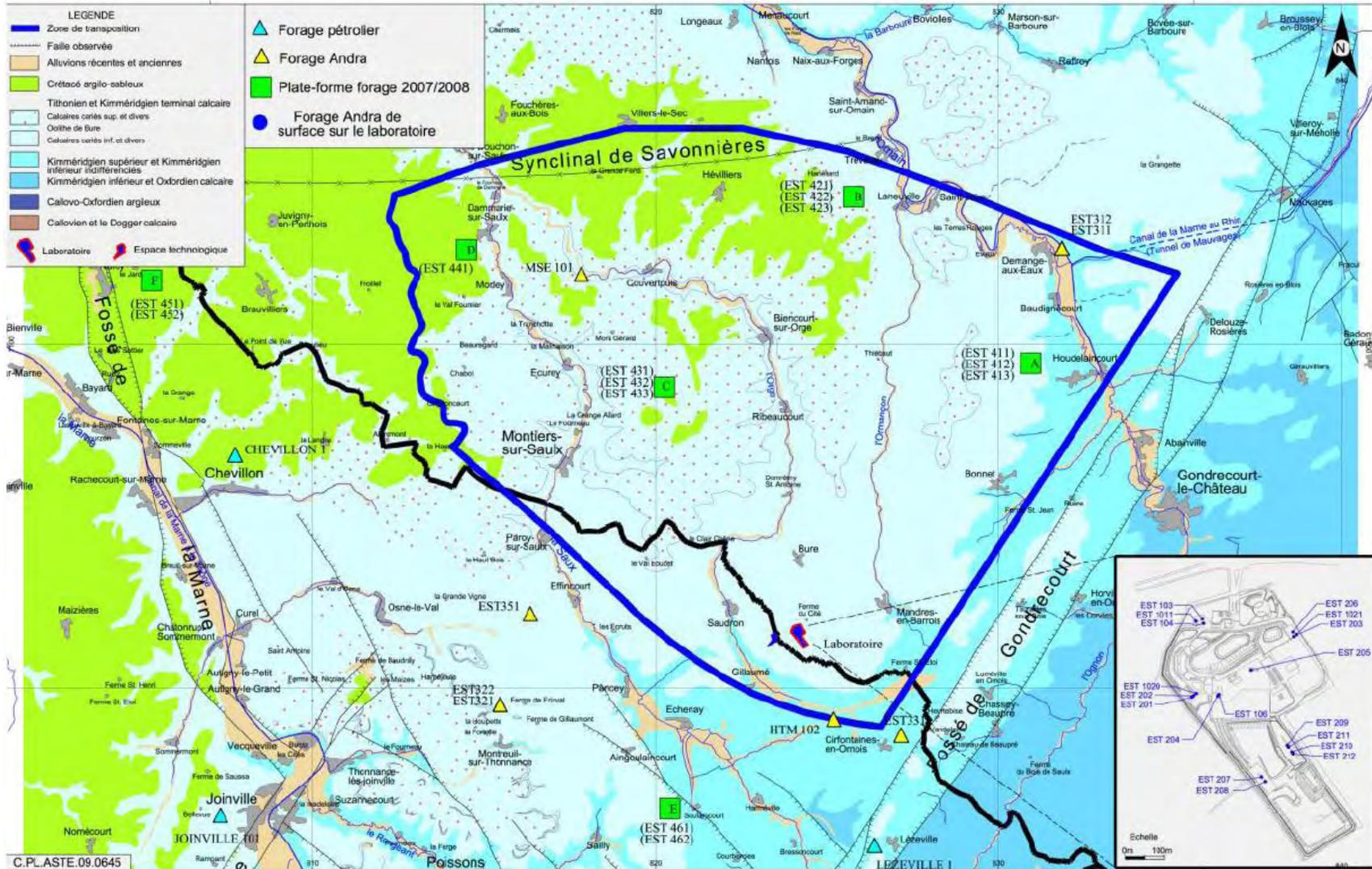


Figure 3-7. Carte de localisation des principaux forages profonds échantillonnés en eau (Source : Référentiel du Site 2010, Tome 1 Figure 13-10 (p. 440))

La variabilité a également été observée dans les concentrations d'autres constituants dans la zone de transposition. Par exemple, les données préliminaires recueillies sur l'hélium indiquent la variabilité spatiale de sa concentration dans la zone de transposition.⁹⁰

La modélisation géochimique a été réalisée pour simuler la composition observée de l'eau interstitielle. Les concentrations prédites par la modélisation des principaux constituants et celles observées (expérience PAC1002) sont résumées dans le Tableau 3-1. Comme on peut le voir dans ce tableau, la composition calculée est quelque peu différente de celle mesurée.

En résumé, la composition de l'eau interstitielle change latéralement et en coupe verticale au sein de la zone de transposition. Il existe deux zones distinctes, situées dans les parties sud-ouest et nord-est de la zone de transposition. La limite entre ces deux zones se trouve probablement quelque part dans la ZIRA.

La composition de l'eau interstitielle a la même tendance (nord-est à sud-ouest) que la composition minérale. La composition minérale affecte les propriétés de transport des argilites. La différence dans les propriétés de transport influe sur les processus de diffusion et de convection, qui, à leur tour, influent sur la composition de l'eau interstitielle.

Tableau 3-1 : Composition prédite par la modélisation Thermoar « référence » et gammes de valeurs mesurées pour les concentrations des espèces majeurs et le pH dans PAC1002.

	PAC1002*	Thermoar 'référence'	Écart (%)
pH	7,2 ± 0,1	7,2	0
Force ionique (mol/L)	0,09 ± 0,008 (9%)	0,08	-11
Chlorures (mmol/L)	41,4 ± 1,0 (3 %)	37,0	-10
Sulfates (mmol/L)	19,3 ± 4,0 (21 %)	15,1	-22
TIC (mmol/L)	4,2 ± 0,6 (14 %)	2,5	-40
Sodium (mmol/L)	55,7 ± 4,0 (7 %)	41,7	-25
Calcium (mmol/L)	7,6 ± 1,4 (18 %)	9,7	+20
Magnesium (mmol/L)	5,9 ± 1,1 (18 %)	3,4	-43
Potassium (mmol/L)	0,9 ± 0,3 (31 %)	1,0	+11
Strontium (mmol/L)	0,3 ± 0,02 (9 %)	0,2	-33
Fer(II+III) (mmol/L)	~ 0,02	0,06	+200
Silice (mmol/L)	~ 0,5	0,2	-60

(* Vinsot et Mettler, 2007, Tableau 12 ; ** valeurs min. / max. de la force ionique calculées à partir des valeurs moyennes)

(Source : Référentiel du Site 2010, Tome 1 Tableau 13-3 (p. 428 dans la Section 13.1.2.5))

3.2.1.1.3 Porosité

Quelques types de porosité sont abordés dans cette section. Le terme de porosité totale désigne le volume total des vides dans un échantillon de roche. Le terme « porosité effective » (ou porosité cinématique) désigne la fraction de la porosité totale dans laquelle un écoulement de fluide peut effectivement avoir lieu. La porosité cinématique exclut les pores « en cul de sac » et l'eau liée.⁹¹

⁹⁰ Référentiel du Site 2010, Tome 1 Section 13.3.3 (pp. 468-469)

⁹¹ Référentiel du Site 2010, Tome 1 p. 375

Le terme porosité accessible aux anions/cations désigne la fraction de la porosité totale qui est accessible aux anions/cations.

La porosité totale des argilites pour les cations dans la zone de transposition considérée par l'Andra dans l'analyse de sûreté est comprise entre 10 et 21 % avec une valeur moyenne de 18 %.⁹²

Les particules d'argile dans les argilites ont une charge électrique permanente. En conséquence, la proportion d'eau liée au contact de ces particules est très élevée (environ 50 % de l'eau contenue dans la porosité totale) et la porosité cinématique est significativement inférieure à la porosité totale. La porosité cinématique utilisée dans le scénario d'évolution normale était de 9 %.⁹³

Le même effet (charge électrique) affecte le volume des pores accessible aux particules chargées négativement (anions). Par conséquent, la porosité accessible aux anions peut être sensiblement inférieure à la porosité totale. Les résultats expérimentaux pour les anions donnent des valeurs de porosité accessible qui varient de 4 à 7 %⁹⁴ (avec une valeur moyenne de 5 %).

La porosité accessible aux anions est égale ou inférieure à la porosité cinématique.⁹⁵ Cela signifie que la zone d'exclusion anionique est égale ou supérieure à la couche d'eau porale immobilisée.

La majorité de l'espace poral est accessible aux particules chargées positivement (cations). Il a été supposé que la porosité accessible aux cations est la même que la porosité totale. La même fourchette de 10 à 21 % et la valeur moyenne de 18 % pour la porosité totale ont été utilisées.

Lorsqu'il s'agit des incertitudes, l'Andra indique que « *les incertitudes sur la porosité des argilites sont largement couvertes en scénario d'évolution normale, à la fois en référence et dans les études de sensibilité* »⁹⁶

Les caractéristiques de l'espace poreux, tels que la taille et la géométrie des pores, de la formation du Callovo-Oxfordien sont examinées en détail au *Chapitre 12 du Référentiel du site 2010*. La porosité accessible aux anions est analysée au *Chapitre 13*. Les données expérimentales fournies dans ces sections ont été étudiées pour évaluer les hypothèses de l'Andra concernant l'homogénéité des valeurs de porosité et des fourchettes considérées.

Porosité totale

La porosité totale des argilites varie significativement à la fois latéralement et en coupe verticale. D'après l'Andra, dans la section verticale la porosité totale varie de 5 à 23 %. Comparées aux unités C2b1, C2b2, et C2a, les unités C2d et C2c présentent la plus grande variabilité.⁹⁷

⁹² Dossier 2005 Argile, Sûreté p. 399

⁹³ Dossier 2005 Argile, Sûreté pp. 256 et 399

⁹⁴ Dossier 2005 Argile, Sûreté p. 399

⁹⁵ Référentiel du Site 2010, Tome 1 Section 15.1 (pp. 516-517)

⁹⁶ Dossier 2005 Argile, Sûreté p. 399

La porosité totale est principalement déterminée par la teneur en minéraux argileux. La macroporosité diminue et la mésoporosité augmente avec l'augmentation des minéraux argileux. Les zones de faible porosité (<12 %) sont situées dans les unités C2C et C2d et au bas de l'unité C2b1. Ces unités présentent une teneur en minéraux argileux inférieure à 40 %. Les zones de porosité élevée (> 18 %) sont associées aux unités à forte teneur en minéraux argileux (> 50 %).⁹⁸

La composition minéralogique des argilites joue le rôle principal, car la porosité totale est largement associée à des minéraux argileux (microporosité et mésoporosité). La porosité des silicates et des carbonates (macroporosité) est très faible.⁹⁹

D'après l'Andra, dans la zone de transposition, la porosité totale augmente d'est en ouest avec des valeurs minimales mesurées dans les forages EST441 EST322 et des valeurs maximales mesurées dans les forages EST312 et EST413 et sur le site du laboratoire.¹⁰⁰

En ce qui concerne l'hétérogénéité texturale des argilites du Callovo-Oxfordien, l'Andra précise:

Au sein du Callovo-Oxfordien, l'argilite présente des hétérogénéités texturales de l'échelle décimétrique à micrométrique dont la géométrie est principalement dépendante de la proportion en minéraux argileux. Les roches les plus hétérogènes sont celles présentant une faible proportion en minéraux argileux....¹⁰¹

Les distributions de probabilité de la porosité totale obtenues pour les différents sites sont représentées dans la Figure 3-8. 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.

⁹⁷ Référentiel du Site 2010, Tome 1 Tableau 12-2 (p. 388) et Figures 12-4 et 12-5 (pp. 385 et 386)

⁹⁸ Référentiel du Site 2010, Tome 1 Section 12.3.1 (pp. 383-388)

⁹⁹ Référentiel du Site 2010, Tome 1 Section 12.3.3.1 (pp. 391-393)

¹⁰⁰ Référentiel du Site 2010, Tome 1 Section 12.3.1 (pp. 383-388)

¹⁰¹ Référentiel du Site 2010, Tome 1 p. 398 dans la Section 12.3.4.1

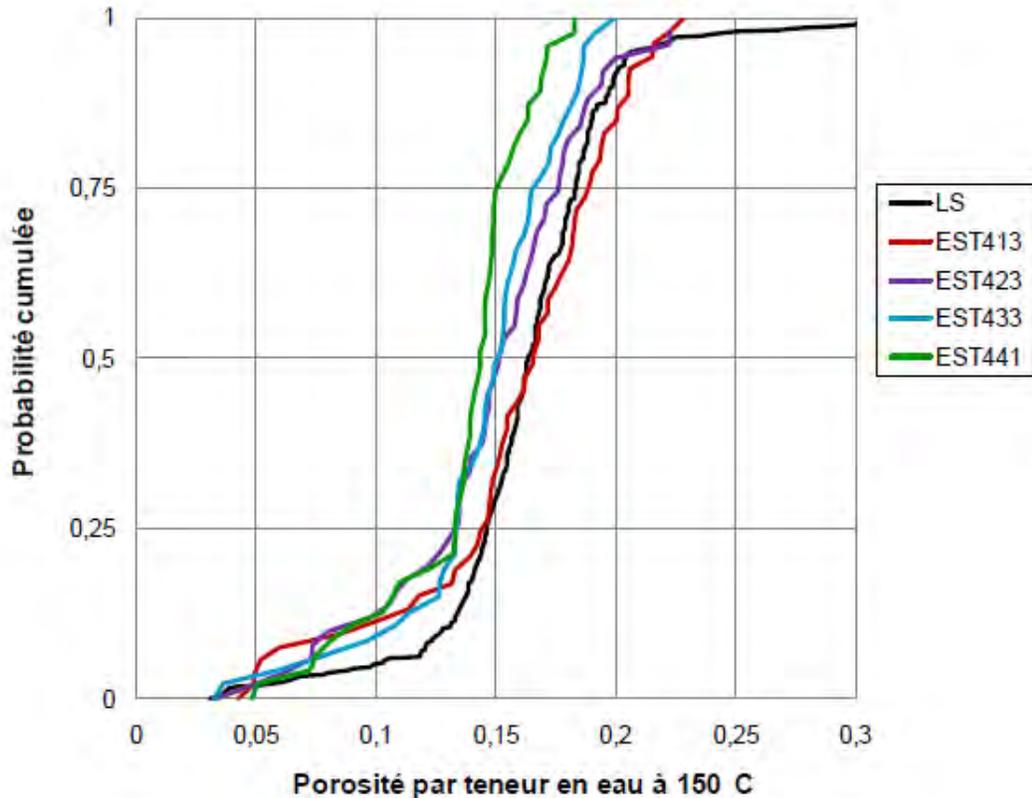


Figure 3-8. Distribution cumulée de probabilité pour la porosité déduite de la teneur en eau 150 °C (masse volumique des grains = 2,69 g/m³) des échantillons de Callovo-Oxfordien au niveau du site du laboratoire souterrain (forage EST413, EST423, EST433, et EST441) (Source : Référentiel du Site 2010, Tome 1 Figure 12-14 (p. 399))

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.¹⁰² 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.

Porosité accessible aux anions

Les données sur la porosité accessible aux anions sont résumées dans le Tableau 3-2. Les données pour les chlorures sont les plus appropriées pour déterminer la porosité accessible aux anions car c'est une espèce non sorbante, par opposition à l'iode qui pourrait présenter une sorption faible.

¹⁰² Référentiel du Site 2010, Tome 1 Section 13.1.2.2 (pp. 422-424)

Tableau 3-2 : Concentrations en chlorure mesurées sur fluide extrait par pressage, et concentrations calculées sur la base de la masse de chlorure lixiviée et du volume d'eau de pore. Estimation du volume de pore équivalent.

Forage (passe carotté)	Concentration en Cl ⁻ (Mol par L)		Facteur de 'sur concentration'	Porosité accessible au chlorure
	Solutions extraites par pressage (A)	Calculée à partir de la masse totale en Cl ⁻ et le volume total d'eau de pore (B)	(A/B)	(B/A)
HTM102 ⁽ⁱ⁾	3,2E-02 (± 7,5E-03)	1,6E-02 (± 3,1E-03)	2,0 (± 0,4)	0,5 (± 0,1)
EST104 ⁽ⁱⁱ⁾	3,1E-02 (± 1,4E-03)	1,4E-02 (± 1,8E-03)	2,3 (± 0,3)	0,45 (± 0,07)
<u>Campagne 'FRF'⁽ⁱⁱⁱ⁾</u>				
EST211(K12)	4,80E-02	2,38E-02	2,01	0,50
EST212(K1)	4,51E-02	1,84E-02	2,44	0,41
EST212(K6)	3,67E-02	1,67E-02	2,20	0,46
EST212(K13)	3,10E-02	2,24E-02	1,38	0,72
<u>Campagne 'FZT'^(iv)</u>				
EST413(K13)	5,35E-02	3,47E-02	1,54	0,65
EST423(K4)	7,61E-02	1,93E-02	3,95	0,25
EST441(K14)	4,79E-02	2,26E-02	2,12	0,47
EST433(K1-13)	4,23E-02	2,13E-02	1,99	0,50
Moyenne ± é.t.			2,19 ± 0,7	0,49 ± 0,12
PAC1002(K5)	2,67E-02 ^(v)	1,3E-02 ^(v)	2,1	0,49

(i) HTM832, HTM981, HTM1032, HTM1052, HTM1077, HTM1125, HTM1233 (B.RP.0.BGS.95.001) ; (ii) EST2245, EST2324, EST2373, EST2389, EST2402 (D.RP.0.BGS.97.001) ; (iii) Fünmig PID 3.2.1 (CIEMAT) ; (iv) CIEMAT/DMA/2G200/02/09 ; (v) Tableau 31 (BRGM/RP-54416)

(Source : Référentiel du Site 2010, Tome 1 Tableau 13-1 (Section 13.1.2.2 (p. 424))

Comme on peut le voir dans ce tableau, la fraction de la porosité accessible aux anions se situe entre 0,25 et 0,72, ce qui est très similaire à la fraction de la porosité cinématique. Comme dans le cas de la porosité cinématique, il est raisonnable de supposer que la fraction de la porosité accessible aux anions doit être plus élevée lorsque la teneur en minéraux argileux est faible parce que l'effet de la charge électrique sera moindre.

Conclusions

Les valeurs de porosité totale varient considérablement latéralement et verticalement. La variabilité est particulièrement importante pour la séquence argilite supérieure présentant la plus forte teneur en carbonates. La porosité totale est principalement déterminée par la teneur en minéraux argileux. La porosité totale est plus importante pour la couche présentant une forte teneur en argile et plus faible pour les couches présentant une faible teneur en minéraux argileux.

La porosité totale se situe entre 5 et 23 % (30 % sur le site du laboratoire), ce qui est nettement supérieur à la plage prise en compte dans l'analyse de sensibilité de l'Andra (10 à 21 %).

Les fractions de la porosité cinématique et de la porosité accessible aux anions sont très proches et représentent de 0,2 à 0,72 de la porosité totale. La porosité cinématique et la porosité accessible aux anions doivent être corrélées avec la teneur en minéraux argileux. La plage définie sans cette corrélation, sur la base des valeurs minimales et maximales de la porosité totale et la fraction de la porosité cinématique/accessible (1 à 17 %), ne serait pas représentative des conditions existantes.

Un exemple de distribution de la porosité cinématique (accessible aux anions) est indiqué dans la Figure 3-9. Les résultats indiqués dans cette figure sont obtenus à partir de 100 tirs de la méthode de Monte Carlo. Cette distribution a été calculée avec les paramètres suivants :

- La distribution probabiliste cumulative de la porosité totale a été définie à partir des données du forage EST413
- La distribution de la fraction de porosité cinématique (accessible aux anions) a été définie comme uniforme avec un minimum de 0,2 et un maximum de 0,72
- Une corrélation négative modérément forte (coefficient de corrélation de $-0,8$) entre la porosité totale et la fraction de porosité cinématique (accessible aux anions) a été utilisée. Le coefficient de corrélation de $-0,8$ a été utilisé comme une valeur illustrative pour représenter une corrélation négative relativement forte (aucune donnée réelle n'était disponible).

La gamme possible de porosité cinématique (accessible aux anions) obtenue dans cet exemple est comprise entre 2,3 % et 10,5 % avec une valeur médiane de 6 %.

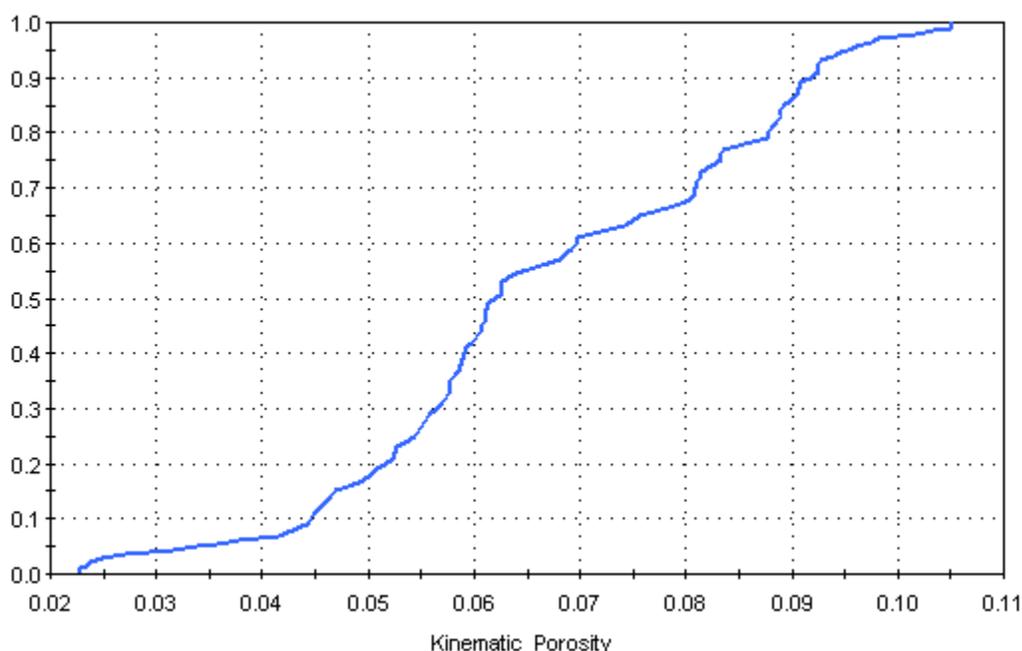


Figure 3-9. Probabilité cumulée pour la porosité cinétique (Source : E. Kalinina)

La plage obtenue est en bon accord avec les données du *Référentiel du Site 2010*, selon lesquelles les plages de la porosité accessible aux anions varient entre 3,3 % et 8,9 % avec une moyenne de 6 %.¹⁰³ Cependant dans son analyse de sûreté, l'Andra a utilisé une fourchette beaucoup plus étroite. La valeur retenue pour la porosité accessible aux anions est de 5%.¹⁰⁴ La valeur retenue pour la porosité cinématique est de 9%. Les données expérimentales indiquent que les valeurs de porosité cinétique 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.

A partir des données fournies ci-dessus, la valeur moyenne pour la porosité accessible et la porosité cinématique devrait être de 6 % pour les deux. La porosité accessible aux anions prise en compte dans l'analyse de sensibilité était de 4 %.¹⁰⁵ La porosité cinématique n'a pas été prise en compte dans l'analyse de sensibilité. Par conséquent, la gamme actuelle des valeurs de porosité accessible et cinématique n'a pas été étudiée.

3.2.1.1.4 Perméabilité

Les conductivités hydrauliques horizontales et verticales ont été utilisées comme mesure de la perméabilité des argilites du Callovo-Oxfordien. Les valeurs prises par l'Andra dans le scénario d'évolution normale étaient les suivantes : 5×10^{-14} m/s pour la perméabilité verticale et 5×10^{-13}

¹⁰³ Référentiel du Site 2010, Tome 1 Section 14.3.1.6, Tableau 14-3

¹⁰⁴ Dossier 2005 Argile, Sûreté pp. 256-257

¹⁰⁵ Dossier 2005 Argile, Sûreté p. 260

m/s pour la perméabilité horizontale.¹⁰⁶ Une étude de sensibilité a été menée avec des valeurs de perméabilité horizontale et verticale de 5×10^{-12} m/s et 5×10^{-13} m/s, respectivement.

La perméabilité des argilites du Callovo-Oxfordien est examinée en détail au *Chapitre 15* du *Référentiel du Site 2010*. Les données expérimentales fournies dans ce chapitre ont été étudiées pour évaluer la crédibilité des hypothèses concernant l'homogénéité des valeurs de perméabilité et les fourchettes considérées.

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. Comme on peut le voir sur cette figure, la conductivité hydraulique varie en coupe verticale. La conductivité hydraulique de la séquence supérieure est inférieure d'environ un ordre de grandeur (d'un facteur dix) à la conductivité hydraulique des séquences moyennes et inférieures du Callovo-Oxfordien.

Les fourchettes de la conductivité hydraulique sont comprises entre 7×10^{-14} m/s et 1×10^{-11} m/s sur la base des données présentées dans la Figure 3-10.¹⁰⁷ Ces données représentent probablement la conductivité hydraulique horizontale. Les valeurs importantes mesurées dans les forages MSE101 et HTM102 en 1994-1995 ont été considérées dans le *Référentiel du Site 2010* comme moins fiables en raison de la courte durée des tests et des conditions peut-être perturbées créées lors du forage.¹⁰⁸

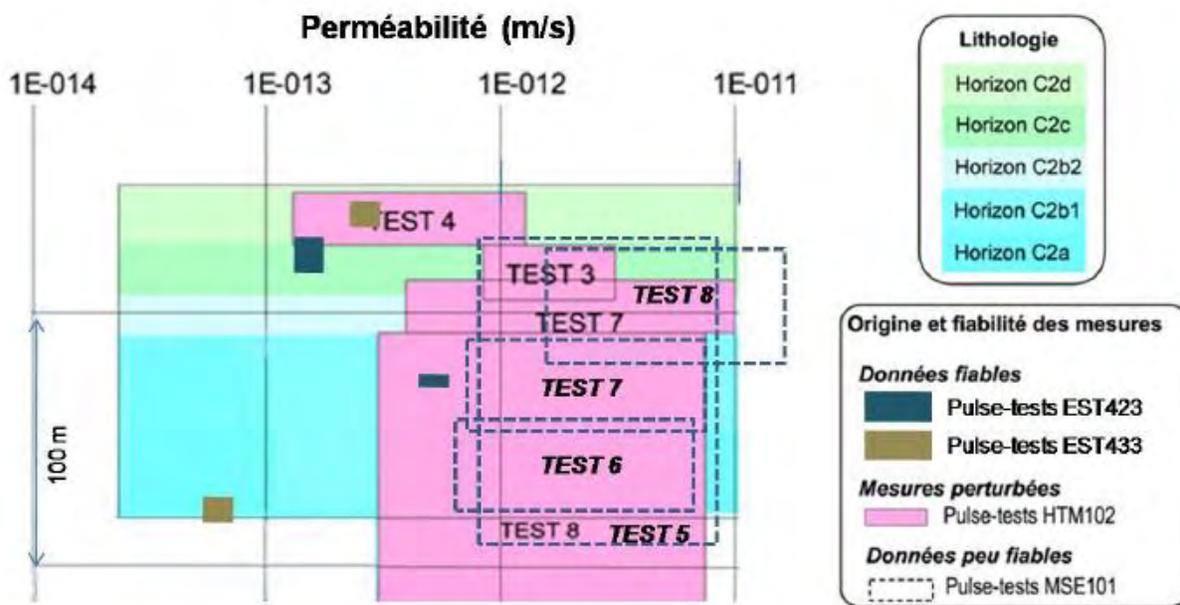


Figure 3-10. Perméabilités des argilites du Callovo-Oxfordien déduites des mesures in situ sur le secteur d'étude (Source : Référentiel du Site 2010, Tome 1 Figure 15-21 (p. 544))

¹⁰⁶ Dossier 2005 Argile, Sûreté pp. 256-257

¹⁰⁷ Référentiel du Site 2010, Tome 1 Figure 15-21 (p. 544)

¹⁰⁸ Référentiel du Site 2010, Tome 1 p. 545 dans la Section 15.2.2.1

Les données de la conductivité hydraulique verticale et horizontale qui ont été jugées fiables sont résumées dans la Figure 3-11. Les valeurs de la conductivité hydraulique horizontale et verticale des séquences moyenne et inférieure vont de 2×10^{-14} m/s à 2×10^{-12} m/s. La conductivité hydraulique verticale semble être légèrement plus faible lorsque le même intervalle de profondeur est pris en compte. Ce résultat est cohérent avec la conclusion formulée dans le *Référentiel du Site 2010* selon laquelle l'anisotropie de la perméabilité (rapport de la conductivité hydraulique horizontale et verticale) est relativement faible (environ 2 à 3).¹⁰⁹

Comme le flux convectif dans le Callovo-Oxfordien est vertical, la vitesse de ce flux dépend de la conductivité hydraulique verticale. Ainsi, il est important d'utiliser la plage observée dans la conductivité hydraulique verticale pour représenter sa variabilité (2×10^{-14} à 2×10^{-12} m/s).

L'approche adoptée par l'Andra a été de prendre la plage dans la conductivité hydraulique horizontale et d'en déduire la plage correspondante pour la conductivité hydraulique verticale en utilisant le facteur d'anisotropie de 10. Cette approche sous-estime la conductivité hydraulique verticale parce que l'anisotropie postulée est beaucoup plus élevée que celle qui a été observée. En outre, la plage de la conductivité hydraulique horizontale a été réduite à une valeur comprise entre 5×10^{-14} m/s et 5×10^{-13} m/s sur la base de l'affirmation que la plupart des valeurs se situent dans cette fourchette.¹¹⁰

En conséquence, 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; de même, le facteur de dix utilisé dans l'analyse de sensibilité est sensiblement plus petit que celui indiqué par les données.

¹⁰⁹ Référentiel du Site 2010, Tome 1 Section 15.3.2.1 (pp. 539-545)

¹¹⁰ Référentiel du Site 2010, Tome 1 Section 15.3.2.2 (pp. 545-550)

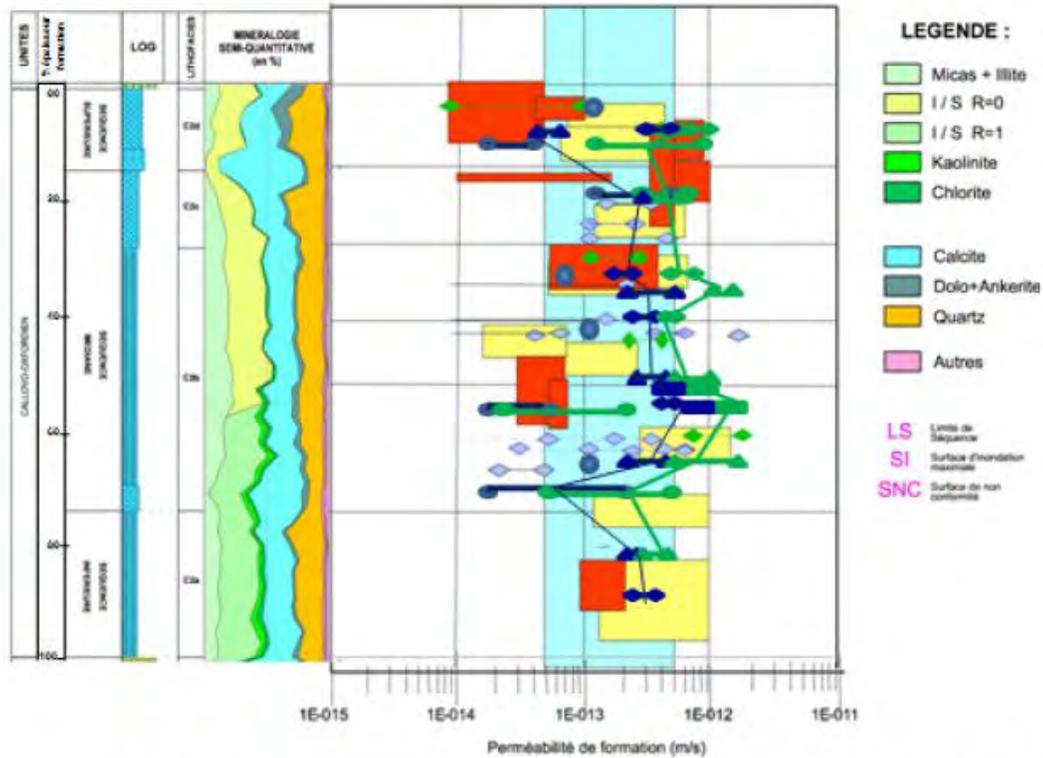


Figure 3-11. Synthèse des données de perméabilités fiables mesurées dans la formation du Callovo-Oxfordien (Source : Référentiel du Site 2010, Tome 1 Figure 15-28 (p. 551))

La comparaison des données du site avec d'autres sites argileux à travers le monde est présentée dans la Figure 3-12. Comme on peut le voir sur cette figure 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.

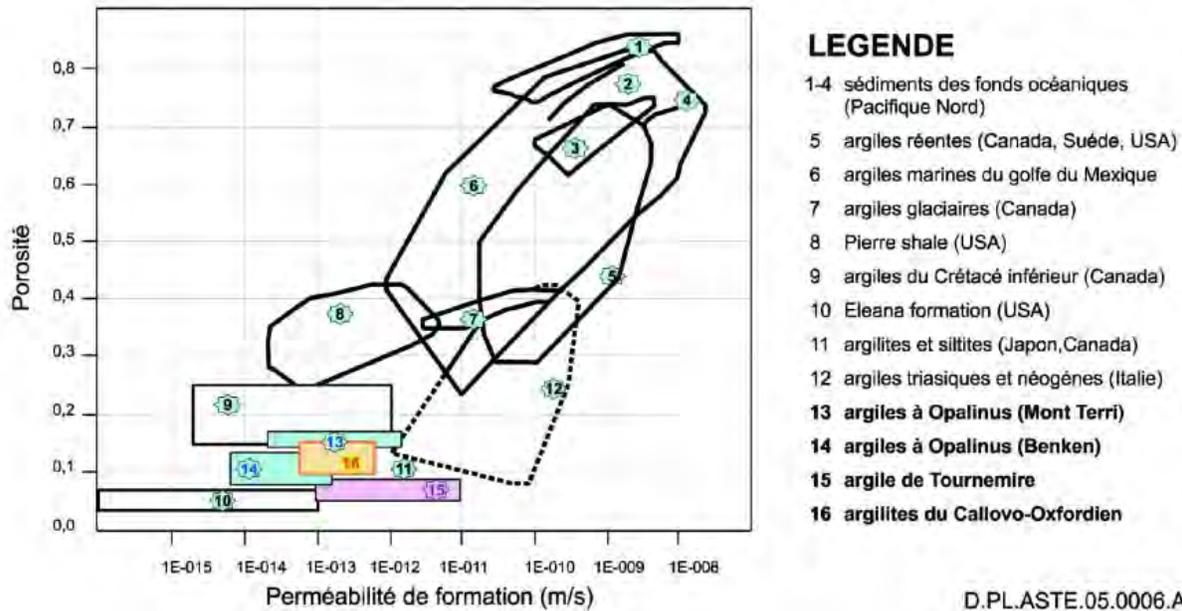


Figure 3-12. Compilation des porosités et perméabilités de formations mesurées sur différentes formation argileuses dans le monde (Source : Référentiel du Site 2010, Tome 1 Figure 15-29 (p. 552))

3.2.1.1.5 Gradient hydraulique

Le gradient hydraulique ascendant postulé par l'Andra est de 0,2 m/m dans le modèle actuel et de 0,4 m/m pour le modèle sur un million d'années. Le gradient hydraulique descendant est de -0,2 m/m à la fois pour le modèle actuel et celui sur un million d'années. L'Andra en déduit ensuite que « *Aucune source d'incertitude identifiée sur la valeur du gradient n'est de nature à la remettre en cause de manière importante.* »¹¹¹

Le gradient hydraulique dans le Callovo-Oxfordien influe sur le flux vertical convectif à travers les argilites. Le débit du flux de convection est directement proportionnel au gradient hydraulique et à la conductivité hydraulique. Un certain nombre de tests ont été effectués pour définir les valeurs de la perméabilité des argilites (section 3.2.1.1.4). Les estimations de gradients hydrauliques indiquées par les données dans le *Chapitre 15 du Référentiel du Site 2010* sont significativement plus incertaines que les valeurs fixes utilisées par l'Andra dans son analyse de sûreté citée ci-dessus. Il faudra faire plus de recherches pour déterminer les gammes appropriées pour les gradients verticaux dans différentes zones du site. Les raisons de la variation de ce paramètre demandent aussi à être examinées de manière plus approfondie.

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.¹¹² À ce jour,

¹¹¹ Dossier 2005 Argile, Sûreté p. 396

¹¹² Référentiel du Site 2010, Tome 1 Section 15.2.2.2 (pp. 527-532)

aucune explication plausible de ce phénomène n'a été fournie. Un certain nombre d'hypothèses ont été proposées, puis rejetées.¹¹³

Onze mesures de charges hydrauliques sont disponibles pour la formation du Dogger et treize sont disponibles pour la formation de l'Oxfordien dans la zone d'étude et beaucoup moins pour la zone de transposition.¹¹⁴

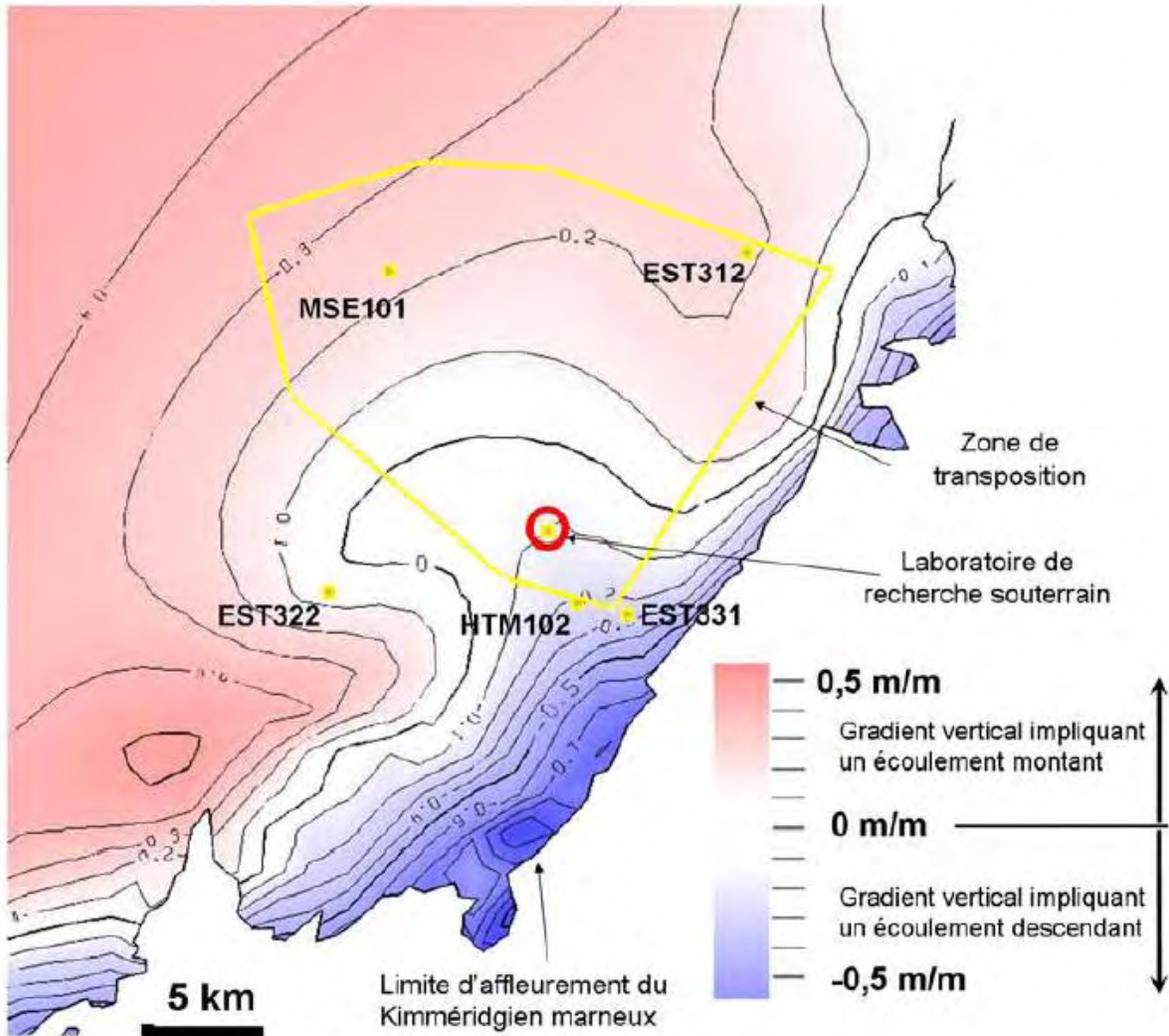
Les gradients dans la formation du Dogger sont faibles dans le nord-est et importants à l'ouest. Les raisons de ces différences ne sont pas bien connues.¹¹⁵

De ce fait, la carte des gradients hydrauliques de la Figure 3-13 ne doit être considérée que comme l'une des nombreuses représentations alternatives.

¹¹³ Dossier 2005 Argile, Sûreté p.394

¹¹⁴ Référentiel du Site 2010, Tome 1 Section 15.2.2.1 (pp. 520-527)

¹¹⁵ Référentiel du Site 2010, Tome 1 Section 15.2.3.1 (pp. 532-534)



Au sein de la zone de transposition, les champs de charge dans les encaissants déterminent un gradient vertical responsable d'un écoulement essentiellement montant au travers du Callovo-Oxfordien (en moyenne de 0,1 à 0,2 m/m)

Figure 3-13. Evaluation du gradient de charge hydraulique vertical, déduit des charges dans les encaissants, au travers du Callovo-Oxfordien (Source : Dossier 2005 Argile, Sûreté Figure 6.2-4 (p. 396))

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.

3.2.1.1.6 Diffusion efficace

Les valeurs du coefficient de diffusion efficace ont été mesurées en effectuant des essais de diffusion à la fois sur des carottes et in situ. Les valeurs utilisées par l'Andra pour le scénario

d'évolution normale sont de 5×10^{-12} m²/s pour les anions et de $2,5 \times 10^{-10}$ m²/s pour les cations.¹¹⁶ L'analyse de sensibilité a retenu des coefficients de diffusion effective plus grands d'un facteur 2 : 1×10^{-11} m²/s pour les anions et 5×10^{-10} m²/s pour les cations.¹¹⁷

Les coefficients de diffusion effective, avec la porosité accessible pour les anions et les cations (voir la section 3.2.1.1.3), représentent les paramètres les plus importants qui influent sur le transport par diffusion dans les argilites. La diffusion est le processus principal sur lequel on s'appuie pour respecter la fonction de sûreté définie comme suit : « *retarder et atténuer dans l'espace et le temps le flux des radionucléides finalement relâchés par les déchets vers les formations encaissantes.* »¹¹⁸ L'Andra indique que cette fonction « *concerne l'étalement dans l'espace, et consiste à empêcher que les radionucléides ne diffusent selon des directions privilégiées. Elle s'appuie sur l'homogénéité du Callovo-Oxfordien, et l'absence d'hétérogénéités significatives au sein de la formation au regard de la diffusion.* »¹¹⁹

Une recherche approfondie a été menée par l'Andra pour déterminer les coefficients de diffusion. Le sommaire de cette recherche fait l'objet d'informations détaillées au *Chapitre 14 du Référentiel du Site 2010*. Les données expérimentales fournies dans cette section ont été étudiées pour évaluer la crédibilité des hypothèses portant sur l'homogénéité des valeurs de porosité et des fourchettes considérées.

Les expériences menées sur les échantillons de carottes ont démontré qu'il y a 2 types d'incertitudes liées aux mesures de la diffusion efficace :¹²⁰ (1) l'hétérogénéité spatiale des roches et (2) les conditions expérimentales.

Les expériences ont également démontré que les coefficients de diffusion effective peuvent évoluer sensiblement, même au sein du même échantillon de forage provenant de la partie supérieure de la formation du Callovo-Oxfordien.¹²¹ Les coefficients de diffusion mesurés dans les échantillons provenant des différents forages (EST104, EST 205, et EST212) en utilisant de l'eau tritiée (HTO) sont résumés dans le Tableau 14-2 dans *Référentiel du site 2010*.¹²²

La diffusion efficace des anions est fonction de la force ionique de la solution. La plupart des tests de diffusion avec des chlorures et des iodures ont été réalisés en utilisant des solutions d'une force ionique de 0,05 M et 0,10 M.¹²³ Ces expérimentations fournissent la base de l'analyse et des conclusions relatives à la diffusion des anions dans la formation. Il est à noter que la force ionique est fixée à 0,17 M dans la partie nord-est de la zone de transposition qui comprend aussi la ZIRA.

Quelques mesures ont été faites pour évaluer les impacts de la force ionique de la solution sur la diffusion efficace et la porosité accessible des chlorures. La force ionique de la solution

¹¹⁶ Dossier 2005 Argile, Sûreté p. 256-257

¹¹⁷ Dossier 2005 Argile, Sûreté p. 260

¹¹⁸ Dossier 2005 Argile, Sûreté p. 150

¹¹⁹ Dossier 2005 Argile, Sûreté p. 151-152

¹²⁰ Référentiel du Site 2010, Tome 1 Section 14.3.1.3 (p. 485)

¹²¹ Référentiel du Site 2010, Tome 1 Section 14.3.1.3 (p. 485)

¹²² Référentiel du Site 2010, Tome 1 Tableau 14-2 (p. 488)

¹²³ Référentiel du Site 2010, Tome 1 Section 14.3.1.6 (pp. 488-491)

atteignait jusqu'à 0,2 M. Les résultats de ces mesures sont présentés dans la Figure 3-14 ci-dessous.

Sur la base de cette expérience l'Andra conclut que pour le coefficient de diffusion effective et la porosité accessible, l'augmentation est d'un facteur 2 environ. De plus, l'Andra conclut que la diffusion dans les pores (ratio de la diffusion effective et de la porosité accessible) reste la même et donc l'effet sur la migration des anions serait peu important.¹²⁴

Cependant, cette importante conclusion, relative au peu d'importance sur la migration des anions, n'est basée que sur quelques mesures et n'est pas totalement confirmée par les résultats de la Figure 3-14. Il existe une large dispersion des valeurs pour le coefficient de diffusion effective des chlorures pour une force ionique de solution de 0.1 M. La Figure 3-14 indique que l'augmentation de la diffusion effective (le graphe de droite) semble être plus importante que l'augmentation de la porosité accessible (le graphe de gauche). Ainsi, la diffusion effective des anions pourrait être supérieure dans la partie nord-est de la zone de transposition et peut-être le nord-est la ZIRA. D'autres recherches seront nécessaires pour résoudre cette question et déterminer la variabilité de la diffusion porale.

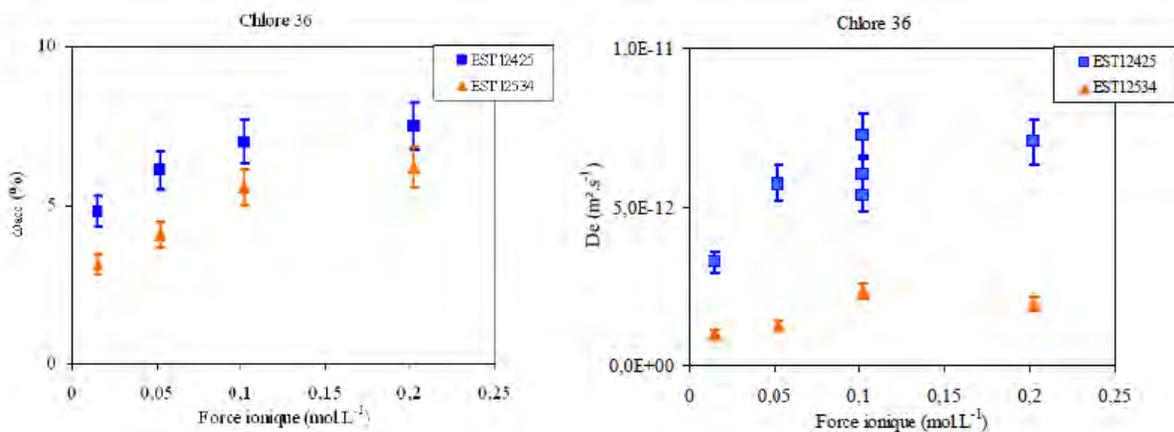


Figure 3-14. Diffusion de chlorure en fonction de la force ionique (Source : Référentiel du Site 2010, Tome 1 Figure 14-4 (p. 489))

Les coefficients de diffusion effective pour les chlorures (solution de force ionique 0,1 M) sont résumés dans le Tableau 14-3 du *Référentiel du Site 2010*.¹²⁵ Les coefficients de diffusion sont compris entre $5 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ et $8,4 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

La valeur moyenne et la fourchette des coefficients de diffusion effective pour les cations ont été déterminées à partir d'échantillons de carottes provenant de trois différents types d'échantillons d'argilite du forage EST205.¹²⁶ Les échantillons des autres forages n'ont pas été utilisés pour déduire une fourchette pour l'analyse de sûreté. Nous n'avons pas trouvé d'explication pour cette omission.

¹²⁴ Référentiel du Site 2010, Tome 1 Section 14.3.1.6 (pp. 488-491)

¹²⁵ Référentiel du Site 2010, Tome 1 Table 14-3 (p. 490)

¹²⁶ Référentiel du Site 2010, Tome 1 Section 14.3.1.7 (pp. 492-493)

Les données du coefficient de diffusion basées sur les échantillons provenant des différents forages sont résumées dans le Tableau 14-8 du *Référentiel du Site 2010*. Les données pour l'eau tritiée et les anions (chlorures) sont disponibles pour 8 forages et les données pour les cations (césium) sont disponibles pour 4 forages. Le coefficient de diffusion effective des chlorures dans l'un des échantillons du forage EST413 ($1,5 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$) est supérieur à la limite supérieure ($1,0 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$) prise en compte dans l'analyse de sensibilité de l'Andra. Le coefficient de diffusion moyen dans ce puits est de $8,8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, ce qui est 1,75 fois plus élevé que la moyenne considérée dans le scénario d'évolution normale. Le forage EST413 est situé dans le nord-est de la zone de transposition et juste au nord de la ZIRA.

Les coefficients de diffusion effective mesurés sur les échantillons provenant des différents forages sont indiqués dans la Figure 3-15. Comme on peut le voir sur cette figure, lorsque des échantillons multiples sont disponibles pour le même forage, ils font souvent apparaître une large variabilité dans les coefficients de diffusion. Cependant, pour la variabilité verticale des coefficients de diffusion effective à partir des données de cette figure, comme indiqué dans la *Section 14.3.1.10* du *Référentiel du Site 2010*,¹²⁷ l'Andra conclut que les coefficients de diffusion ne dépendent pas de la profondeur et que cela confirme l'homogénéité de la formation Callovo-Oxfordienne.

La conclusion de l'Andra selon laquelle les coefficients de diffusion sont indépendants de la profondeur contredit toutes les autres évidences présentées dans le Chapitre 14 du *Référentiel du Site 2010*, y compris les données présentées dans la Figure 3-15. Les données indiquent que, pour ce qui concerne les coefficients de diffusion, la formation du Callovo-Oxfordien est hétérogène. Les coefficients de diffusion effective varient considérablement à l'intérieur d'un même forage en fonction de la composition minéralogique et de la porosité (en grande partie déterminée par la teneur en minéraux argileux). Les coefficients de diffusion effective varient dans les différents forages en raison des différences de composition minéralogique et de la composition de l'eau interstitielle (largement déterminée par la force ionique).

Outre cette hétérogénéité, la diffusion est anisotrope comme mentionné à la *Section 14.3.2* du *Référentiel du Site 2010*.

Il existe deux ensembles de données. Le premier concerne le forage EST104. L'anisotropie moyenne mesurée sur les échantillons provenant de ce forage est de 1,56. L'autre ensemble de données se rapporte aux études qui ont été réalisées à l'appui des expériences du programme Diffusion de traceurs Inertes et Réactifs (DIR).R L'anisotropie des coefficients de diffusion est de 1,9 pour l'eau tritiée et 1,3 pour les chlorures.¹²⁸

¹²⁷ Référentiel du Site 2010, Tome 1 Section 14.3.1.10 (pp. 496-498)

¹²⁸ Référentiel du Site 2010, Tome 1 Section 14.3.2 (pp. 498-507)

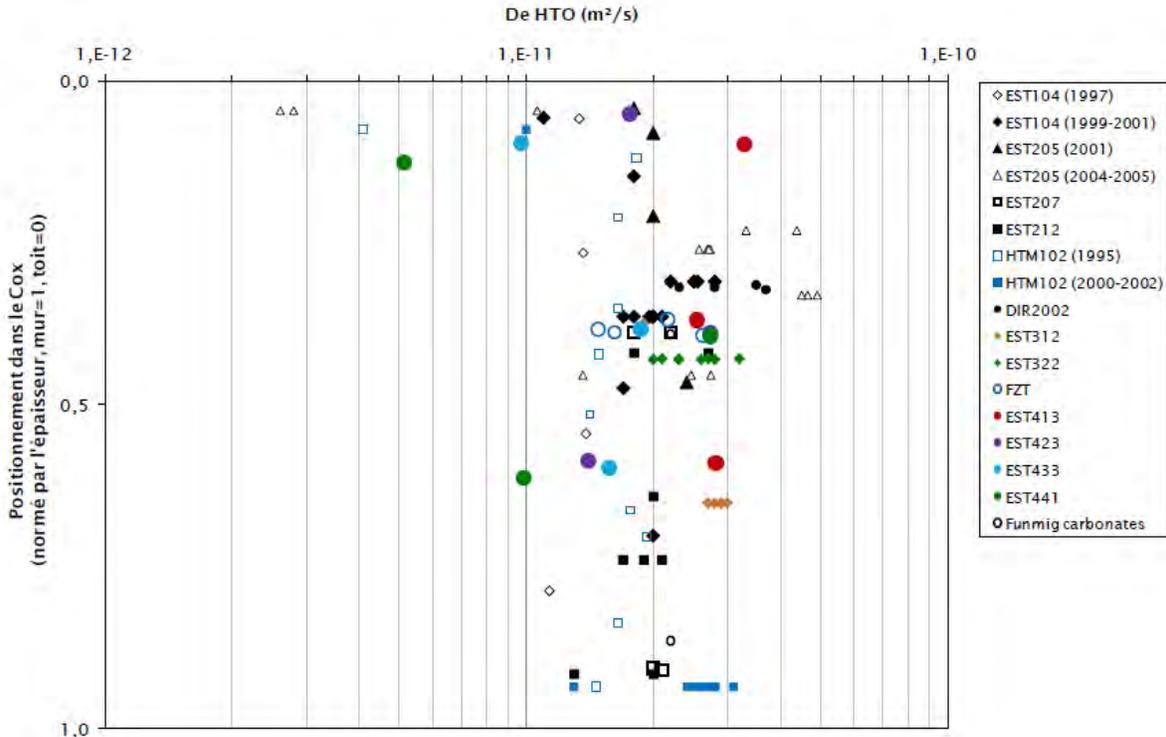


Figure 3-15. Coefficients de diffusion effectifs de l'eau tritiée dans le Callovo-Oxfordien, en fonction de la position des échantillons dans la couche du Callovo-Oxfordien (Source : Référentiel du Site 2010, Tome 1 Figure 14-7 (p. 497))

En résumé, les argilites du Callovo-Oxfordien présentent une hétérogénéité verticale et horizontale et sont anisotropes avec une diffusion horizontale (parallèle à la stratification) supérieure à la diffusion verticale. En raison du nombre limité de données, il semble que le potentiel de variation des coefficients de diffusion au sein de la zone de transposition et de la ZIRA ne soit pas totalement pris en compte. La valeur supérieure du coefficient de diffusion effective des anions prise en compte dans l'analyse de sensibilité est inférieure au coefficient de diffusion déterminé dans l'un des échantillons du forage EST413 situé à proximité de la bordure nord de la ZIRA.

3.2.1.1.7 Sorption

Peu d'informations sont présentées dans le *Référentiel du Site 2010* et le *Dossier 2005 Argile* concernant les données sur la sorption et la solubilité, et l'identification des radionucléides et des constituants toxiques retenus dans l'analyse de sûreté. Un effort important serait nécessaire pour localiser et examiner ces données et ces analyses associées. Cette tâche dépasse le cadre du présent rapport.

A ce stade, il est raisonnable de supposer que les performances à long terme du stockage seront principalement affectées par le transport de deux radionucléides à vie longue caractérisés par une capacité de sorption très faible et des limites de solubilité élevées ; ce sont l'iode 129 et le chlore 36 et, dans une certaine mesure le sélénium 79 et le calcium 41. Les effets des autres

radionucléides et des autres constituants toxiques seront soit similaires ces dernières ou atténués à un degré différent selon leurs propriétés spécifiques de sorption et de solubilité.

3.2.1.2 Examen des processus de transport dans la roche hôte

L'Andra précise l'importance du transport à travers la roche hôte en la formulant comme suit :

“Le calcul met en évidence que la majorité de la masse emprunte finalement la voie de transfert à travers le Callovo-Oxfordien sain. ...

La quasi-totalité de la masse relâchée (99,999 %) sort par le toit ou le mur du Callovo-Oxfordien après avoir migré par diffusion dans le Callovo-Oxfordien sain. »¹²⁹

Ceci est démontré dans la Figure 3-16. Comme indiqué sur cette figure,¹³⁰ 99,99997% de l'inventaire en Iode 129 est transporté dans les argilites du Callovo-Oxfordien. Comme on l'a souligné à plusieurs reprises dans les sections précédentes, ceci fait de la formation du Callovo-Oxfordien la composante la plus importante sur laquelle l'Andra se fonde dans ses évaluations à long terme de la sûreté du stockage.

Deux phénomènes majeurs sont susceptibles d'affecter le transport des contaminants pénalisants (non sorbants et très solubles) dans la roche hôte : (1) le transport convectif par lequel des espèces dissoutes se déplacent avec l'écoulement de l'eau interstitielle et (2) le transport par diffusion par lequel les espèces dissoutes se déplacent de la zone présentant les concentrations plus élevées vers la zone avec des concentrations plus faibles. L'Andra estime que la diffusion est le processus prédominant :

« Compte tenu de la faible perméabilité du Callovo-Oxfordien ($5 \cdot 10^{-13}$ à $5 \cdot 10^{-14}$ m/s en moyenne), ces écoulements d'eau sont très faibles (quelques centièmes de millilitre par an et par m²) de même que leur vitesse (quelques centimètres environ par 100 000 ans). » Dans ce contexte, le transport des solutés dans le Callovo-Oxfordien s'effectue majoritairement par diffusion. »¹³¹

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.

Le rôle potentiel d'une composante de transport convectif est évalué dans l'analyse de sensibilité dans laquelle une conductivité hydraulique verticale et horizontale supérieure d'un ordre de grandeur (d'un facteur dix) est utilisée. Sur la base de cette analyse l'Andra conclut que : « *le mode de transport demeure diffusif sans que cela modifie de manière sensible les flux en sortie*

¹²⁹ Dossier 2005 Argile, Sûreté p. 290

¹³⁰ Dossier 2005 Argile, Sûreté Figure 5.5-4 (p. 291)

¹³¹ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 175

de l'argile. On peut donc en déduire que des marges de sûreté importantes sont apportées par le milieu géologique. »¹³²

Un examen détaillé des paramètres de transport de la formation du Callovo-Oxfordien est donné dans la section 3.2.1.1. Cette section repose sur cette discussion dans l'analyse des processus de transport.

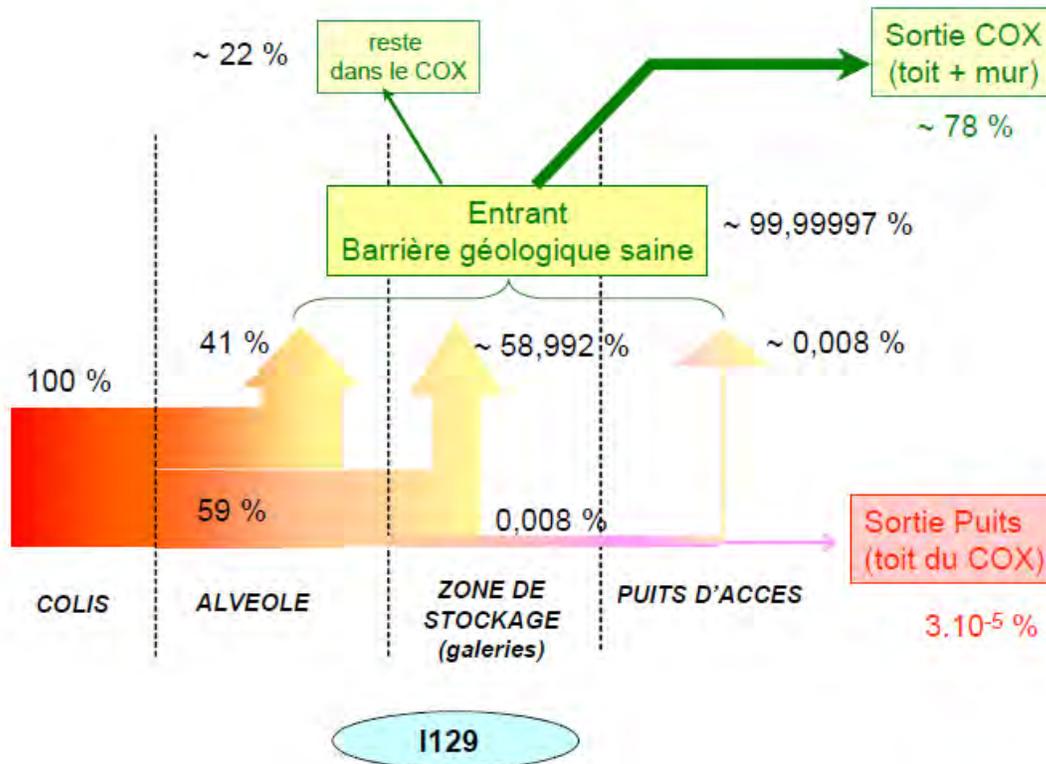


Figure 3-16. SEN - Répartition de la masse à travers les différents compartiments de calcul (iode 129 des CU1) (COX = Callovo-Oxfordien) (Source : Dossier 2005 Argile, Sûreté Figure 5.5-4 (p. 291))

La conclusion selon laquelle le transport par diffusion est dominant est faite par l'Andra sur la base de son analyse des propriétés de faible perméabilité de la roche hôte et corroborée par (1) la comparaison des temps de transport par diffusion à ceux du transport par convection (analyse simplifiée impliquant le calcul du nombre de Péclet) et (2) l'interprétation des données sur le traceur naturel. Ces deux questions sont examinées ci-dessous.

3.2.1.2.1 Nombre de Péclet

« Un nombre de Péclet est un nombre sans dimension qui peut établir un lien entre l'efficacité du transport de masse par convection et l'efficacité du transport de masse par dispersion ou par diffusion ». ¹³³ Ce nombre peut également être considéré comme le rapport entre les échelles de temps au niveau de la convection et à celui de la diffusion. En règle générale, un nombre de

¹³² Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 218

¹³³ Fetter 1993 p. 54. Traduit de l'Anglais

Nous avons effectué de simples calculs, décrits ci-dessous, pour estimer une fourchette de nombres de Péclet qui rend compte de la variabilité des paramètres. Dans ces calculs, une distribution de probabilité a été définie pour chaque paramètre dans l'équation (1). En conséquence, la distribution de probabilité a été calculée pour le nombre de Péclet, au lieu d'une valeur déterministe utilisée par l'Andra. Cette distribution englobe la gamme possible des régimes d'écoulement comme l'indique le nombre de Peclet et leur assigne une probabilité.

Dans la première série de calculs, les distributions de probabilité pour les paramètres de transport ont été définies en utilisant les limites prises en compte par l'Andra dans l'analyse de sensibilité.

Les distributions de probabilité des paramètres suivantes ont été utilisées :

- Longueur de transport (L) : distribution uniforme avec un minimum de 60 m et un maximum de 75 m (sur la base d'une épaisseur totale du Callovo-Oxfordien dans la zone de transposition de 130 m à 160 m).
- Porosité totale : moyenne entre la distribution de probabilité cumulative définie dans la *Figure 12-14 du Référentiel du Site 2010*
- Fraction de la porosité cinématique (par rapport à la porosité totale): distribution uniforme avec un minimum de 0,2 et un maximum de 0,72.
- Fraction de la porosité accessible (par rapport à la porosité cinématique): distribution uniforme avec un minimum de 0,8 et un maximum de 1.
- Conductivité hydraulique verticale (k) : distribution uniforme avec un minimum de 5×10^{-15} m/s et un maximum de 5×10^{-13} m/s.
- Gradient (dh/dz) : distribution uniforme avec un minimum de 0,2 m/m et un maximum de 0.4 m/m.
- Coefficients de diffusion des anions (D_{eff}) : distribution uniforme avec un minimum de $1,6 \times 10^{-12}$ m²/s et un maximum de 1×10^{-11} m²/s.

La porosité cinématique (ε_k) a été calculée comme le produit de la porosité totale et de la fraction de la porosité cinématique en supposant que le coefficient de corrélation est de -0,8.

La porosité accessible aux anions (ε_{acc}) a été calculée comme le produit de la porosité cinématique et de la fraction de la porosité accessible. Ceci a été fait pour tenir compte du fait que la porosité accessible aux anions est égale ou légèrement inférieure à la porosité cinématique.

Une corrélation modérée (coefficient de corrélation de 0,5) a été utilisée entre la porosité totale et la conductivité hydraulique. Cela permet d'intégrer la relation observée entre ces deux paramètres.

Une corrélation modérément forte de 0,8 a été utilisée entre le coefficient de diffusion effective et la porosité accessible. Cela permet d'intégrer la corrélation observée entre la diffusion effective et de la porosité accessible pour les anions.

Une analyse de 200 tirs de la méthode de Monte Carlo a été effectuée pour calculer le nombre de Péclet. Les résultats de cette analyse sont présentés dans la Figure 3-17.

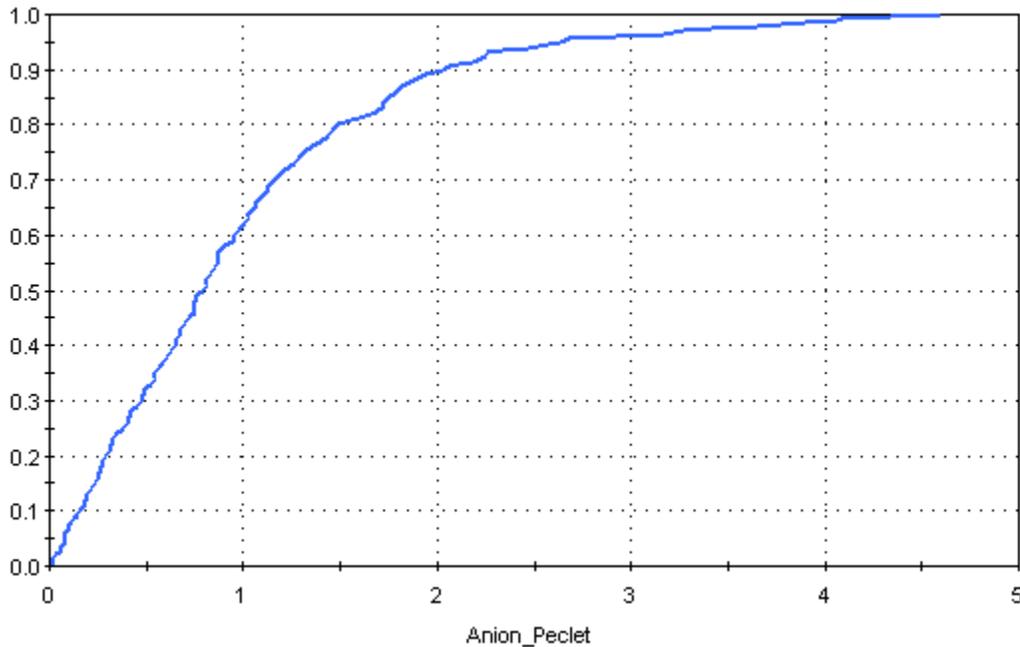


Figure 3-17. Nombre de Péclet avec les plages de paramètres d'entrée définies par l'Andra (Source: E. Kalinina)

Les nombres de Péclet médian et moyen sont de 0,79 et 0,98 respectivement. La fourchette va de 0,016 à 4,6. Ce calcul montre qu'il y a une probabilité d'environ 40 % pour que le transport convectif et celui par diffusion soient du même ordre. Si les corrélations entre les paramètres ne sont pas utilisées, des nombres de Péclet plus importants sont calculés. L'utilisation des gammes de paramètres de l'Andra n'indique pas de nombre de Peclet assez haut pour conclure à un transport convectif dominant.

Le deuxième calcul a été fait pour intégrer les fourchettes effectivement observées dans les paramètres de transport. Comme indiqué à la section 3.2.1.1, les plages de données pour certains paramètres ont été définies par l'Andra de façon plus étroite que la variabilité et l'incertitude observées. Les distributions de probabilité suivantes ont été modifiées à cet effet :

- Coefficients de diffusion des anions : distribution uniforme avec un minimum de $0,5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ et un maximum de $1,5 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$.

Les paramètres nouveaux suivants ont été introduits :

- Conductivité hydraulique horizontale (k_h) : distribution uniforme avec un minimum de $2 \times 10^{-14} \text{ m/s}$ et un maximum de 2×10^{-12} .
- Anisotropie de la perméabilité : distribution uniforme avec un minimum de 2 et un maximum de 4.

La conductivité hydraulique verticale a été calculée comme le rapport de la conductivité hydraulique horizontale et l'anisotropie.

Les résultats de cette analyse sont présentés dans la Figure 3-18. Les nombres de Péclet médian et moyen sont respectivement de 0,78 et 1,37. La dispersion des valeurs va de 0,014 à 16. Selon ce calcul, pour certains composants convectifs, 40 % de probabilité demeure mais maintenant il y a une probabilité de 1 % de transport convectif dominant.

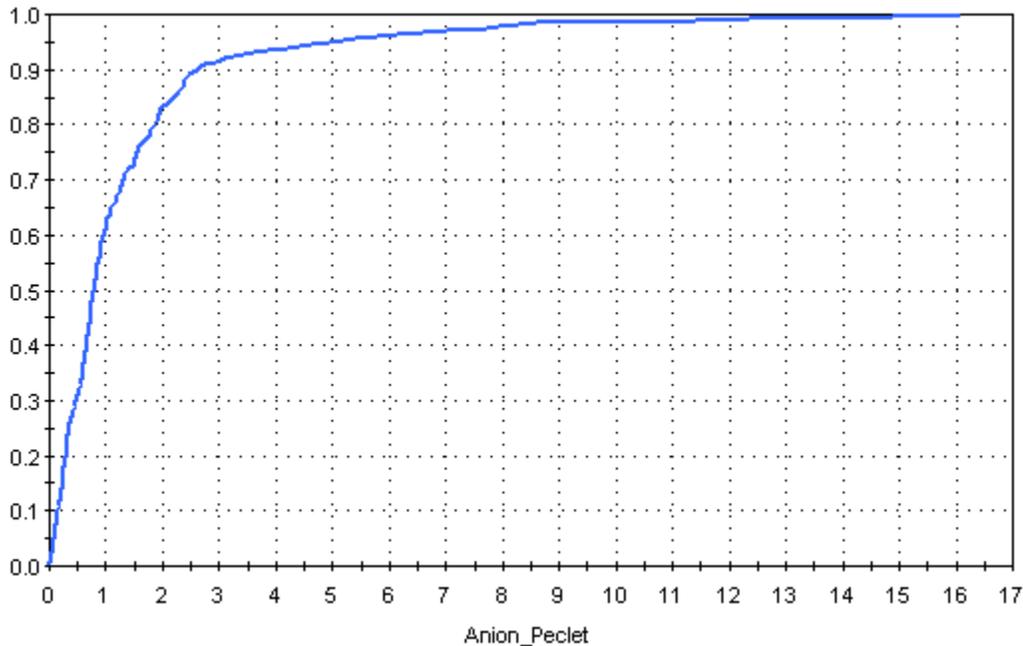


Figure 3-18. Nombre de Péclet avec les gammes des valeurs des paramètres observées (Source: E. Kalinina)

Une analyse de sensibilité a été faite en utilisant seulement la première série de calculs parce qu'elle représente des valeurs utilisées par l'Andra. Ainsi, une comparaison directe avec les analyses de l'Andra a pu être faite. Les résultats sont présentés dans la Figure 3-19. Sur la base de cette analyse, les principaux paramètres sont la diffusion effective et la conductivité hydraulique.

Tornado Sensitivity Chart - Analyzed Result: Anion_Peclet

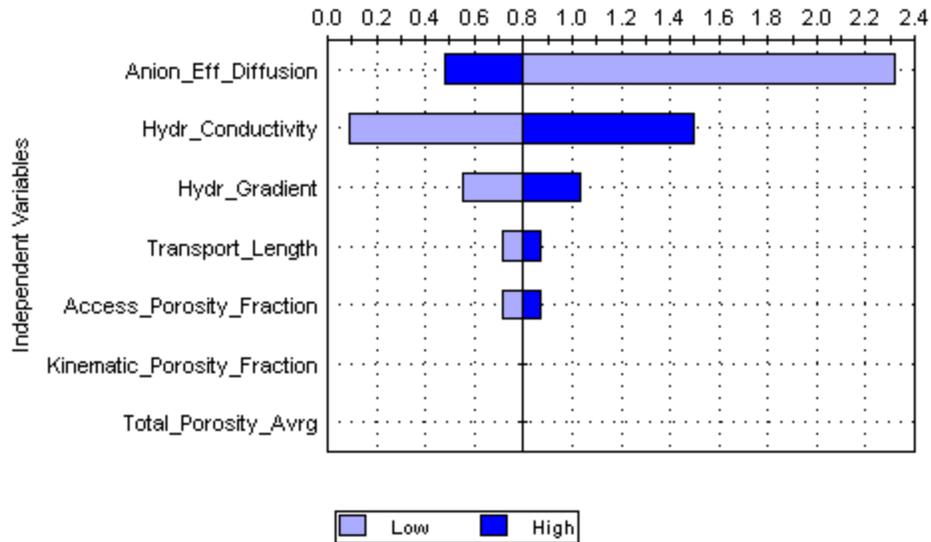


Figure 3-19. Graphe de sensibilité pour les paramètres d’entrée utilisés dans les calculs du nombre de Peclet (Source: E. Kalinina)

Le troisième calcul a été fait pour introduire différentes distributions de probabilité pour les principaux paramètres définis dans l'analyse de sensibilité. Une distribution de probabilité log-normale tronquée a été utilisée pour la conductivité hydraulique horizontale avec une moyenne de 5×10^{-13} m/s et les valeurs minimales et maximales sont les mêmes que dans la distribution uniforme définie dans le deuxième calcul. Une distribution normale tronquée a été utilisée pour le coefficient de diffusion effectif avec une moyenne de $5,0 \times 10^{-12}$ m²/s et les valeurs minimales et maximales sont les mêmes que dans la distribution uniforme définie dans le deuxième calcul. Les résultats sont présentés dans la Figure 3-20. Le nombre maximum de Péclet est nettement inférieur, mais la probabilité de la composante significative du transport convectif est encore de 25 %.

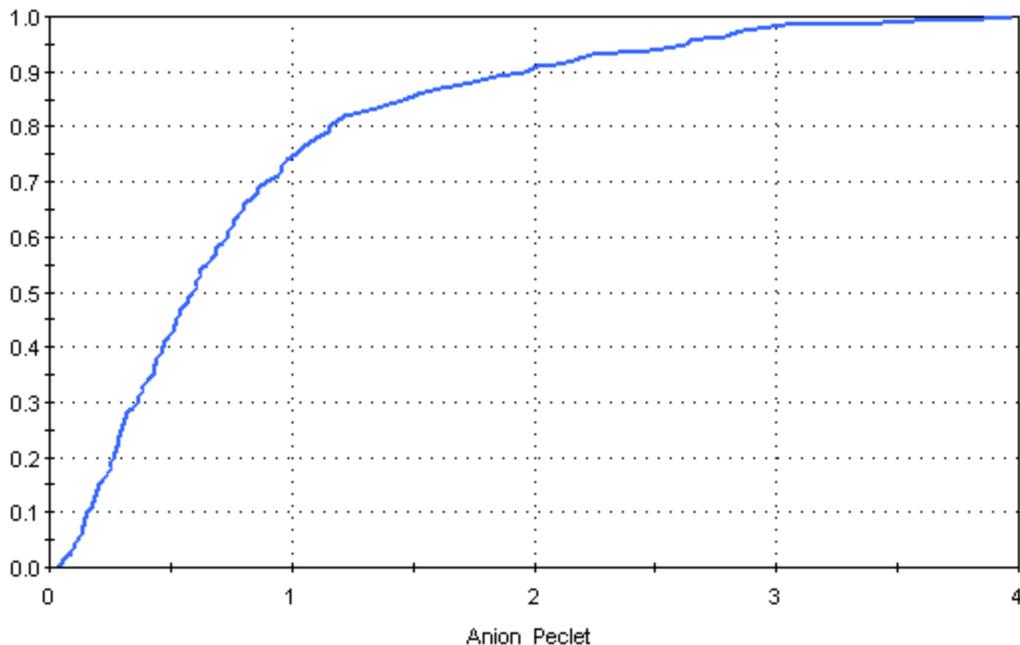


Figure 3-20. Fonction de la distribution de probabilités cumulées du nombre de Peclet pour une espèce anionique (Source: E. Kalinina)

3.2.1.2.2 Interprétation des données sur les traceurs naturels

L'Andra a consacré un effort important aux études des traceurs naturels dans la zone de transposition étant donné l'importance de ces données pour corroborer les résultats expérimentaux et en particulier pour identifier les mécanismes de transport majeurs dans la roche hôte représentatifs de l'échelle des temps géologiques. La répartition actuelle des traceurs naturels dans le Callovo-Oxfordien est le résultat des processus de transports à grande échelle qui ont eu lieu sur des millions d'années et ont affecté l'épaisseur globale de l'argilite. Par conséquent, ces données peuvent être utilisées pour estimer l'importance du transport par diffusion et convection à travers la roche hôte.

L'Andra a conclu que la distribution des traceurs naturels dans le Callovo-Oxfordien peut être expliquée par la diffusion seule. Cette conclusion a été utilisée comme une justification supplémentaire pour postuler que le transport diffusif dans la roche hôte était prédominant.

Le résumé de l'analyse des traceurs naturels est donné à la *Section 14.5 du Référentiel du Site 2010*.¹³⁵ Les détails peuvent être trouvés dans *Mazurek et al. 2009*. Ces données ont été examinées et les résultats de cet examen sont discutés ci-dessous. L'examen a porté sur les données sur le chlorure car ce dernier est un traceur conservatif et parce qu'il a été étudié dans un certain nombre d'expériences différentes sur le site.

Des ensembles de données relativement bons sur le chlorure sont disponibles pour les forages EST212 et HTM102. Ces données sont présentées dans les Figures 3-21 et 3-22.

¹³⁵ Référentiel du Site 2010, Tome 1 Section 14.5 (p. 511)

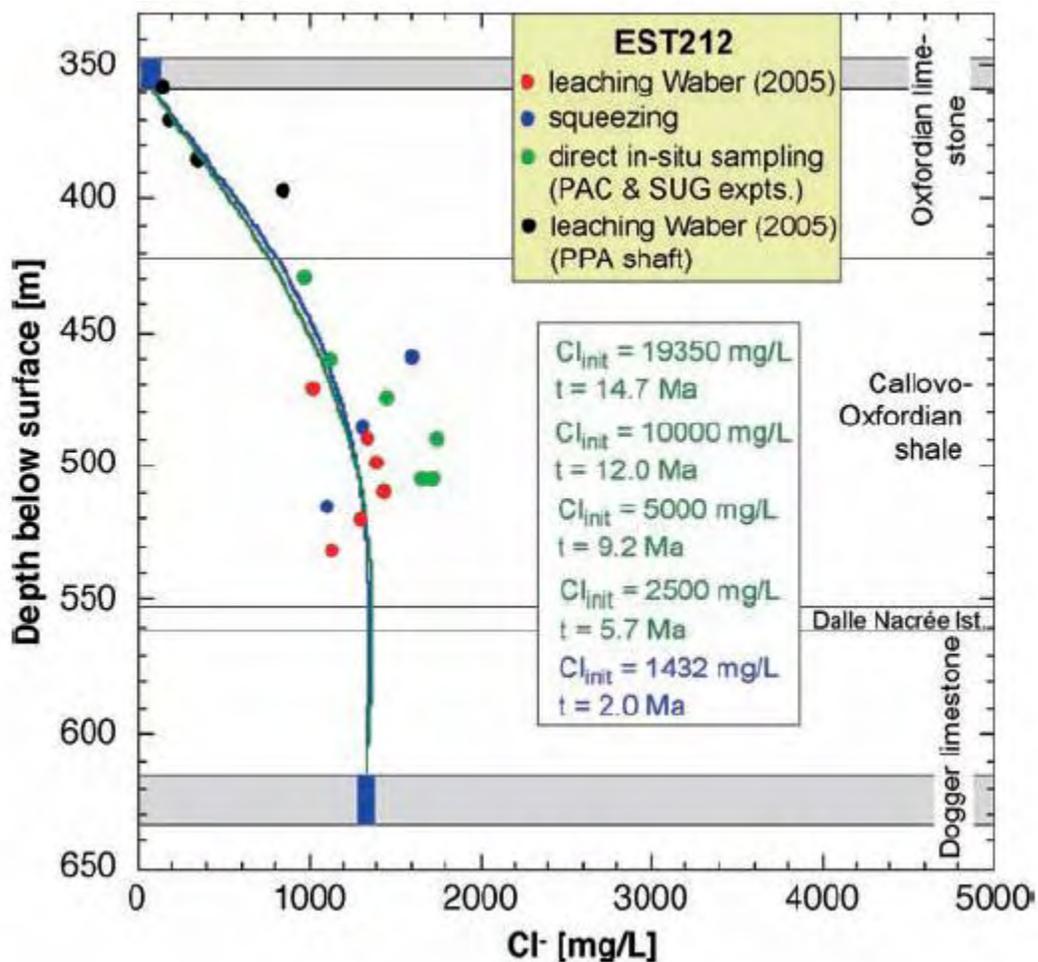


Figure 3-21. Modèle pour le Cl⁻ dans le forage EST212 sur le site du laboratoire souterrain de Bure en prenant en compte une concentration constante initiale en Cl⁻. (Source: Mazurek et al. 2009, Figure 5.1-2 (page 153))

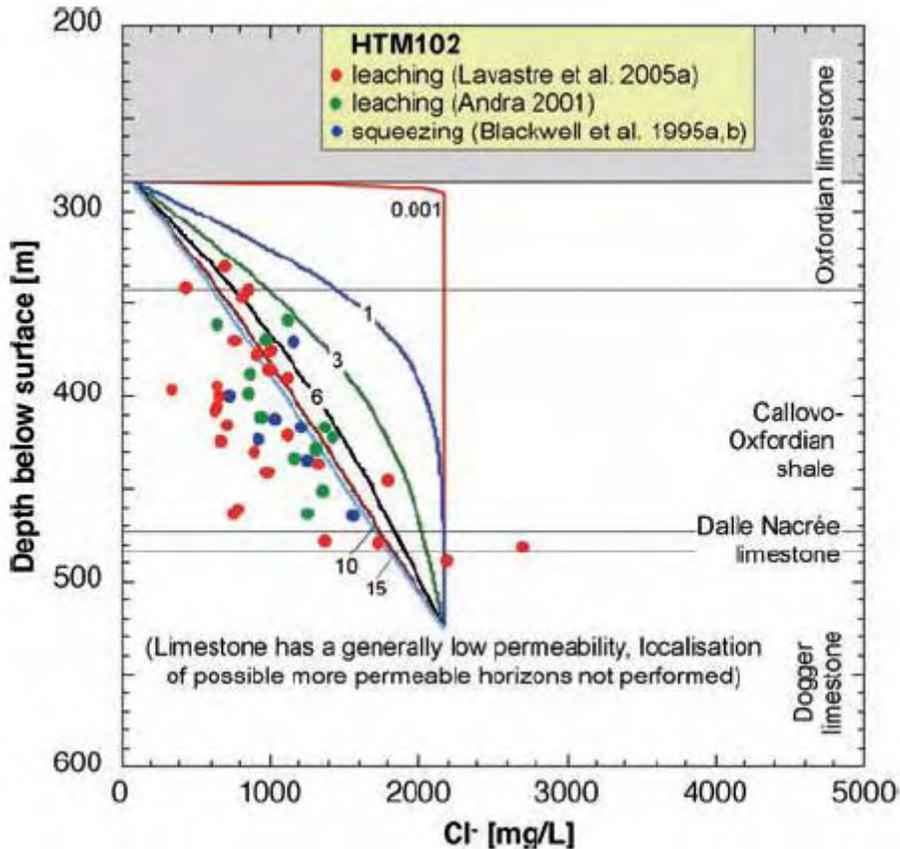


Figure 3-22. Détermination de la portée des modèles pour le Cl⁻ dans le forage HTM102, 3 km au sud-est du site du laboratoire souterrain de Bure. (Source: Mazurek et al. 2009, Figure 5.1-5 (page 155))

La principale stratégie de modélisation utilisée dans *Mazurek et al. 2009* pour l'interprétation de ces données a été la simulation du transport par diffusion transitoire dans le Callovo-Oxfordien avec des conditions aux limites de concentration fixes dans les formations de l'Oxfordien et du Dogger. Cette approche a deux incertitudes considérables. Premièrement, il faut les concentrations initiales comme entrées pour la modélisation et ces concentrations sont indéterminées. Deuxièmement, les concentrations observées sont comparées aux concentrations calculées à la fin du temps d'évolution, qui est inconnue. Comme souligné dans *Mazurek et al. 2009*

« En raison des connaissances limitées sur l'évolution paleo-hydrogéologique, une gamme de combinaisons de concentrations initiales en Cl⁻ et de temps d'évolution correspondent aussi bien aux données, et il est donc impossible de définir un scénario de base unique. »¹³⁶

Outre les incertitudes liées à cette approche, il y a une incertitude associée à une dispersion significative dans les données observées.

¹³⁶ Mazurek et al. 2009 p. 152

Un certain nombre de passe du programme de modélisation du scénario de référence avec les différentes conditions initiales et les différents temps d'évolution ont été réalisés pour les ajuster aux données observées sur la concentration en chlorure. Sur la base de ces essais il a été conclu que les données observées peuvent être ainsi bien reproduites en considérant que la diffusion est le seul processus de transport.¹³⁷

*Tous les scénarios de référence considèrent que la diffusion est le seul processus de transport uniquement, non pas par définition, mais du fait de l'observation que l'ajout de la convection n'améliore pas l'ajustement du modèle aux données.*¹³⁸

La conclusion suggère qu'un ajustement raisonnable des données peut être obtenu si la diffusion ainsi que la convection sont utilisées dans la simulation. La conclusion d'un flux diffusif n'est pas fautive, mais elle limite artificiellement et sans raison l'interprétation possible des données.

Une estimation d'un flux de convection est disponible pour le forage EST211. Les simulations pour ce forage ont été effectuées dans les deux cas : (1) diffusion seule et (2) diffusion et convection. Différentes vitesses de convection ont été utilisées dans le second cas. Ces simulations ont montré qu'un ajustement aussi bon peut être obtenu dans le premier cas et dans le second cas avec une vitesse ascendante convective égale à $1,1 \times 10^{-13}$ m/s en supposant une concentration de chlorure initiale de 2,15 g/L.¹³⁹ L'utilisation de la concentration plus élevée initiale (5 g/L) a montré que :

*[une] correspondance approximative peut être obtenue pour des flux de Darcy ascendants ou descendants de $2,0 \times 10^{-14}$ m/s, correspondant à une vitesse de convection de $2,2 \times 10^{-13}$ m/s dans le Callovo-Oxfordien, avec soit un temps d'évolution quelque peu supérieur (convection ascendante, 5,5 Ma) ou un peu plus faible (convection descendante, 5,0 Ma) par rapport à la diffusion pure (5,3 Ma).*¹⁴⁰

L'estimation suivante est donnée pour le flux convectif descendant :

*“ Pour la convection vers le bas, la définition de la vitesse maximale de convection qui est toujours en plein accord avec les données est difficile en raison de l'absence de données dessous le schiste du Callovo-Oxfordien et en raison de la valeur élevée inexplicite de Cl dans la Dalle Nacrée. Un flux correspondant à une vitesse de convection de $5,6 \times 10^{-12}$ m/s dans le Callovo-Oxfordien peut être provisoirement considéré comme un maximum, car l'ajustement devient pauvre dans les deux branches du profil à des vitesses plus élevées. »*¹⁴¹

D'après ces estimations, la vitesse du flux convectif est comprise entre $1,1 \times 10^{-13}$ m/s et $5,6 \times 10^{-12}$ m/s. En utilisant les données d'épaisseur (250 m) et de porosité accessible (0,05) de Mazurek et al. 2009, les nombres de Péclet résultant sont compris entre 0,27 (diffusion dominante) et 14,0

¹³⁷ Mazurek et al. 2009 Section 5.1.1 (pp. 151-155)

¹³⁸ Mazurek et al. 2009 p. 151

¹³⁹ Mazurek et al. 2009 Section 5.1.5 (pp. 162-164)

¹⁴⁰ Mazurek et al. 2009 p. 162

¹⁴¹ Mazurek et al. 2009 p. 162

(convection dominante). Cette conclusion n'est pas en accord avec l'hypothèse de la diffusion dominante. Cela confirme que les propriétés de transport de la roche hôte sont hétérogènes et, à certains endroits le transport par diffusion peut être dominant tandis qu'à d'autres endroits, la composante convective du transport peut être comparable ou supérieure à la composante diffusive.

Il faut noter que l'Andra fait l'hypothèse¹⁴² que la vitesse de Darcy est de quelques cm sur 100 000 ans. Supposons que quelques cm équivalent à 3 cm. Par conséquent, la vitesse de convection est de $1,05 \times 10^{-13}$ m/s (la vitesse de Darcy divisée par la porosité cinématique). Il faudra donc à un contaminant $1,8 \times 10^7$ ans pour atteindre le sommet de la formation du Callovo-Oxfordien. Maintenant, considérons la vitesse de convection de $5,6 \times 10^{-12}$ m/s, la limite supérieure déduite des données sur les traceurs naturels. Dans ce cas il faudra 339 750 ans au contaminant pour atteindre le sommet de la formation du Callovo-Oxfordien. Ce temps est comparable à celui où le flux de diffusion prévu au toit de la roche hôte atteint sa valeur maximale (180 000 ans à 465 000 ans).¹⁴³ Par conséquent, étant donné les données mesurées l'affirmation de l'Andra est optimiste.

Une autre approche peut être considérée pour laquelle les données sur le chlorure sont simulées. Cette approche suppose que les profils observés pour le chlorure sont des profils d'équilibre dans lesquels la convection et la diffusion se manifestent. Cette approche ne fait pas appel à la connaissance des conditions initiales et du temps d'évolution. Il faut noter que la conclusion suivante a été faite dans *Mazurek et al. 2009* en ce qui concerne les simulations de situations transitoires :

« Des ajustements de modèles bons ou presque identiques peuvent être obtenus pour une série de teneurs en Cl- initiales et de temps d'évolution. »¹⁴⁴

L'indépendance par rapport aux conditions initiales et au temps d'évolution est une indication de la proximité par rapport aux conditions d'équilibre (ou état stable).

L'équation unidimensionnelle suivante sur le transport convectif-diffusif en état d'équilibre dans un milieu homogène et isotrope a été prise en compte :

$$D_p \frac{d^2C}{dz^2} - v \frac{dC}{dz} = 0 \quad (2)^{145}$$

Les conditions aux limites supérieure et inférieure ont été définies comme suit :

$$C=C_0 \text{ à } z=0 \text{ et } C=C_1 \text{ à } z=L \quad (3)^{146}$$

où

L est la distance entre les limites supérieure et inférieure,

¹⁴² Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 175

¹⁴³ Dossier 2005 Argile, Sûreté Tableau 5.5-4 (p. 300)

¹⁴⁴ Mazurek et al. 2009 p. 165

¹⁴⁵ Williams 2006 Equation 1.49 (p. 22)

¹⁴⁶ Williams 2006 Equations 1.54 et 1.55 (p. 23)

v est la vitesse verticale convective et
 D_p est le coefficient de diffusion dans les pores.

L'équation (2) avec des conditions aux limites (3) a la solution analytique suivante :

$$\frac{C-C_0}{C_1-C_0} = \frac{\exp(\bar{v}_z \bar{z})-1}{\exp(\bar{v}_z)-1}, \quad \bar{v}_z = \frac{Lv}{D_p}, \quad \bar{z} = \frac{z}{L} \quad (4)$$

Comme on peut le voir dans l'Equation (4), le seul paramètre qui peut être estimé à partir des données de concentration à l'état d'équilibre est le ratio entre la vitesse convective et le coefficient de diffusion dans les pores. Plus ce ratio est élevé, plus un effet de « courbe » est observé. Le rapport positif correspond à la convection descendante et le ratio négatif correspond à la convection ascendante. En l'absence de transport convectif (profil d'équilibre par diffusion) les concentrations sont représentées par une ligne droite.

Cette approche a été utilisée pour interpréter les données des forages EST212 et HTM102. Les résultats sont présentés dans les Figures 3-23 et 3-24.

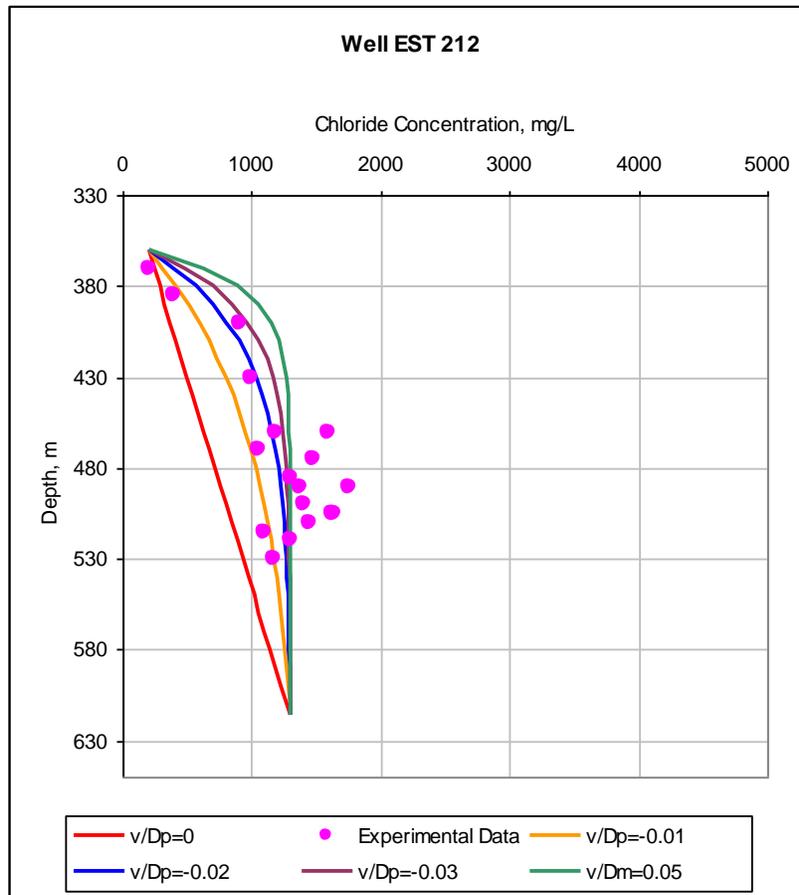


Figure 3-23. Calculs des concentrations de chlorure pour les rapports entre les différentes vitesses de transport convectif et la diffusion porale comparés aux données expérimentales (Source: E. Kalinina)

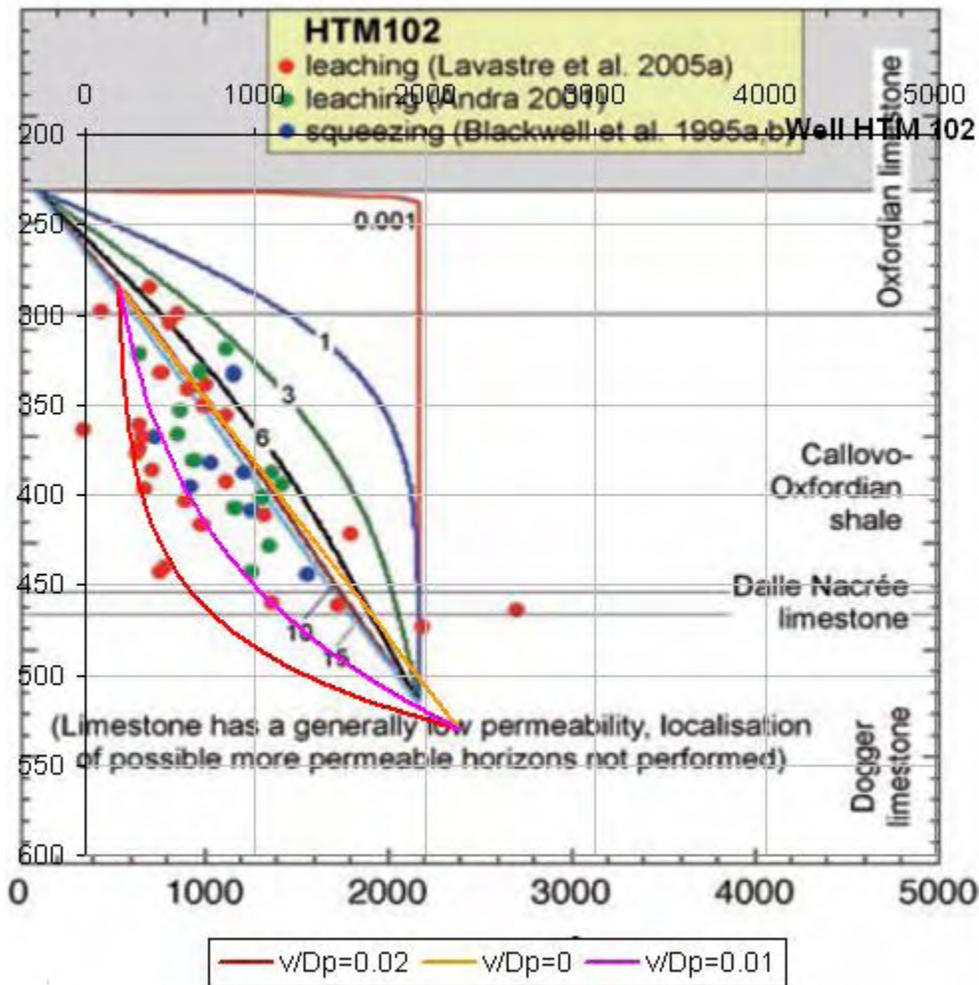


Figure 3-24. Calculs des teneurs en chlorure pour les différents ratios entre les vitesses de transport convectif vertical (v) et les coefficients de diffusion porale (D_p). Tracé sur la Figure 5.1-5 de Mazurek et al. 2009 (p. 155) (Source: E. Kalinina)

Quelques profils d'équilibre avec les différentes valeurs de v/D_p ont été calculés pour chaque forage. En raison de la dispersion des données sur la concentration, la sélection du « meilleur ajustement » est très subjective. Le ratio de -0,02 a été sélectionné pour le forage EST212 et le ratio de 0,01 a été choisi pour le forage HTM102, même si d'autres interprétations sont également possibles.

La vitesse de convection et la conductivité hydraulique peuvent être déduites du ratio v/D_p si les données sur la diffusion efficace, la porosité accessible aux ions, la porosité cinématique, et le gradient vertical hydraulique sont disponibles. La majorité de ces données sont disponibles pour le forage EST212. La diffusion effective moyenne et la porosité accessible pour ce forage sont comprises entre $6,1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ et $0,1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ respectivement.¹⁴⁷ La porosité cinématique et la

¹⁴⁷ Référentiel du Site 2010, Tome 1 Tableau 14-8 (p. 496)

porosité accessible peuvent être considérées comme équivalentes. Le gradient hydraulique a été fixé à 0,2 m/m. Sur la base de ces données, la vitesse de convection est de 6×10^{-13} m/s et la conductivité hydraulique est de 3×10^{-13} m/s. La valeur de la conductivité hydraulique se trouve dans la fourchette des données de conductivité hydraulique obtenues pour ce forage: 5×10^{-14} m/s à 4×10^{-13} m/s.¹⁴⁸

Aucune donnée spécifique pour le forage HTM102 n'est disponible. La diffusion effective moyenne, la porosité accessible aux ions, et les valeurs de porosité cinématique utilisées sont de $5,0 \times 10^{-12}$ m²/s, 0,05, et 0,09 respectivement. Le gradient hydraulique a été fixé à 0,2 m/m. Sur la base de ces données, la vitesse de convection est de 1×10^{-12} m/s et la conductivité hydraulique est de $4,5 \times 10^{-13}$ m/s. La gamme des conductivités hydrauliques dans le forage HTM102 est comprise entre 4×10^{-13} m/s et 8×10^{-12} m/s (Figure 3-10).¹⁴⁹ Les valeurs les plus basses sont les plus probables en raison des conditions perturbées de ce test.

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.

3.2.2 Formations encaissantes

Les flux de contaminants qui quittent la roche hôte en haut ou en bas sont transportés dans les formations encaissantes jusqu'aux exutoires (puits d'eau). Les formations sus-jacentes comprennent des roches carbonatées des formations de l'Oxfordien, du Kimméridgien et du Barrois. La formation sous-jacente est composée des roches carbonatées du Dogger.

Les formations carbonatées sont très hétérogènes. Les intervalles avec la plus grande perméabilité sont considérés comme les zones de transport convectif. Par exemple, il y a 2 intervalles de perméabilité plus élevée (aussi appelés horizons poreux) dans la formation de l'Oxfordien. Celui du bas a une épaisseur moyenne de 50 m et celui du haut de 5 m. Un intervalle de 5 m d'épaisseur de plus grande perméabilité est pris en compte dans la formation du Dogger. L'Andra émet l'hypothèse que :

*dans l'Oxfordien carbonaté et le Dogger, les écoulements d'eau sont horizontaux. Compte tenu des perméabilités de certains niveaux de ces formations (10^{-9} m/s à 10^{-8} m/s en moyenne), le transport des solutés s'y effectue essentiellement par convection.*¹⁵⁰

La formation du Kimméridgien est considérée comme une zone de transport par diffusion en raison de sa faible perméabilité. La formation du Barrois est divisée en deux zones. La zone supérieure a une perméabilité élevée, car elle est proche de la surface et est affectée par les processus karstiques.

¹⁴⁸ Référentiel du Site 2010, Tome 1 Figure 15-19 (p. 542)

¹⁴⁹ Référentiel du Site 2010, Tome 1 Figure 15-21 (p. 544)

¹⁵⁰ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 175

Il est raisonnable de supposer que la majorité des transports dans les formations encaissantes se feront avec le flux convectif dans les intervalles présentant une plus grande perméabilité. En raison de la perméabilité relativement élevée, le temps de transport vers les exutoires sera beaucoup plus court que celui au sein de la roche hôte. Par conséquent, les propriétés de transport dans ces formations ne sont importantes que parce qu'elles définissent les voies d'écoulement depuis l'emprise du stockage au-dessus et en-dessous de la roche hôte jusqu'aux exutoires plutôt que d'un retard supplémentaire significatif qu'elles imposeraient avant que les contaminants n'atteignent l'environnement humain

Lorsque les voies d'écoulement s'orientent vers différents endroits, la masse des contaminants est partagée entre ces points et la dose totale est « dispersée ».¹⁵¹ Voir Figure 3-25 ci-dessous. Dans le cas où toutes les voies d'écoulement s'orientent vers le même endroit¹⁵² la masse entière des contaminants est capturée à un unique point d'exposition, aboutissant à un plus grand impact radiologique.

Les modèles hydrogéologiques détaillés des formations encaissantes sont nécessaires pour développer les champs d'écoulement correspondants. Ces champs d'écoulement peuvent être utilisés pour délimiter les voies d'écoulement. Les trajets d'écoulement seront différents pour les différents endroits dans la zone de transposition et la ZIRA.¹⁵³

Comme on l'a souligné à la section 3.1, un effort important serait nécessaire pour examiner les modèles hydrogéologiques des formations adjacentes et les données connexes. En raison de la moindre importance de ces formations pour l'évaluation de l'impact radiologique, cet examen n'a pas été mené. Une approche prenant en compte de manière simplifiée le transport convectif dans la formation de l'Oxfordien est présentée dans la section 3.2.3.2 pour vérifier la crédibilité de l'hypothèse de l'« importance moindre ».

3.2.3 Analyse de l'évaluation de sûreté

L'approche adoptée par l'Andra pour l'analyse de l'évaluation de sûreté est résumée dans la Section 3.2.3.1. L'évaluation de cette approche est considérée dans la section 3.2.3.2.

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

L'évaluation de sûreté repose sur la connaissance des propriétés et des processus affectant le comportement des différentes composantes du site de stockage. Sur la base de ces connaissances acquises, les performances du milieu naturel (barrière géologique) et des ouvrages d'ingénierie (barrières ouvragées) sont analysées et comparées aux objectifs de sûreté à long terme. L'objectif de la sûreté à long terme est exprimé sous la forme d'un impact radiologique. Selon les prescriptions de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) et les

¹⁵¹ Dossier 2005 Argile, Sûreté Figure 5.5-16 (p. 312) est un exemple.

¹⁵² Dossier 2005 Argile, Sûreté Figure 5.5-74 (p. 365).

¹⁵³ Dossier 2005 Argile, Sûreté Figures 5.5-16 (p. 312) et 5.5-74 (p. 365)

recommandations de la Règle fondamentale de sûreté RFS III.2.f, ¹⁵⁴ l'impact radiologique est mesuré à partir du calcul de la dose individuelle engagée pour le groupe critique.

La conclusion de l'Andra, basée sur l'évaluation de sûreté, est qu'à long terme, les performances du stockage sont principalement définies par celles de la barrière géologique et de ses composantes. Les propriétés de la barrière géologique et les processus au sein de la zone de transposition ont été discutés aux sections 3.2.1 et 3.2.2. Cette section examine comment ces propriétés et processus, et leurs incertitudes associées ont été propagés dans le modèle d'évaluation de sûreté.

L'Andra a adopté la démarche générale suivante pour l'évaluation de sûreté.

- L'évolution du stockage est considérée dans un contexte de scénario : *« Ce scénario constitue la base d'une évaluation quantifiée au moyen de calculs de sûreté. »*¹⁵⁵
- L'Andra définit le scénario comme un ensemble de conditions *« qui ne prétend pas représenter la réalité telle qu'elle se déroulera, mais entend englober l'éventail de situations probables susceptibles de se produire, avec l'assurance qu'il constitue une vision conservatrice, voire pénalisante. »*¹⁵⁶
- Deux types de scénarios ont été envisagés. Le scénario d'évolution normale représente *« la situation jugée la plus probable ou reflétant un comportement du stockage conforme à ce qui est attendu par ses concepteurs. »*¹⁵⁷ Une dose de 0,25 mSv par an est adoptée comme une valeur seuil de référence dans ce scénario. Seuls les processus dont l'incidence est notable sur les performances du stockage sont inclus dans ce scénario. Ces processus sont choisis en fonction des résultats des études préalables aux calculs de sûreté. Le scénario d'évolution normale *« est bâti de telle sorte qu'en situation normale, le devenir du stockage engendre un impact inférieur à celui évalué par ce scénario. »*¹⁵⁸
- Les scénarios altérés représentent les conditions correspondant à des situations hautement improbables. L'impact calculé est considéré comme une valeur absolue ainsi qu'en termes de probabilité du scénario et du caractère chronique ou ponctuel des expositions. La dose supérieure à la norme de 0,25 mSv/an est considérée comme acceptable du fait de sa faible probabilité.¹⁵⁹
- Les effets radioactifs ont été évalués à des emplacements (exutoires) *« où la radioactivité peut atteindre l'environnement. »*¹⁶⁰ Dans la définition des exutoires, il est supposé que le transport de la radioactivité se fait principalement par l'intermédiaire de l'eau. Par conséquent, ces exutoires peuvent consister en des rivières, des aquifères, ou des puits. Ces exutoires ont été définis sur la base de l'analyse de l'évolution du milieu géologique et des voies de transfert de la radioactivité provenant du stockage.
- Les incertitudes possibles en ce qui concerne la représentation des processus ou des valeurs de paramètres physiques ont été examinées par le biais d'analyses de sensibilité. Un certain nombre de ces analyses ont été effectuées sur le modèle de sûreté pour tester

¹⁵⁴ RFS III.2.f

¹⁵⁵ Dossier 2005 Argile, Synthèse Section 2.1 (p. 188)

¹⁵⁶ Dossier 2005 Argile, Synthèse Section 2.1 (p. 188)

¹⁵⁷ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 190 dans la Section 2.1.2

¹⁵⁸ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 191 dans la Section 2.1.3

¹⁵⁹ Dossier 2005 Argile, Synthèse Section 2.1.2

¹⁶⁰ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 190 dans la Section 2.1.2

les jeux de paramètres ou des modèles différents de ceux choisis comme les plus représentatifs.¹⁶¹

- Dans les analyses de sensibilité, les modèles et les paramètres qui traduisent le mieux la réalité physique ont été distingués de ceux destinés à fournir des résultats « pessimistes » ou « pénalisants » en fonction du degré de conservatisme. Les deux valeurs extrêmes pour certains paramètres, correspondant à des situations très pénalisantes et des valeurs favorables ont été étudiées. D'après l'Andra, la finalité des analyses de sensibilité était d'évaluer l'importance respective des différents paramètres et « *de mesurer l'impact de ces variations et de préciser s'il y a matière à une étude plus approfondie, soit pour gagner des marges de sûreté, soit pour réduire encore certaines incertitudes.* »¹⁶²

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).

Le scénario d'évolution normale met en œuvre le comportement attendu de tous les systèmes via l'examen des principaux processus liés au relâchement de radionucléides à partir de la forme des déchets, leur transport dans la barrière ouvragée (composants du stockage) et dans la roche hôte et les formations encaissantes, et leur relâchement aux exutoires en supposant les valeurs (moyennes) attendues pour les paramètres de modélisation.

L'impact radiologique est évalué sous la forme d'une dose totale maximale à un groupe critique calculée sur une période de un million d'années sur la base des concentrations de radionucléides dans l'eau aux endroits d'exposition et des paramètres d'exposition prévus (par exemple, taux d'ingestion d'eau potable et autres). Le groupe critique dans ce scénario est défini comme suit : « *un groupe d'agriculteurs vivant pour l'essentiel de ses propres productions et buvant l'eau de son propre puits : eau de boisson, irrigation d'un jardin potager, abreuvement et élevage des animaux à partir de sa propre production de céréales.*¹⁶³ *Les individus sont tous soumis à une concentration uniforme, soit directement dans leur eau de boisson, soit au travers des aliments contaminés qu'ils peuvent consommer.* »¹⁶⁴

L'exposition est supposée intervenir via les eaux souterraines contaminées. Les eaux souterraines contaminées proviennent de puits installés dans les intervalles des roches carbonatées avec une conductivité hydraulique plus élevée (horizons poreux) dans les formations encaissantes. Le puits est utilisé par un membre du groupe critique pour une utilisation agricole ou la boisson. Les puits sont placés le plus près possible du site de stockage classique dans les zones à faibles

¹⁶¹ Dossier 2005 Argile, Synthèse Section 2.1.3

¹⁶² Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 192 dans la Section 2.1.3

¹⁶³ Dossier 2005 Argile, Sûreté p. 271

¹⁶⁴ Dossier 2005 Argile, Sûreté p. 265

débits, et dans la plupart des cas à des profondeurs d'environ 50 à 100 mètres. Conformément à la Règle fondamentale de sûreté RFS III.2.f, on a supposé que le comportement humain à l'avenir sera généralement le même que celui d'aujourd'hui (par exemple, les paramètres d'exposition comme les taux d'ingestion d'eau et de nourriture ainsi que les genres de nourriture demeurent les mêmes sur une période d'un million années).

Lors de la rencontre entre l'Andra et l'IEER, le 16 février 2011, l'Andra a apporté une clarification au sujet des lieux d'exposition pris en compte dans le scénario d'évolution normale. L'interprétation initiale de l'IEER expliquée ci-dessus était que l'Andra avait envisagé l'utilisation des eaux souterraines. A la suite de l'explication de l'Andra, il est devenu clair (et confirmé par l'Andra) que l'utilisation des eaux souterraines a été exclue de l'analyse de sûreté. Seules les eaux souterraines qui ressortent dans des endroits spécifiques ont été envisagées. Par conséquent, les doses estimées ne prennent pas en compte la situation dans laquelle un membre d'un groupe critique pourrait creuser un puits et puiserait de l'eau souterraine de l'aquifère supérieur. La prise en compte de l'utilisation des eaux souterraines augmenterait de manière significative les estimations de doses.

Deux situations ont été envisagées pour le milieu géologique. La première situation représente l'état actuel du milieu géologique avec les flux correspondants dans les différentes formations (modèle actuel). Le deuxième modèle représente l'état prédit du milieu géologique dans un million d'années (modèle à un million d'années). On a supposé que le principal facteur qui influe sur les conditions hydrogéologiques dans un million d'années est l'érosion de surface. En conséquence, la principale différence entre les deux modèles est dans les flux simulés dans les formations carbonatées situées au-dessus des argilites du Callovo-Oxfordien. Un ensemble de voies d'écoulement potentielles dans les aquifères carbonatés supérieurs à partir du stockage jusqu'aux points d'exposition a été défini pour chacun des deux modèles. Il est à remarquer que ces modifications n'affectent pas l'écoulement dans l'aquifère du Dogger, qui reste le même dans les deux cas.

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.

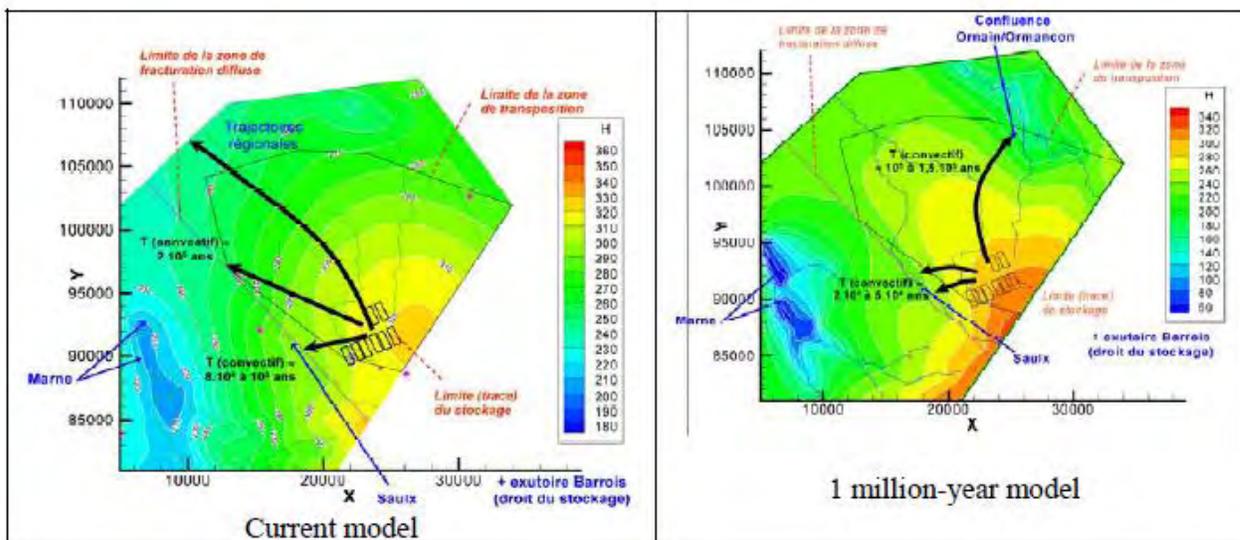


Figure 3-25. Résultats de l'analyse de sensibilité du scénario d'évolution normale: Conditions hydrogéologiques actuelles et conditions dans un million d'années (Source: Dossier 2005 Argile, Sûreté Figure 5.5-16 (p. 312))

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 Ormain 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).

Le même exutoire de puits conventionnel à proximité de la vallée de la Saulx a été choisi comme lieu d'exposition dans l'aquifère du Dogger dans les deux modèles.

Les concentrations de contaminants dans les formations encaissantes supérieures et inférieures ont été calculées sur la base des flux de contaminants issus du haut et du bas des argilites du Callovo-Oxfordien. Ces flux de contaminants ont été calculés à partir d'une simulation des relâchements de radionucléides des colis de déchets et de leur transport au sein des ouvrages et des argilites saines.

Un scénario distinct a été pris en considération pour chaque colis de référence (C, B, et CU). Chaque scénario intègre un inventaire de colis spécifique, un modèle de relâchement des contaminants, et des conditions thermiques et chimiques en champ proche. La dose maximale totale a été calculée pour tous les colis de déchets C, tous les colis de déchets B, et tous les colis de combustibles usés (CU).

L'Andra a tiré les conclusions suivantes à partir des résultats obtenus de la simulation du scénario d'évolution normale.

- « Les perturbations hydrauliques induites par le stockage restent limitées au stockage lui-même et au Callovo-Oxfordien du fait de sa faible perméabilité. Elles disparaissent

au-delà de 100 000 ans environ et un nouvel état d'équilibre hydraulique s'instaure alors dans le stockage et le Callovo-Oxfordien. »¹⁶⁵

- *« Après resaturation totale du stockage, [...] verticalement, le stockage draine une faible part des écoulements au travers du Callovo-Oxfordien : un écoulement d'eau s'organise le long des ouvrages du stockage et des puits (quelques dizaines à centaines de litres par an), très insuffisant pour entraîner des solutés par convection. La diffusion est le mécanisme de transport dominant des solutés (en particulier des radionucléides) et tout se passe comme à l'état initial avant réalisation du stockage. »¹⁶⁶*
- *Comme le stockage est situé « au milieu du Callovo-Oxfordien, la répartition entre les flux ascendants et descendants est à peu près équivalente. »¹⁶⁷*
- *« ... la majorité de la masse emprunte la voie de transfert du Callovo-Oxfordien qui est ainsi le milieu de transfert privilégié. »¹⁶⁸*
- *« la formation hôte, qui est a priori le contributeur principal de la fonction « retarder et atténuer la migration des radionucléides »¹⁶⁹*
- *“seuls quatre éléments (iode 129, chlore 36 et sélénium 79 et calcium 41) présentent encore un flux au toit du Callovo-Oxfordien. Le calcium 41 et le sélénium 79 sont cependant déjà très fortement atténués, ”¹⁷⁰*
- *« parmi les quatre éléments précédents, seuls l'iode et le chlore ont des coefficients d'atténuation plus modestes : 65 à 75% pour le chlore, 20 à 50% pour l'iode. »¹⁷¹*
- *“Après la sortie de la formation argileuse, les éléments non atténués pénètrent dans les encaissants (Oxfordien au-dessus, Dogger en dessous). Le modèle hydrogéologique permet d'évaluer les temps de transfert vers les différents exutoires. Ces temps de transferts sont courts au regard de ceux au sein de la formation géologique (de l'ordre de 50 000 ans pour le modèle à un million d'années, 100 000 ans pour le modèle actuel, pour l'exutoire le plus proche de la Saulx qui est le plus pénalisant). »¹⁷²*
- *« dans l'Oxfordien carbonaté et le Dogger, les écoulements d'eau sont horizontaux. Compte tenu des perméabilités de certains niveaux de ces formations (10-9 m/s à 10-8 m/s en moyenne), le transport des solutés s'y effectue essentiellement par convection. »¹⁷³*
- *Les temps caractéristiques de migration par convection dans l'Oxfordien calcaire jusqu'à cet exutoire sont en effet courts devant les temps de migration dans la formation hôte, de sorte qu'ils n'amènent pas de décalage significatif complémentaire à l'apparition du maximum de dose. »¹⁷⁴*
- *Dans le Dogger, les radionucléides progressent horizontalement vers l'Ouest-Sud-Ouest à très faible vitesse, jusqu'à des distances de quelques kilomètres à l'échelle du million d'années. »¹⁷⁵*

¹⁶⁵ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 175

¹⁶⁶ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 177

¹⁶⁷ Dossier 2005 Argile, Sûreté p. 297

¹⁶⁸ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 210

¹⁶⁹ Dossier 2005 Argile, Sûreté p. 297

¹⁷⁰ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 212

¹⁷¹ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 212

¹⁷² Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 212

¹⁷³ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 175

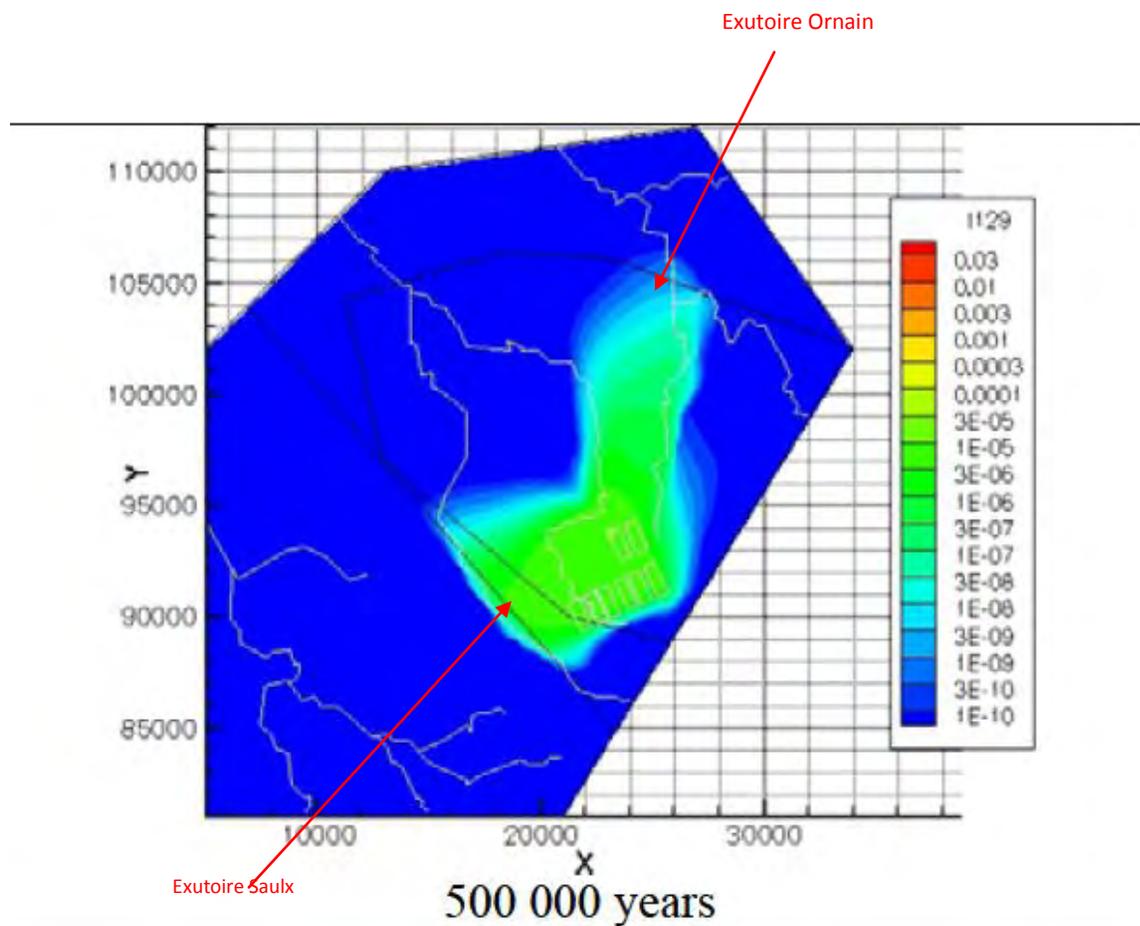
¹⁷⁴ Dossier 2005 Argile, Sûreté p. 313

¹⁷⁵ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 187

- “Dans le Dogger, (voir exemple à la Figure 5.5-15) l’essentiel de la masse migre par diffusion vers le bas. L’analyse des débits molaires montre que 0,03 % de la masse transite dans la couche de plus forte perméabilité (10^{-8} m/s) jusqu’au niveau de l’exutoire conventionnel. Cette couche transmissive présente une épaisseur trop faible (5 mètres) par rapport à ses encaissants immédiats (Dogger terminal et basal) de plus faible perméabilité (10^{-10} m/s) pour constituer un drain préférentiel des radionucléides.¹⁷⁶
- “Les contributeurs essentiels à la dose sont l’iode 129, le chlore 36 et le sélénium 79. »¹⁷⁷

Les résultats de l’analyse de sûreté pour le modèle dans un million d’années sont présentés dans le *Dossier 2005 Argile, Sûreté*, Tableaux 5.5.-8 (exutoire de la Saulx) et 5.5-9 (autres exutoires). Les doses maximales totales estimées à l’exutoire de la Saulx sont significativement plus élevées qu’aux deux autres exutoires. Elles sont de 0,00047 mSv/an (total des déchets B), 0,00083 mSv/an (total des déchets C), et 0,02 mSv/an (total du combustible utilisé).

Un panache de contamination d’iode 129, à un moment où la concentration est proche de la concentration maximale, est représenté dans la Figure 3-26.



¹⁷⁶ Dossier 2005 Argile, Sûreté pp. 310-311

¹⁷⁷ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 213

Figure 3-26. SEN Panache de concentration molaire de l'I 129 dans 500 000 ans. (Source: Dossier 2005 Argile Sûreté figure de gauche de la Figure 5.5-13 (p. 309))
Note: Les exutoires Ornain et Saulx ont été ajoutés à cette figure.

Dans la Figure 3-26 on peut voir que les deux principaux exutoires sont situés à la bordure du panache de contamination. Nous remarquons que : «*Les exutoires sont représentés par des pompages d'exploitation d'eau au niveau desquels un individu du groupe critique collecte de l'eau contaminée en radionucléides pour ses besoins en eau de boisson ou son exploitation agricole*». ¹⁷⁸ Ce sont deux emplacements possibles pour ces exutoires. Actuellement l'eau souterraine n'est pas pompée à ces emplacements. L'Andra n'a pas envisagé une possibilité d'emplacement dans le panache de contamination, Les analyses de sensibilité ont abordé les modèles de relâchement des déchets, les paramètres des barrières ouvragées et les paramètres de la barrière géologique. Comme il a été expliqué ci-dessus, l'Andra a fourni des éclaircissements supplémentaires concernant le lieu d'exposition. La nouvelle interprétation proposée par l'Andra a donné lieu à des inquiétudes encore plus grandes. Ces inquiétudes, comme expliqué ci-dessus 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.

Les analyses de sensibilité des modèles prennent en compte les modèles de relâchement des déchets, les paramètres des barrières ouvragées, et les paramètres de la barrière géologique.

La principale conclusion des analyses de sensibilité de l'Andra sur le relâchement des déchets et les barrières ouvragées est que les impacts potentiels, en prenant des modèles et des paramètres pénalisants, sont très petits.

Les analyses de sensibilité liées à la barrière géologique ont pris en compte les paramètres caractérisant les argilites du Callovo-Oxfordien et les paramètres et les modèles hydrogéologiques des formations encaissantes. L'analyse de sensibilité des propriétés de l'argilite a traité les scénarios suivants :

1. Perméabilité du Callovo-Oxfordien conservatrice (supérieure d'un facteur 10)
2. Paramètres de transfert et de rétention du Callovo-Oxfordien pénalisants : sorption, diffusion et limite de solubilité pour le Callovo-Oxfordien
3. Épaisseur moins conservatrice de 160 m pour les argilites
4. Coefficient de partage de l'iode de 10^{-3} m³/kg (la valeur retenue est zéro)
5. Coefficients de diffusion plus petit des couches à faible perméabilité des formations sus-jacentes.
6. Différentes voies d'écoulement dans les formations sus-jacentes

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

¹⁷⁸ Dossier 2005 Argile, Sûreté p. 263

probabiliste, avec des distributions de paramètres entièrement représentées et variant simultanément dans des tirs de la méthode Monte Carlo n'a pas été réalisée.

L'Andra est arrivée aux conclusions suivantes à partir des analyses ayant pris en compte des paramètres pénalisants, c'est-à-dire, selon elle, des paramètres qui donneraient des estimations de dose plus élevées :

- Dans le cas de la plus grande perméabilité des argilites, les flux sortant de la roche hôte augmentent d'un facteur 2. « *Ce résultat s'explique par le fait que le régime de transport reste diffusif ou co-dominant diffusif - convectif. Cette étude confirme que le caractère dominant de la diffusion dans le Callovo-Oxfordien n'est pas drastiquement sensible à la perméabilité de la formation hôte (voir Figure 5.5-34), tant qu'elle demeure dans des valeurs inférieures à 10^{-12} m/s.* »¹⁷⁹
- Dans le cas des paramètres de rétention conservatrice « *Une dégradation des propriétés de rétention de l'argile modifie partiellement la liste des radionucléides atténués par la formation, mais n'entraîne pas d'évolution majeure de la dose à l'exutoire.* »¹⁸⁰ En ce qui concerne la dose totale maximale « *pour les combustibles usés (CU1) qui sont ceux dont l'impact est le plus fort, le maximum de dose à l'exutoire Saulx vaut environ 0,04 mSv/an dans le modèle à 1 million d'années comme dans le modèle actuel.* »¹⁸¹ C'est 2 fois plus élevé que dans les calculs de référence.
- Dans le cas des coefficients de diffusion inférieurs des couches à faible perméabilité des formations sus-jacentes « *La dose maximale aux exutoires Saulx et Ormain baisse d'environ 70 % et l'apparition du maximum de dose est retardée de 170 000 ans supplémentaires environ.* »¹⁸²
- L'impact le plus important a été estimé pour l'emplacement de stockage représenté dans la Figure 3-27. La dose totale maximale pour le colis CU1 augmente de 10 fois, de 0,019 mSv/an à 0,19 mSv/an.

Les conclusions sur les magnitudes relatives des doses devraient s'appliquer à tous les types de déchets selon 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.* »¹⁸³

En résumé, les résultats présentés dans le *Dossier 2005 Argile, Sûreté* pour les calculs de référence et les analyses de sensibilité indiquent que l'augmentation de la dose totale maximale, en utilisant des paramètres pénalisants, est d'un ordre de grandeur, soit d'un facteur dix, ou inférieure à un ordre de grandeur.

Sur la base de ces résultats d'analyses de sensibilité l'Andra en déduit : « *Les conclusions de l'analyse de sûreté sont de plus en plus sensibles aux incertitudes résiduelles.* »¹⁸⁴

¹⁷⁹ Dossier 2005 Argile, Sûreté p. 330

¹⁸⁰ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 218

¹⁸¹ Dossier 2005 Argile, Sûreté p. 338

¹⁸² Dossier 2005 Argile, Sûreté p. 361

¹⁸³ Dossier 2005 Argile, Sûreté, p. 300

¹⁸⁴ Dossier 2005 Argile, Sûreté p. 698

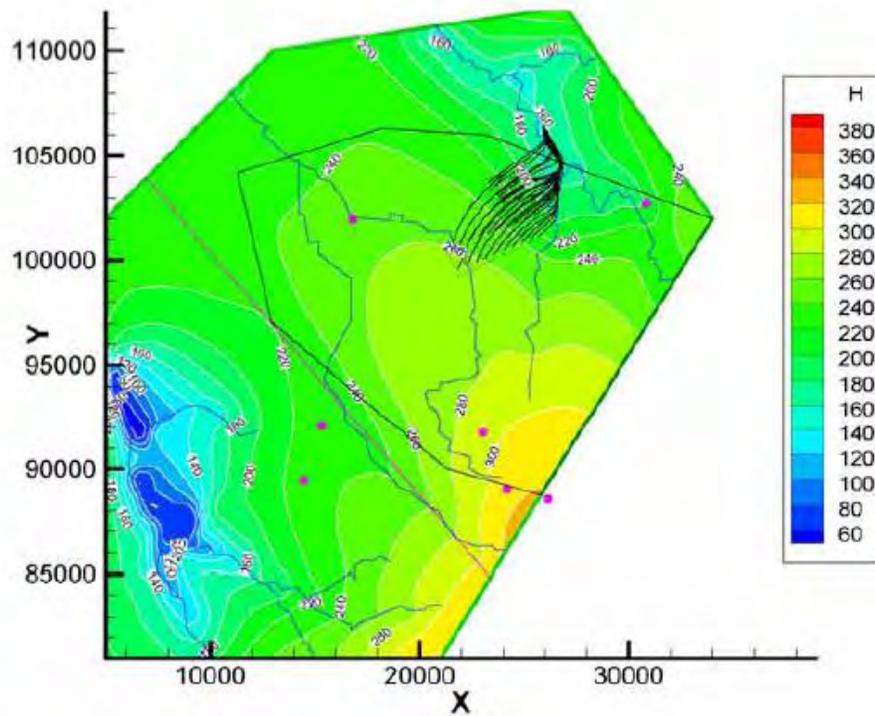


Figure 3-27. SEN – sensibilité à la position du stockage - trajectoires hydrauliques dans les horizons poreux Hp1-Hp4 – Position du stockage Nord (Source: Dossier 2005 Argile, Sûreté Figure 5.5-74 (p. 365))

3.2.3.2 Évaluation des analyses de sûreté

L'examen des analyses de sûreté menées par l'Andra résumées à la section 3.2.3.1 suscite les préoccupations suivantes:

- Le scénario d'évolution normale et les analyses de sensibilité associées s'appuient sur l'homogénéité et l'isotropie des propriétés de transport de la formation du Callovo-Oxfordien, bien que ces propriétés soient hétérogènes et anisotropes comme analysé en détail dans la section 3.2.1.
- Les gammes de paramètres pris en compte dans les analyses de sensibilité sont plus étroites que celles qui sont effectivement observées (ce qui est également discuté dans la section 3.2.1). Ceci concerne particulièrement la conductivité hydraulique verticale des argilites. En conséquence, l'impact prévu sur la dose totale est faible (un ordre de grandeur, soit un facteur dix, ou moins).
- 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, débit de pompage de puits, taux de consommation alimentaire et autre).
- 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 pas être faites.
- Les impacts potentiels des incertitudes des paramètres et du modèle ont été évalués par les analyses de sensibilité et aucune évaluation de dose probabiliste n'a été faite. En conséquence, l'impact estimé d'un ordre de grandeur (d'un facteur dix) basé sur des études de sensibilité n'est pas obligatoirement représentatif de l'éventail possible.
- 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 divisée entre 3 lieux d'exposition différents, ce qui a abouti à un « étalement » de la dose totale et, en conséquence, à des valeurs inférieures.
- La dose totale maximale la plus élevée pour le colis de référence CU1, de 0,19 mSv/an a été estimée dans le cas où le stockage est situé à l'intérieur de la ZIRA. Cette estimation pourrait 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.
- Les deux exutoires importants pris en compte sont situés en bordure du panache du contributeur le plus important (I 129), ce qui aurait comme conséquence une sous-estimation des doses totales

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.

Afin d'évaluer les implications de certaines des questions évoquées ci-dessus, une évaluation de sûreté simple probabiliste a été réalisée. Il faut remarquer que l'objectif de cette évaluation consistait à mettre en évidence la fourchette potentielle dans les estimations de la dose maximale totale, et non la dose réelle. L'accroissement de la fourchette de la dose totale potentielle – c'est-

à-dire, une dose plus élevée à l'extrémité supérieure et une dose plus faible à l'extrémité inférieure, que celles prévues par l'Andra - s'appliquerait relativement indépendamment du scénario. Bien sûr, la dose actuelle dépend du scénario qui définit le terme source. Nous notons qu'un terme source définitif comprenant les quantités et les types de déchets, n'a pas encore été défini pour le site de stockage de Bure.

Un modèle simplifié d'évaluation de sûreté a été développé en utilisant les conclusions faites par l'Andra sur la base des simulations du scénario d'évolution normale. Les hypothèses suivantes ont été examinées.

- L'inventaire du colis de référence comprend 3 radionucléides : I 129, Cl 36, et Se 79 selon la conclusion que ces trois radionucléides sont les principaux contributeurs à la dose. Ces radionucléides ont été considérés comme non sorbants et très solubles. L'inventaire du colis de référence est immédiatement dissout dans l'eau interstitielle.
- Ceci s'appuie sur la conclusion que le modèle de relâchement des déchets montre peu d'impact. Le moment où cette dissolution instantanée se produit dépend du type de déchets.
- Seulement la moitié de l'inventaire des radionucléides transportés vers le haut de la roche hôte est prise en compte. Ceci est basé sur les résultats de dose selon lesquels l'impact le plus élevé intervient dans les lieux d'exposition des formations sus-jacentes.
- L'autre moitié de l'inventaire se déplace vers le bas de la roche hôte et n'est pas prise en compte.
- Les fourchettes des paramètres de transport de la roche hôte ont été définies en cohérence avec les fourchettes utilisées par l'Andra dans l'analyse de sensibilité.
- Deux modèles de transport dans la roche hôte ont été considérés : le transport diffusif seul et le transport diffusif et convectif. La longueur fixe de la voie de transport, égale à 65 m, est utilisée dans toutes les simulations (la distance de la partie centrale des déchets vers le haut de la roche hôte).
- Il a été supposé que la seule exposition est due à la consommation d'eau potable. Les autres voies d'exposition n'ont pas été incluses. Il en résulte une sous-estimation de la dose par rapport au scénario de l'agriculteur vivant pour l'essentiel de ses cultures utilisé par l'Andra. Cette hypothèse est faite pour des raisons de simplicité.
- Deux types de scénarios ont été envisagés. Dans le premier scénario, le puits de pompage a été placé au-dessus du site de stockage dans la formation sus-jacente. Le flux des radionucléides quittant le toit de la roche hôte a été entièrement capturé par le puits. Ce scénario n'a pas bénéficié de la prise en compte du transport des radionucléides dans les formations sus-jacentes. Dans le deuxième scénario, le puits de pompage a été placé à une certaine distance du site de stockage et le transport convectif dans la formation sus-jacente (dans l'intervalle poreux avec la plus grande perméabilité) en direction de ce puits a été pris en considération.
- Les facteurs de conversion de dose communément admis pour les radionucléides pour l'irradiation interne par ingestion ont été utilisés pour calculer la dose associée à chaque radionucléide: $7,46 \times 10^{-8}$ Sv/Bq pour l'Iode 129, $2,35 \times 10^{-9}$ Sv/Bq pour le Selenium 79 et $8,19 \times 10^{-10}$ Sv/Bq pour le Chlore 36¹⁸⁵.

¹⁸⁵ RESRAD User's Manual 2001 Table D.1

Les paramètres de distribution de probabilité utilisés dans ce modèle simplifié d'évaluation de sûreté sont décrits ci-dessous.

- Porosité totale : distribution uniforme avec un minimum de 0,14 et un maximum de 0,18.
- Porosité accessible aux anions: distribution uniforme avec un minimum de 0,07 et un maximum de 0,09
- Conductivité hydraulique verticale : distribution log-normale tronquée avec une moyenne $1,0 \times 10^{-13}$ m/sec, un écart-type géométrique de 1,5, un minimum de 5×10^{-14} m/s, et un maximum de 5×10^{-13} m/s.
- Gradient vertical entre les aquifères du Dogger et de l'Oxfordien : distribution uniforme avec un minimum de 0,05 m/m et un maximum de 0,2 m/m.
- Coefficients de diffusion des anions : distribution triangulaire avec la valeur la plus probable de $5,0 \times 10^{-12}$ m²/s, un minimum de $5,0 \times 10^{-13}$ m²/s, et un maximum de 8×10^{-12} m²/s.
- Conductivité hydraulique dans l'Oxfordien : distribution log-normale avec une valeur moyenne de $3,0 \times 10^{-8}$ m/s et un écart-type géométrique de 1,8.
- Longueur du trajet de transport dans l'Oxfordien : distribution uniforme avec un minimum de 2 000 m et un maximum de 4 000 m.
- gradient horizontal dans la formation de l'Oxfordien: distribution uniforme avec un minimum de 0,005 et un maximum de 0,02.¹⁸⁶
- Porosité effective de la formation de l'Oxfordien (horizon poreux) : distribution uniforme avec un minimum de 0,08 et un maximum de 0,18
- Épaisseur de la couche à haute perméabilité: distribution uniforme avec un minimum de 40 m et un maximum de 60 m (l'épaisseur moyenne est de 50 m)¹⁸⁷, 25 % -35 % de l'épaisseur totale de la formation Oxfordienne.¹⁸⁸
- Dispersion dans la formation de l'Oxfordien : distribution uniforme avec un minimum de 1 m et un maximum de 10 m.¹⁸⁹
- Taux d'ingestion de l'eau potable : distribution uniforme avec un minimum de 1,5 l/jour et un maximum de 2,5 l/jour.
- Débit de pompage de puits : distribution uniforme avec un minimum de 75 l/min et un maximum de 125 l/min. L'Andra utilise la valeur moyenne de taux de pompage de 100 l/min.¹⁹⁰

Le code informatique GoldSim¹⁹¹ est utilisé pour mettre en œuvre 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

¹⁸⁶ Référentiel du Site 2010, Tome 1 Section 15.2.2.1

¹⁸⁷ Dossier 2005 Argile, Sûreté p. 262

¹⁸⁸ Référentiel du Site 2010, Tome 1 Section 12.4.1.2

¹⁸⁹ Référentiel du Site 2010, Tome 1 Table 15-6

¹⁹⁰ Dossier 2005 Argile, Sûreté p. 266

¹⁹¹ GoldSim User's Guide 2002

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. Comme on peut le voir sur cette figure, la différence dans le total des doses lorsque la diffusion et la convection sont prises en compte dans la formation du Callovo-Oxfordien, est d'environ un ordre de grandeur (un facteur dix) par contraste avec celle de l'Andra qui est d'un facteur 2.¹⁹² Le transport dans la formation Oxfordienne résulte en des doses plus faibles pendant les 800.000 premières années en comparaison avec la diffusion et la convection dans le Callovo-Oxfordien, mais la dose totale maximale est similaire. Cela est conforme à la conclusion de l'Andra concernant la faible importance des paramètres de transport des formations sus-jacentes. Dans toutes les simulations, le plus important contributeur à la dose a été l'iode 129. Les contributions du sélénium 79 et du chlore 36 à la dose maximale totale sont négligeables.

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.

La différence dans la dose maximale totale entre la « moyenne déterministe » et la limite supérieure de la simulation probabiliste est d'environ 2 ordres de grandeur. Ceci indique que les résultats des analyses de sensibilité (d'un ordre de grandeur, soit d'un facteur dix, de différence dans les doses maximales totales) ne tiennent pas compte de la fourchette potentielle (2 ordres de grandeur, soit d'un facteur 100, comme indiqué dans l'évaluation probabiliste simplifiée).

¹⁹² Dossier 2005 Argile, Sûreté p. 330

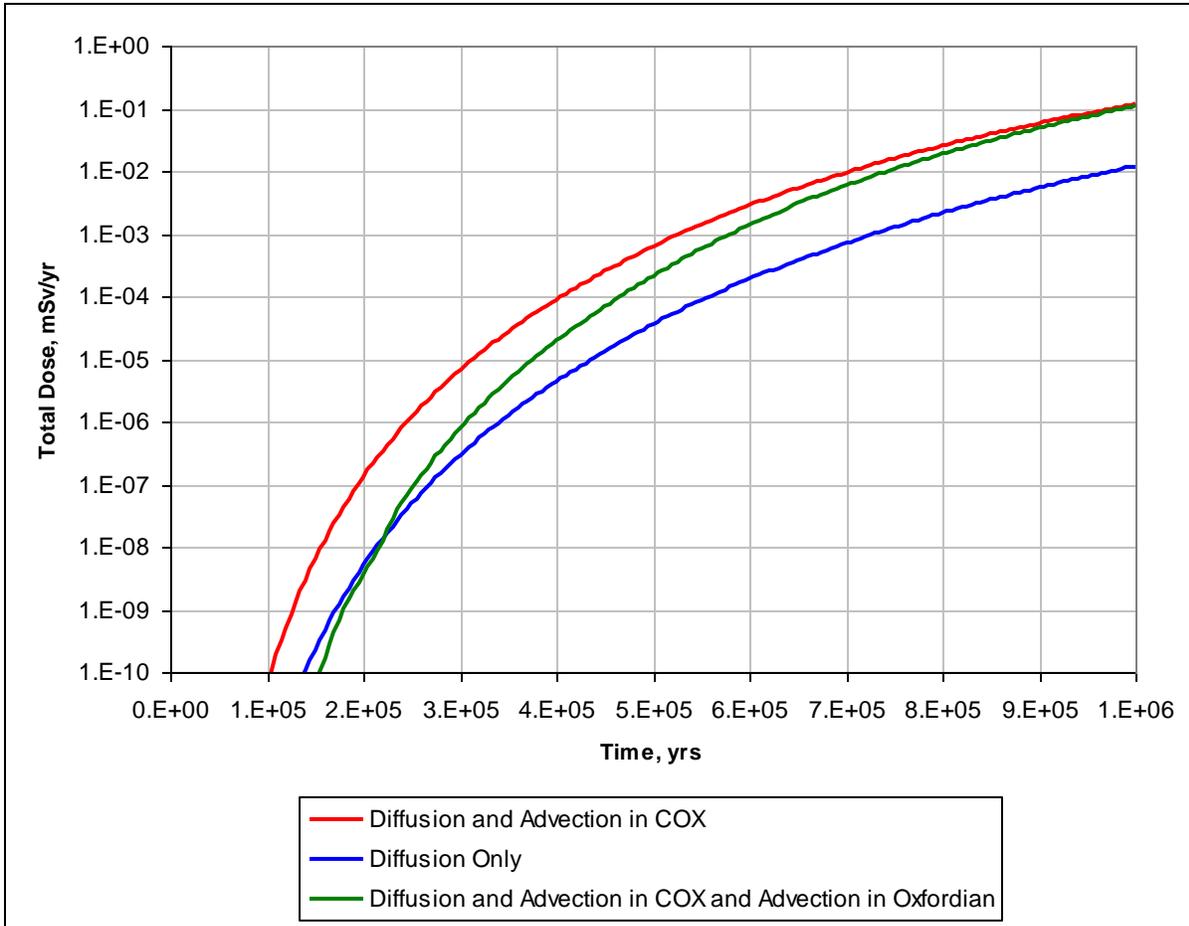


Figure 3-28. Doses totales moyennes dans les différents modèles conceptuels (Source : E. Kalinina)

Note : Les doses visent à montrer les effets des hypothèses sur les flux diffusifs et convectifs et non pas nécessairement les estimations des doses réelles.

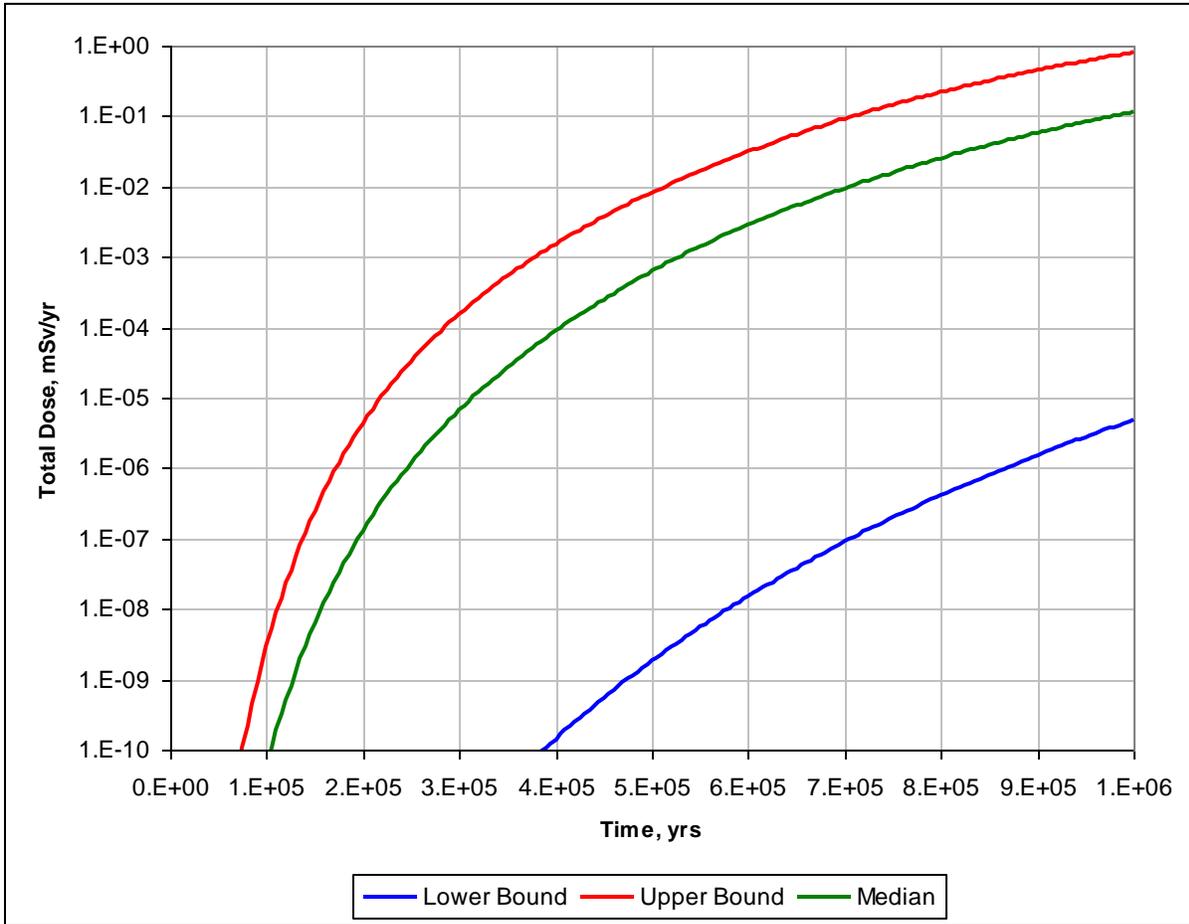


Figure 3-29. Incertitudes des doses totales pour la diffusion et la convection dans le modèle conceptuel du Callovo-Oxfordien (Source : E. Kalinina). Les doses visent à indiquer la fourchette des incertitudes et non pas nécessairement les estimations des doses réelles.

Nous tenons à remarquer qu'une plage d'incertitude de 5 ordres de grandeur, soit d'un facteur 100 000, est courante pour les analyses de sûreté. L'incertitude sur la dose totale estimée pour le potentiel site de stockage de Yucca Mountain est fournie ci-dessous à titre d'illustration. Comme on peut le constater sur cette figure, une incertitude encore plus grande a été estimée pour ce site

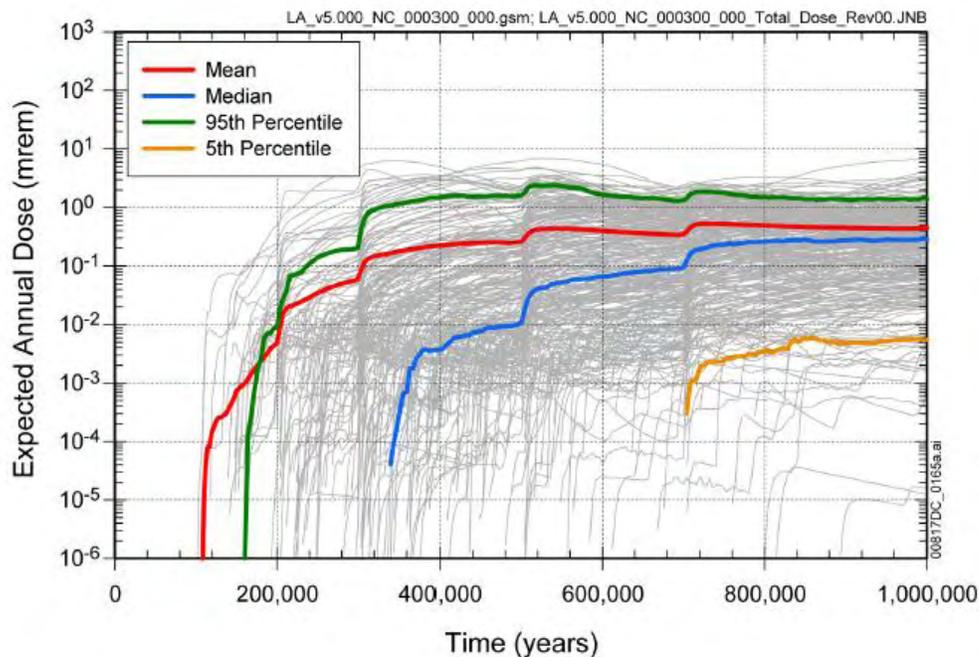


Figure 3-30. Exemple d'estimation de dose pour le site de Yucca Mountain (Source: Sandia 2008 Figure ES-44 (p. FES-44))

Les résultats de l'analyse de sensibilité réalisée avec le modèle d'évaluation de sûreté simplifié sont présentés dans la Figure 3-31 pour le scénario de transport par diffusion et convection dans le Callovo-Oxfordien et le transport convectif dans l'Oxfordien. Les paramètres les plus importants sont le coefficient de diffusion effectif des anions, la conductivité hydraulique de la formation du Callovo-Oxfordien, et le gradient hydraulique vertical entre les formations de l'Oxfordien et du Dogger.

Tornado Sensitivity Chart - Analyzed Result: Total_Dose [mSv/yr]

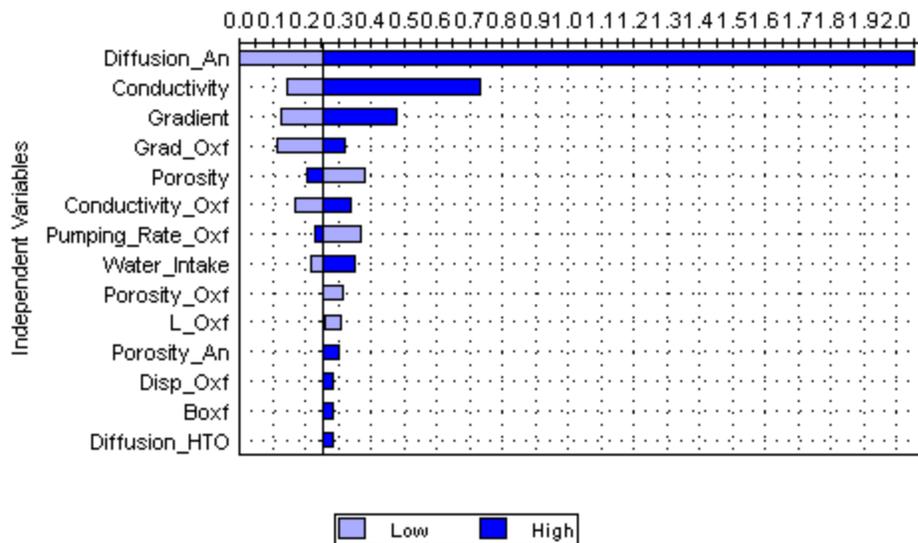


Figure 3-31. Résultats de l'analyse de sensibilité pour le transport par convection diffusion dans la formation du Callovo-Oxfordien et le transport convectif dans la formation Oxfordienne (Source : E. Kalinina)

Notes :

Diffusion_An est le coefficient de diffusion effective dans les argilites pour les anions

La conductivité est la conductivité hydraulique dans les argilites

Gradient est le gradient vertical entre les formations de l'Oxfordien et du Dogger

Grad Oxf est le gradient horizontal dans la formation de l'Oxfordien

Porosity est la porosité totale des argilites

Conductivity_Oxf est la conductivité hydraulique dans l'Oxfordien carbonaté

Pumpin Rate_Oxf est le débit de pompage de puits

Water_Intake est le taux de consommation d'eau potable

Porosity_Oxf est la porosité efficace des carbonates de l'Oxfordien

L_Oxf est la distance au point d'exposition franchie dans la formation de l'Oxfordien

Porosity_An est la porosité accessible aux anions

Disp_Oxf est la dispersion dans la formation de l'Oxfordien

Boxf est l'épaisseur de la couche à haute perméabilité dans la formation de l'Oxfordien

Diffusion_HTO est le coefficient de diffusion effective de l'eau tritiée.

3.3 Résumé

Le Chapitre 3 aborde les questions qui sont considérées comme les plus importantes pour la sûreté à long terme du stockage : les propriétés de transport et les processus dans le Callovo-Oxfordien et l'analyse de sûreté.

Le *Dossier 2005 Argile, le Référentiel du Site 2010*, et un certain nombre de publications ont été étudiées pour évaluer si (1) la variabilité et les incertitudes relatives aux processus et aux paramètres au sein de la zone de transposition ont été correctement caractérisées et pleinement prises en compte dans les modèles et les analyses de sûreté et si (2) la variabilité et les incertitudes au sein de la ZIRA sont les mêmes que dans la zone de transposition. Les résultats de cette étude indépendante sont résumés ci-dessous.

3.3.1 Propriétés de transport de la roche hôte

Les propriétés de transport de la roche hôte sont étudiées dans la section 3.2.1.1. Dans son évaluation de la roche hôte, l'Andra s'appuie particulièrement sur l'homogénéité et l'isotropie des propriétés de transport de la formation du Callovo-Oxfordien au sein de la zone de transposition et de la ZIRA et sur l'absence de failles et de fractures conductrices (voies potentielles d'écoulement convectif rapide).

Les principales propriétés de transport ont été examinées pour évaluer la crédibilité de ces hypothèses.

Absence de failles et de fractures conductrices (examinées dans la section 3.2.1.1.1)

Un certain nombre de failles ont été révélées par les récentes campagnes sismiques 2D (2007-2008) dans les parties nord et nord-ouest de la zone de transposition et à proximité de sa limite occidentale. Une de ces failles se trouve dans la ZIRA.¹⁹³ L'Andra n'a fourni aucune donnée pour éclairer le rôle potentiel de ces failles.

De multiples microfractures ont été observées dans les forages EST211, EST207, EST209, EST361, et EST361 et dans les puits principal et auxiliaire. L'Andra n'a fait aucune tentative pour élaborer une représentation conceptuelle de la couche microfracturée au sein de la zone de transposition ou de la ZIRA. 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.

Ces deux questions ont été abordées à la suite de la rencontre entre l'Andra et l'IEER le 16 février 2011.

Homogénéité et isotropie des paramètres de transport

1. Composition minéralogique (examinée dans la section 3.2.1.1.2)

La composition minéralogique de la formation du Callovo-Oxfordien est hétérogène en coupe verticale. Trois séquences ont été identifiées au sein de la roche hôte. L'enrichissement en carbonates a tendance à augmenter latéralement. Il y a une teneur élevée en argile dans la séquence médiane dans la partie nord-est de la zone de transposition.

¹⁹³ Référentiel du Site 2010 Figure 9-14

La variabilité minéralogique est expliquée par la combinaison de deux facteurs (outre les variations de faciès sédimentaires) : (1) l'existence possible de lacunes sédimentaires liées aux changements dans les conditions de dépôt paléo-géographique et (2) le développement de dépressions locales dues aux variations latérales dans les déplacements tectoniques.

2. Composition de l'eau interstitielle (examinée dans la section 3.2.1.1.2)

La composition de l'eau interstitielle a la même tendance (nord-est au sud-ouest) que la composition minérale. La composition minérale affecte les propriétés de transport des argilites. La différence dans les propriétés de transport influe sur le processus de diffusion et de convection qui, à son tour, influe sur la composition de l'eau interstitielle.

En résumé, la composition de l'eau interstitielle change latéralement et en coupe verticale dans la zone de transposition. Il existe deux zones distinctes, situées dans les parties au nord-est et sud-ouest de la zone de transposition. La limite entre ces deux domaines se trouve probablement quelque part dans la ZIRA.

3. Porosité (examinée dans la section 3.2.1.1.3)

Les distributions de probabilité de la porosité totale obtenues pour les différentes expériences montrent que ces distributions sont sensiblement différentes, en particulier dans les queues droites des distributions. La répartition obtenue pour le site du laboratoire est particulièrement différente de celle des autres endroits.

La plage définie par l'Andra pour la porosité accessible aux anions est de 4 % à 7 % avec une moyenne de 5 %. Cette plage est beaucoup plus étroite qu'elle ne devrait l'être en fonction des données disponibles. Seule une valeur moyenne de 9 % a été prise en considération pour la porosité cinématique. La plage de valeurs aurait dû être prise en compte.

4. Perméabilité (conductivité hydraulique) (examinée dans la section 3.2.1.1.4)

Les données disponibles indiquent que la conductivité hydraulique est hétérogène et anisotrope (avec un facteur d'anisotropie de 2 à 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. Cette approche sous-estime la conductivité hydraulique verticale parce que l'anisotropie supposée est beaucoup plus élevée que celle observée. Par ailleurs, la fourchette de la conductivité hydraulique horizontale était de 5×10^{-14} m/s à 5×10^{-13} m/s, ce qui est nettement inférieur à la dispersion des données observées.

5. Gradient hydraulique (examiné dans la section 3.2.1.1.5)

Les gradients hydrauliques sont hétérogènes au sein de la zone de transposition et de la ZIRA. Il existe un fort gradient ascendant dans le nord et le nord-ouest et un gradient descendant dans le sud.

Les estimations du gradient hydraulique sont très incertaines. Les incertitudes sont associées à un certain nombre de facteurs. Par exemple les mesures ont révélé une surpression dans le Callovo-Oxfordien par rapport aux formations encaissantes de l'ordre de +20 m à +30 m en ce qui concerne la formation de l'Oxfordien et +40 m à +50 m en ce qui concerne la formation du Dogger. À ce jour, aucune explication plausible de ce phénomène n'a été fournie.

Seulement 13 mesures de charge hydraulique sont disponibles dans l'Oxfordien et 11 dans la formation du Dogger. Les gradients dans la formation du Dogger sont faibles dans le nord-est et importants à l'ouest. Les raisons de ces différences ne sont pas connues pour autant que cet examen a pu le déterminer.

6. Diffusion effective (examinée dans la section 3.2.1.1.6)

L'Andra « *s'appuie sur l'homogénéité du Callovo-Oxfordien, et l'absence d'hétérogénéités significatives au sein de la formation au regard de la diffusion* » pour justifier l'hypothèse que cela « *concerne l'étalement dans l'espace, et consiste à empêcher que les radionucléides ne diffusent selon des directions privilégiées.* »¹⁹⁴

Les argilites du Callovo-Oxfordien présentent une hétérogénéité verticale et horizontale et sont anisotropes avec une diffusion horizontale (parallèle à la stratification) supérieure à la verticale. Les coefficients de diffusion effective varient considérablement dans un forage en fonction de la composition minéralogique et de la porosité (en grande partie déterminée par la teneur en minéraux argileux). Les coefficients de diffusion effective varient également dans les différents forages du fait des différences dans la composition minéralogique et la composition de l'eau interstitielle (largement contrôlée par la force ionique).

L'anisotropie moyenne mesurée sur les échantillons du forage EST104 est de 1,56. Sur la base des études qui ont été réalisées à l'appui des expériences DIR (Diffusion des traceurs Inertes et Réactifs), l'anisotropie des coefficients de diffusion est de 1,9 pour l'eau tritiée et de 1,3 pour le chlorure. Par conséquent les deux ensembles de données indiquent une anisotropie.

La diffusion effective des anions dépend de la force ionique de la solution. 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). Ainsi, la diffusion effective des anions pourrait être plus élevée dans la partie nord-est de la zone de transposition et dans la ZIRA.

En raison du nombre limité de données, il semble que la variabilité possible des coefficients de diffusion au sein de la zone de transposition et de la ZIRA n'ait pas été totalement prise en compte. 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 ($1.5 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$).

¹⁹⁴ Dossier 2005 Argile, Sûreté pp. 151-152

3.3.2 Examen des processus de transport dans la roche hôte

Les propriétés de transport de la roche hôte sont examinées dans la Section 3.2.1.2. L'Andra a conclu que le transport par diffusion était dominant. Cette conclusion est faite sur la base des propriétés de faible perméabilité de la roche hôte et corroborée par (1) la comparaison des temps de transport par diffusion aux temps de transport par convection (analyse simplifiée comportant le calcul du nombre de Péclet) et (2) l'interprétation des données des traceurs naturels.

L'Andra a estimé un nombre de Péclet de 0,13 (diffusion dominante) pour les espèces anioniques en utilisant les valeurs moyennes des paramètres de transport. De simples calculs probabilistes avec des plages de paramètres compatibles avec celles de l'Andra indiquent que le nombre de Péclet peut aller jusqu'à 16. Cela signifie que la possibilité de transport convectif-diffusif ne peut être exclue.

L'Andra a conclu que la distribution du traceur naturel dans le Callovo-Oxfordien peut être expliquée par la diffusion seule. Cette conclusion a été utilisée comme une justification supplémentaire pour supposer un transport par diffusion dominant dans la roche hôte. La limite supérieure de la vitesse de convection estimée à partir des données de traceur naturel est de $5,6 \times 10^{-12}$ m/s. Cette valeur est nettement supérieure à celle de « quelques centimètres environ par 100 000 ans », ¹⁹⁵ qui est (en supposant que « quelques » signifie « 3 » et que la porosité cinématique est de 0,09) de $1,05 \times 10^{-13}$ m/s. Il faut noter qu'il faudrait 339 750 ans à un contaminant pour atteindre le sommet de la formation du Callovo-Oxfordien quand la vitesse est de $5,6 \times 10^{-12}$ m/s (ce qui est comparable au temps de diffusion) et $1,8 \times 10^7$ années dans le scénario avec « quelques centimètres environ par 100 000 ans ».

Les données des traceurs naturels apportent une preuve suffisante que le transport par convection peut être comparable au transport par diffusion à certains endroits dans la zone de transposition. Ils confirment également que les processus de transport ont des importances et des directions différentes selon les zones, ce qui est principalement dû à l'hétérogénéité des propriétés de transport de la formation du Callovo-Oxfordien.

3.3.3 Analyse de la sûreté

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.
- Les fourchettes des paramètres pris en compte dans les analyses de sensibilité sont plus étroites que les fourchettes des paramètres effectivement observées. Cela concerne en particulier la conductivité hydraulique verticale des argilites.

¹⁹⁵ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 175

- 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.
- 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 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.* »¹⁹⁶ Cependant, un terme source bien défini et une analyse mise à jour prenant en compte le combustible usé est tout à fait nécessaire.
- Les deux principaux exutoires pris en compte pour l'évaluation de la dose sont situés en bordure du panache du contributeur principal (I 129) ce qui pourrait avoir comme conséquence une sous-estimation des doses totales.

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.

¹⁹⁶ Dossier 2005 Argile, Sûreté, p. 300

3.4 Références

Andra Campagne Sismique 2008	Andra. <i>Lot MI8-3: Campagne Sismique 2D et Activités Connexes Interprétation et Inversion des Données Sismiques 2D : Rapport Final</i> . Campagne de Reconnaissance de la Zone de Transposition 2007-2008, Laboratoire Souterrain de Meuse/Haute-Marne. [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, 29 novembre 2008.
Andra Sûreté 2010	Andra. <i>Options de sûreté du stockage en formation géologique profonde</i> . (C.NT.ASSN.09.0029.B) [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, 26 Février 2010. Titre courant: JALON 2009 HA-MAVL.
Dossier 2005 Argile, Sûreté	Andra. <i>Dossier 2005 Argile: Tome: Évaluation de sûreté du stockage géologique</i> . Seconde ed. (Collection Les Rapports) [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, Décembre 2005.
Dossier 2005 Argile, Synthèse	Andra. <i>Dossier 2005 Argile: Synthèse: Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse</i> . Seconde éd. (Collection les rapports) (266 B) [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, Décembre 2005.
Fetter 1993	C.W. Fetter. <i>Contaminant Hydrogeology</i> . New York: Macmillan, 1993.
GoldSim User's Guide 2002	GoldSim. <i>GoldSim User's Guide</i> . [Issaquah, WA]: GoldSim Technology Group, 2002. Les versions les plus récentes sont sur le site Web http://www.goldsim.com/Web/Downloads/UserManuals .
Mazurek et al. 2008	Martin Mazurek, Andreas Gautschi, Paul Marschall, Georges Vigneron, Patrick Lebon, and Jacques Delay. "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," <i>Physics and Chemistry of the Earth</i> 33 (2008): S95–S105. Supplement 1: Clays in Natural & Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement. Disponible pour l'achat sur le Web ou gratuit dans les bibliothèques de recherche.
Mazurek et al. 2009	Martin Mazurek, Peter Alt-Epping, Adrian Bath, Thomas Gimmi, and H. Niklaus Waber, et al. <i>Natural Tracer Profiles Across Argillaceous Formations: The CLAYTRAC Project</i> . (NEA No. 6253) (Radioactive Waste Management). Paris, Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, 2009. Lien sur le Web à http://www.oecdbookshop.org/oecd/display.asp?k=5KSNXJV372NN&lang=en . Disponible dans les bibliothèques de recherche sur le site web http://www.sourceoecd.org/9789264060470 .
Référentiel du Site 2010	Andra. <i>Référentiel du Site Meuse/Haute-Marne</i> . (C.RP.ADS.A09.0007.B) [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, 29 janvier 2010. Titre courant: Jalon 2009 HA-MAVL. "Document interne."
RESRAD User's Manual 2001	C. Yu, A.J. Zielen, J.-J. Cheng, D.J. LePoire, E. Gnanapragasam, S. Kamboj, J. Arnish, A. Wallo III, W.A. Williams, and H. Peterson. <i>User's Manual for RESRAD Version 6</i> . (ANL/EAD-4) Argonne, IL: Environmental Assessment Division, Argonne National Laboratory, July 2001. Site Web http://web.ead.anl.gov/resrad/documents/resrad6.pdf .

RFS III.2.f Règle Fondamental III.2.f - Règles fondamentales de sûreté relatives aux installations nucléaires de base autres que réacteurs, Règle No. III.2.f (10 juin 1991) – Stockage définitif de déchets radioactifs en formation géologique profonde. Site Web http://www.andra.fr/download/andra-meuse-fr/document/rfs_iii_2_f.pdf.

Sandia 2008 Sandia National Laboratories. *Total System Performance Assessment Model/Analysis for the License Application. Volume I.* (MDL-WIS-PA-000005 REV00) Las Vegas, NV: U.S. Department of Energy, Office of Civilian Radioactive Waste Management, January 2008. Available at www.isnnet.gov/under participant accession no. DOC.20080312.0001.

Williams 2006 Brian Williams. *Hydrobiological Modelling*. [Callaghan: Author at] University of Newcastle, NSW, Australia, 2006. Site Web <http://books.google.com/books?id=zN6cEKXL9aUC>. Available at <http://www.lulu.com/product/paperback/hydrobiological-modelling/1141455>.

Chapitre 4 : Mécanique des roches

Comme pour les autres chapitres, les observations et les conclusions de ce chapitre sont formulées en soulignant qu'elles reposent sur l'examen de documents de synthèse. Nous reconnaissons que nous n'avons pas examiné bon nombre des documents plus techniques correspondants qui auraient peut-être apportés des démonstrations plus convaincantes des résultats évoqués plus loin.

Points forts :

1. **Qualité de la recherche :** L'Andra a réalisé une impressionnante recherche de pointe en mécanique des roches et en ingénierie minière. Tout indique que la recherche qui a conduit à l'estimation des paramètres mécaniques de la roche dans le laboratoire souterrain et dans la zone de transposition est très fiable, approfondie, et conçue pour découvrir les variations dans le détail de la composition de la roche.
2. **Réduction de la zone de transposition pour la sélection de la ZIRA :** La sélection des 100 km² à partir des 250 km² de la zone de transposition dans laquelle inscrire la ZIRA a été fondée sur des considérations scientifiques et techniques.
3. **Conception modulaire :** Nous approuvons clairement l'approche de conception modulaire pour l'implantation du stockage.
4. **Planification de la réversibilité :** Nous sommes tout à fait d'accord avec l'accent mis dans la planification et la conception sur le maintien de la réversibilité et de la récupérabilité, ce qui est exigé par la législation actuelle. Cette planification est nécessaire parce que la réversibilité et la récupérabilité présenteront des défis complexes et difficiles.

Conclusions :

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.
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'IEER¹⁹⁷.
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

¹⁹⁷ IEER 2005 chapitre 2

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.

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.
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.
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.

Recommandations

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.
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.
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.

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.
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).

Nous voulons d'emblée reconnaître que nous avons été véritablement impressionnés par les études de mécanique des roches qui ont été effectuées par l'Andra depuis notre dernière évaluation.¹⁹⁸ Bien que ce rapport d'évaluation cible plutôt les points problématiques ou de désaccord, nous ne souhaitons pas laisser une impression négative. Le travail réalisé et les recherches achevées et en cours se situent clairement et sans l'ombre d'un doute au plus haut niveau, à l'avant-garde de la mécanique des roches. Ce travail apporte une contribution majeure à la mécanique des roches, particulièrement dans le domaine difficile de l'ingénierie dans des matériaux argileux et schisteux, qui représente un défi majeur pour la profession. L'Andra apporte dans ce domaine des contributions qui vont bien au-delà des exigences du stockage français. Le fait est reconnu depuis longtemps que :

Les schistes argileux sont souvent considérés comme des matériaux difficiles du point de vue de l'ingénieur. ... Les schistes argileux les plus problématiques semblent être ceux qui présentent une faible résistance et une forte proportion d'argile gonflante – la montmorillonite.¹⁹⁹

Les nombreuses thèses de doctorat auquel le programme a apporté et continue d'apporter son concours représentent un facteur important pour le statut de la recherche de l'Andra et la crédibilité de son programme. La bibliographie fournie par l'Andra²⁰⁰, le bilan très impressionnant et le résumé des quatre années de recherche sont particulièrement utiles à cet égard. Inversement, il est un peu surprenant de constater qu'aussi peu de publications, en particulier de publications dans des revues scientifiques à la suite de ce travail sont mentionnées dans les nombreux documents de l'Andra. Là encore, la crédibilité de tous les travaux et résultats sur lesquels s'appuient les rapports de l'Andra ne peut évidemment qu'être renforcée par des publications dans des revues à comité de lecture qui ont accepté le travail et les résultats. (Même dans le bilan de recherche²⁰¹, le lien entre la recherche résumée et les publications connexes n'est souvent pas signalé explicitement, ce qui complique plutôt la tâche du lecteur pour trouver les connexions. Ce qui est plus grave encore, c'est que la plupart des références sont données sous

¹⁹⁸ IEER 2005

¹⁹⁹ Cet exemple est tiré de Seedsman 1993 p. 164. Traduit de l'Anglais.

²⁰⁰ Andra 2010c

²⁰¹ Andra 2010c

une forme extrêmement condensée et énigmatique, qui exige parfois beaucoup d'efforts et de temps pour les localiser.

La recherche fondamentale effectuée par l'Andra est impressionnante et cruciale, en particulier compte tenu des échelles de temps sur lesquelles des prévisions, ou au moins, des estimations sont nécessaires. Cependant, une discussion manquant de détails est fournie sur les aspects pratiques d'ingénierie concernant le développement et la construction du site de stockage, et leurs implications sur les performances à long terme. Ceci est une faiblesse notable 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. 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 suffisamment 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 la 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 reconnu que la fracturation était assez fréquente et persistante. La justification de la continuité, basée sur un scellement parfait et la cicatrisation des fractures, a certainement besoin d'éléments plus probants. Nous notons ici que nous avons également fait de nombreux commentaires dans ce sens dans le rapport précédent de l'IEER.²⁰²

Les multiples collaborations internationales constituent un autre aspect important de la recherche de l'Andra que nous souhaitons reconnaître très explicitement. Il est clair que, pour diverses raisons, notamment le développement efficace de méthodologies de pointe, de telles collaborations sont très précieuses. Néanmoins, à cet égard un problème se pose : il n'est pas toujours évident dans quelle mesure les résultats et les conditions d'autres laboratoires sont vraiment applicables à un éventuel stockage dans la ZIRA (la Zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie). Il serait utile que des références plus fréquentes soient faites à des études qui confirment la pertinence pour le site de Meuse/Haute-Marne de résultats obtenus ailleurs. Ceci peut paraître superflu ou inutile pour des experts de l'Agence. Pour des lecteurs extérieurs, il reste souvent très difficile de comprendre pourquoi les résultats du Mont Terri, par exemple, devraient être aussi directement applicables à ce site.

Par ailleurs, étant donné l'énorme travail, souvent très sophistiqué, qui a été effectué au cours de la dernière décennie, et compte tenu du temps extrêmement court qui était imparti pour cette évaluation, il est possible que certaines références importantes et/ou sources d'information aient pu être omises. Autrement dit, le fait d'avoir jugé certains aspects lacunaires tient peut-être en partie à une évaluation incomplète. Néanmoins, une quantité considérable de documents a été examinée, et nous espérons qu'aucune source importante n'a été négligée.

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

²⁰² IEER 2005 chapitre 2

La possibilité de variations dans les formations sédimentaires, notamment la possibilité d'importantes variations inattendues de types de roches, représentent des situations imprévues qui conduisent souvent à de gros problèmes de stabilité ou de difficultés de construction. Elles représentent une préoccupation majeure en ce qui concerne la construction souterraine ou l'ingénierie minière. Pour cette raison, nous avons examiné très scrupuleusement les éléments que l'Andra a recueillis et présentés pour justifier que la formation hôte est uniforme et homogène. Nous sommes particulièrement impressionnés par l'ampleur des informations qui ont été recueillies sur l'histoire sédimentaire et l'évolution géologique du bassin, qui sont présentées en détail et conduisent à la conclusion assurée que la présence d'hétérogénéités majeures semble plutôt improbable.

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.²⁰³ Il nous semble que la question de l'homogénéité est si fondamentale et essentielle que toute nouvelle information qui peut être recueillie pour confirmer l'homogénéité ou pour soulever des doutes à ce sujet mérite un soutien plein et entier. (Il est également regrettable que la version web de cette demande ne comprenne pas les références, dont beaucoup auraient peut-être été très précieuses pour cette évaluation). Les variations très localisées dans la lithologie, qui peuvent localement entraîner des différences importantes dans les caractéristiques de performance d'isolation, que ce soit la perméabilité, la diffusion, la conductivité thermique, et/ou les propriétés mécaniques, pourraient présenter un intérêt particulier.²⁰⁴

Sans être strictement une question d'inhomogénéité, selon *l'Évolution phénoménologique du stockage géologique*, « une variabilité verticale des propriétés mécaniques est notée dans la couche du Callovo-Oxfordien », qui aboutit à une division de la couche en « trois zones mécaniques distinctes. »²⁰⁵ Si nous comprenons bien, la ZIRA a été sélectionnée, au moins en partie, pour permettre l'implantation de tout le site de stockage dans une zone particulière (à savoir, la zone C) en fonction de la profondeur par rapport à la surface et des distances minimales nécessaires entre le haut et le bas de la formation hôte 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. Nous convenons que tous les éléments se conjuguent pour former une argumentation convaincante en faveur de la sélection de la ZIRA comme site optimal pour un stockage, sur la base des informations actuellement disponibles, du point de vue de la réduction du risque des hétérogénéités importantes, de la réduction des dommages à la masse rocheuse (c'est-à-dire développement de l'EDZ), et du 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 (comme le fait remarquer, par exemple, le rapport d'évaluation du Luxembourg sur un stockage potentiel à Bure).²⁰⁶ Par

²⁰³ GNR FORPRO-II 2010 Annexe 1

²⁰⁴ Certaines de ces questions sont également abordées dans les Chapitres 2 et 5.

²⁰⁵ Andra 2005e p. 345

²⁰⁶ Groupe interministériel «Bure» 2010 p. 12

conséquent, il est très souhaitable que des efforts supplémentaires soient poursuivis pour s'assurer qu'aucune surprise importante ne sera rencontrée plus tard.

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

Il semble que, conceptuellement, les principales discontinuités préoccupantes en ce qui concerne le confinement des déchets, dans son sens le plus large, soient des failles secondaires de taille modeste et le long desquelles seuls des déplacements mineurs ont eu lieu. L'Andra a pris en compte ce problème potentiel, l'a traité à plusieurs reprises, et continue à le considérer comme une question qui mérite une attention prioritaire.

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 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 en stockage, particulièrement à la lumière du fait que les forages de mise en stockage sont horizontaux. Dans la documentation que nous avons examinée, nous avons été incapables de trouver où, et dans quelle mesure, l'Andra a traité cette question. Si cette question est soulevée, c'est d'abord en raison des observations bien établies sur les défauts autour des creusements dans les formations schisteuses, comme l'illustrent très bien les images classiques de Jacobi (1981) rapportées par Bock et al.²⁰⁷ Des exemples similaires, à partir de nombreuses simulations en laboratoire ainsi que de nombreuses observations dans les tunnels et les mines, sont fréquemment rencontrés et bien connus ; il est reconnu que ces problèmes sont sérieux dans de nombreuses formations rocheuses de ce type, et constitueront donc toujours un motif de préoccupation important. Il serait intéressant de savoir dans quelle mesure, le cas échéant, on a pu observer un éboulement hors profil associé à des plans de stratification pendant les creusements, et notamment autour de forages horizontaux. Vraisemblablement toute observation de cette nature aura été notée quelque part dans les rapports de construction et/ou d'observation. Ce qui n'est pas évident, c'est dans quelle mesure ces observations ont été prises en compte, ou non, dans les analyses phénoménologiques, qui supposent essentiellement des creusements parfaitement circulaires dans un milieu continu. Finalement, ces effets de décollement des bancs et d'éboulement hors profil peuvent affecter les performances à long terme, tant en ce qui concerne la stabilité (par exemple concernant la récupérabilité) et la perméabilité globale à grande échelle (par exemple, en influant sur la capacité du site à confiner les déchets).

Lors de notre visite du site (18 août 2010) nous avons observé un net breakout sur un trou horizontal nouvellement foré pour une alvéole de stockage qui a abouti à une forme d'ouverture peut-être plus proche d'un carré que d'un orifice circulaire. (Figure 4-1). Un tel breakout n'est pas rare dans des formations litées schisteuses/argileuses et peut même être attendu. Nous n'avons vu aucune discussion ou analyse de ces observations dans la documentation de l'Andra. Nous pensons que ce type d'observation mérite une attention approfondie dans la mesure où il y a des implications évidentes pour la géométrie de la zone perturbée, la charge du revêtement des

²⁰⁷ Bock et al. 2010 Figure 2-7 (p. 40)

alvéoles, la charge du revêtement des galeries (tunnels), l'espace vide créé, et la formation de voies d'écoulement potentielles. Cela pose aussi problème pour les analyses qui supposent que, à la suite des creusements, la véritable forme physique des forages de mise en stockage sera véritablement circulaire.



Figure 4-1. Breakout d'un forage effectué à partir d'une galerie du laboratoire de Bure (Photographie d'Arjun Makhijani, 18 août, 2010. P1020429)

La Figure 4-1 montre des fractures autour d'un forage effectué dans une paroi de galerie à Bure. Un déplacement de cisaillement ainsi qu'une ouverture se sont produits le long de certaines fractures, et des rotations de blocs ont donné lieu à des ouvertures importantes et variables. Il est difficile d'admettre que de tels vides peuvent être scellés sous l'influence d'une contrainte normale finalement rétablie. Cela pose aussi problème pour la validité des modèles de continuum. Si cette « pièce à conviction » est certes très empirique, elle n'est pas du tout étonnante pour ce type de masse rocheuse, et pose des questions quant à savoir si de tels comportements ont été traités adéquatement dans les analyses et les observations faites à ce jour.

Les problèmes de breakouts et de fractures autour des forages seraient beaucoup plus prononcés si la France décidait d'évacuer du combustible usé (ce qui n'est pas exigé par les critères de conception en cours), car les forages nécessaires seraient de 3,3 mètres de diamètre, beaucoup plus grands que les trous forés à ce jour. Dans ce contexte, il peut être utile pour l'Andra d'examiner si des forages verticaux permettraient de réduire ces problèmes.

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. Nous

reconnaissons que cette anisotropie n'est peut-être pas, et probablement n'est pas, un facteur décisif quant au choix de la ZIRA. Mais, comme l'a souligné la CNE,²⁰⁸ 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. Il est particulièrement remarquable à cet égard que les calculs, ainsi que la modélisation thermique et hydrologique, prennent explicitement en compte l'anisotropie.

Étant donné les observations fréquemment référencées de caractéristiques de rupture nettement directionnelles autour des creusements, qui, selon l'Andra sont assez représentatives de ce qui pourrait être observé dans un site de stockage de Meuse/Haute-Marne, il est difficile de concevoir comment une masse rocheuse avec des fractures aussi nettement parallèles pourrait rester isotrope.

Young et al. (2005), dans leurs études approfondies (notamment celles au Mont Terri) sur la validation sismique de la modélisation thermomécanique des dommages à la roche autour de colis de déchets radioactifs, insistent sur la nécessité de prendre en compte l'anisotropie prononcée de la formation hôte potentielle.²⁰⁹ De même, en ce qui concerne le Mont Terri : « ... la masse rocheuse montre une forte anisotropie, avec un rapport des modules de Young de l'ordre de 2,5. »²¹⁰ La discussion parallèle sur la modélisation du Callovo-Oxfordien à Bure indique que l'anisotropie de ce matériau est si faible qu'il peut être modélisé comme un matériau isotrope.²¹¹ 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 serait très utile que l'Andra fournissent des preuves convaincantes, à l'échelle des creusements du stockage, c'est-à-dire sur plusieurs mètres, que la roche hôte peut être traitée, mécaniquement, comme isotrope. Néanmoins, nous reconnaissons que ce rapport est une belle illustration du fait que l'Andra est à la pointe de la recherche sur la mécanique des roches, et plus particulièrement, dans ce cas particulier, d'une intégration sophistiquée de l'analyse sismique et numérique et des données de terrain avec les données de laboratoire. L'intégration approfondie, conjuguée à des coopérations multinationales, est une bonne illustration d'une approche très prometteuse pour résoudre les difficiles problèmes qui restent à traiter. Malheureusement, l'étude de Young et al. (2005), ne présente pas de comparaisons entre résultats numériques et observations sur le terrain. Est-ce que cela dépassait le cadre du projet ? Bien que ces deux publications soient d'excellents exemples des remarquables recherches sur la mécanique des roches que l'Andra soutient, elles ne répondent pas à la question de savoir comment les résultats du Mont Terri sont vraiment applicables à Bure : dans quelle mesure est-il possible, fiable et acceptable d'appliquer les résultats, observations, et analyses provenant d'une masse rocheuse nettement anisotrope à une autre qui est censée être mécaniquement essentiellement isotrope?

²⁰⁸ CNE 2010 Tome 1 p. 11

²⁰⁹ Young et al. 2005 p. 24

²¹⁰ Giot et al. 2006 p. 935

²¹¹ Young et al. 2005 p. 32

Nous reconnaissons que de considérables informations probantes ont été réunies sur l'anisotropie à la petite échelle des essais standards de la mécanique des roches.²¹² Il est loin d'être convaincant que les arguments fondés sur les résultats de tests effectués à une telle échelle peuvent être extrapolés à l'échelle du creusement du stockage. Cela est particulièrement vrai à la lumière du fait qu'il existe au moins certains éléments qui suggèrent que des modèles purement isotropes pourraient ne pas suffire à la modélisation mécanique de cette masse rocheuse.²¹³ 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.

4.1.2 Éventuelles différences des besoins de soutènement pour la stabilité des creusements en fonction de la sélection de l'emplacement de la ZIRA.

L'Andra a pris en compte les différences dans les besoins de soutènement suivant la profondeur de la formation disponible pour l'horizon envisagé pour le stockage, et elle a pris la décision de limiter cette profondeur. Elle a souligné à maintes reprises la sensibilité des besoins de soutènement, par exemple des besoins en épaisseur de béton, en fonction de la profondeur. Toutefois, l'accent a été mis principalement sur les implications sur la construction et la logistique de ces exigences. Il n'est ni clair ni évident si (ou dans quelle mesure) l'Andra a abordé explicitement toutes les conséquences en ce qui concerne le confinement des déchets et/ou la réversibilité dans le contexte de la profondeur de la mise en place.

Si les épaisseurs (et les volumes) de béton nécessaires sont donnés dans plusieurs documents,²¹⁴ aucun de ceux que nous avons vus ne comporte de détails sur les analyses sur lesquelles ces calculs d'épaisseur étaient basés, ni aucune référence à une source pour cette information. Malheureusement, ceci n'est pas rare dans les documents de l'Andra. Nous observons que les documents de l'Andra ont souvent tendance à omettre les références à certaines sources d'information clés essentielles. Si nous reconnaissons la difficulté de documenter un effort aussi massif, du point de vue d'un évaluateur, il serait très utile que le référencement soit plus complet.

La question de l'épaisseur de revêtement de béton nécessaire est particulièrement pertinente parce que, comme cela a été souligné à plusieurs reprises par l'Andra elle-même, l'interaction sol-revêtement est susceptible d'être un paramètre critique en matière de développement et de contrôle de la zone perturbée, et des caractéristiques de son évolution au cours du temps. En ce qui concerne les épaisseurs de revêtement en béton énumérées dans les références indiquées dans le paragraphe précédent, 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

²¹² Par exemple, voir Andra 2010a Tome 2 pp. 74-75, 83, 87, 93-94 et 139-140.

²¹³ Par exemple, voir l'Andra 2010a Tome 2 p. 35, dernier alinéa ; p. 100, dernier paragraphe ; et Figure 18-84 (p. 123). Bien que cette figure soit très difficile à lire, même après un agrandissement considérable, et difficile à comprendre étant donné le manque d'explications (la référence de la source est également absente). Voir aussi pp. 140 et 186.

²¹⁴ Par exemple, voir Andra 2009a p. 51; Andra 2009b slide 5; Andra 2009c pp. 5-6.

indiqué par l'Andra). Y a-t-il un autre élément en cause, comme un élément de construction du revêtement de sûreté ? (Par exemple, pourrait-il s'agir du béton projeté de 20 cm, mentionné dans d'autres documents²¹⁵ 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.

Si nous trouvons les nombreux engagements de l'Andra en faveur d'un suivi de l'évolution du stockage²¹⁶ très louables et encourageants, nous estimons plutôt décevantes l'extrême tiédeur et l'ambiguïté d'un engagement « éventuel » à inspecter et faire un suivi²¹⁷ du béton. Compte tenu du fait que ces technologies sont largement utilisées et mises en œuvre dans les tunnels,²¹⁸ nous encouragerions vivement l'Andra à s'engager plus fermement et explicitement à des inspections approfondies et régulières du béton. 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.)

Un problème similaire est rencontré avec les déclarations concernant la prise en compte du vieillissement et l'affaiblissement des matériaux de protection²¹⁹ (dont probablement les revêtements en béton et les supports en acier). Ici aussi une référence à un document d'analyse plus spécifique aurait été très utile. En outre, il est peut-être un peu exagéré de laisser entendre que les tunnels de génie civil sont généralement conçus pour une durée de vie d'un siècle,²²⁰ avec un minimum d'entretien. Tout au moins, une référence à ces approches de conception pour appuyer cette affirmation serait certainement la bienvenue. De même, il serait utile, pour soutenir l'affirmation²²¹ que le comportement à long terme du béton et de l'acier est suffisamment bien compris, de donner une ou plusieurs références sur l'important programme de recherche qui a été accompli à cet égard. L'expression « à long terme » doit être quantifiée pour que des comparaisons utiles puissent être faites avec des structures de génie civil existantes.

La représentation du radoucissement et de l'affaiblissement final des revêtements en béton dans les exercices de modélisation numérique est particulièrement préoccupante.²²² 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

²¹⁵ Par exemple, dans Andra 2005b p. 17.

²¹⁶ Par exemple, dans Andra 2010d p. 19.

²¹⁷ Andra 2010d p. 59, dernière phrase du texte

²¹⁸ AFTES 2005 ; Haack et al. 1995

²¹⁹ Andra 2010b pp. 49, 253-254, 312, et 319

²²⁰ Andra 2010b p. 253

²²¹ Andra 2010b p. 312, dernier paragraphe

²²² Par exemple, comme décrit dans Andra 2005a section 2.3.1.

radoucissement semble au moins quelque peu incompatible avec les assertions²²³ 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).

La thèse²²⁴ 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?

Nous reconnaissons la valeur de l'importante décision de l'Andra de limiter le site de la ZIRA aux zones où la profondeur potentielle du stockage ne dépasse pas 600 m. Cette approche très prudente (par ex. par rapport à des profondeurs potentielles atteignant 1 000 m prises en compte dans les critères de sélection du site allemand dans des formations hôtes potentielles de type schisteux/argileux)²²⁵ nous apparaît comme une décision très sage et prudente, pour le développement de l'EDZ en général, et particulièrement en ce qui concerne les zones perturbées des puits et de la descenderie.

Si nous reconnaissons l'approche prudente de l'Andra en faveur d'une réduction au minimum des besoins de soutènement, nous avons encore un certain nombre de préoccupations par rapport à son approche concernant les revêtements en béton, et en particulier les performances à long terme de ces revêtements. Nos principales réserves viennent du fait que nous n'avons pratiquement pas vu de données ou d'analyses à l'appui des affirmations concernant les performances à long terme de ces revêtements et nous supposons que certains éléments sont probablement disponibles dans des documents justificatifs que nous n'avons pas vus. Les estimations sur la longévité des revêtements en béton sont particulièrement préoccupantes.²²⁶ Dans le même document il est dit que la fracture de ce revêtement est possible (probable ?) dans quelques milliers d'années.²²⁷ Cela semble plutôt en contradiction avec un modèle dans lequel le module ne commence à baisser qu'après 5 000 ans. Il est généralement reconnu et accepté que les revêtements en béton non armé des excavations souterraines développent des fractures peu après l'installation.²²⁸ Nous avons la nette impression que ce fait ne semble pas être pris en compte dans les discussions de l'Andra sur les comportements phénoménologiques du revêtement. Quel est le module d'un revêtement fissuré ? La probabilité de la fissuration du revêtement est-elle reconnue et prise en compte dans les études de la dégradation de ces revêtements (qui semblent supposer que le front de dégradation progresse de façon uniforme, à partir de l'hypothèse que le revêtement est une masse de béton « intacte », « non fracturée », et ne tiennent pas compte, par exemple d'une intrusion préférentielle des fluides le long des fissures, de fractures ou de raccords de construction) ?

²²³ Andra 2005b section 3.3.3 (p. 37)

²²⁴ Andra 2005b section 3.3.3 (p. 37)

²²⁵ BGR 2007

²²⁶ Par exemple, tel que présenté dans Andra 2005a Figure 2.3-1 (p. 16) et le texte d'accompagnement.

²²⁷ Andra 2005a p. 49

²²⁸ Par exemple, voir AFTES 1998 Section 2.4 (p. 389)

Une autre préoccupation, liée au comportement à long terme des revêtements en béton, tient au fait que nous avons l'impression que 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). Cette hypothèse est explicitement mentionnée dans Massman et al. (2009), qui n'est certes pas un document officiel de l'Andra.²²⁹ 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 (par exemple, dans une discussion sur le béton projeté : « Sa première action est [...], parfois aussi une protection contre les variations d'hygrométrie. »)²³⁰ Si nous reconnaissons que les échelles de temps à envisager pour un stockage de déchets nucléaires dépassent largement celles des activités minières ou de construction conventionnelles, 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.²³¹

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

Il est très intéressant et encourageant de lire que d'importants travaux ont été réalisés sur le développement phénoménologique des structures du stockage, et continueront d'être effectués.²³² Malheureusement, aucune référence n'est donnée de l'étude citée (APSS-exploitation), par conséquent les détails de cette question n'ont pas pu être étudiés.

Il est très encourageant de voir que l'Andra reconnaît et admet que la CNE approuve la mise en place des instruments de suivi et de surveillance, et recommande une description précise d'un tel programme.²³³ Bien que l'engagement d'un tel suivi semble ferme dans son principe,²³⁴ 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,²³⁵ 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.

²²⁹ Massman et al. 2009

²³⁰ Duffaut 2003 p. 167. Voir également AFTES 2000 Section 2.1 (pp. 4-5).

²³¹ Par exemple, voir Andra 2005d pp. 54-55.

²³² Andra 2010d p. 18

²³³ Andra 2010d p. 15

²³⁴ Andra 2010d p. 19

²³⁵ Andra 2010d Section 4.2.5 (p. 59)

4.2 Comparaison de l'état de contrainte in situ et des paramètres de pression interstitielle entre le laboratoire souterrain et la ZIRA. Fiabilité de la recherche qui a conduit à estimer les paramètres de mécanique des roches dans la ZIRA.

Il y a de fortes indications que l'état de contrainte a été suffisamment caractérisé pour justifier la conclusion que cet état de contrainte est connu de manière fiable dans la ZIRA. On peut supposer que, dans le cadre d'un éventuel développement du stockage, d'autres mesures de contrainte seront effectuées sur le site pour confirmer ou modifier ces connaissances. Étant donné que l'état de contrainte est une variable de très grande importance dans la disposition et la conception du stockage, la détermination, très tôt, de cette variable, c'est à dire dès les travaux exploratoires préliminaires d'accès à la ZIRA, devrait être considérée comme une haute priorité. En ce qui concerne ces mesures, il sera d'une importance cruciale pour l'Andra de démontrer que tous forages d'exploration dans la ZIRA ou à proximité peuvent être scellés, seront scellés, et donc ne nuiront pas à l'intégrité de la formation hôte.

Ce qui devient extrêmement clair à partir des études approfondies réalisées par l'Andra sur ce sujet, c'est que la question de la pression interstitielle est un problème extrêmement difficile et complexe,²³⁶ qui influence de nombreuses variables et est, à son tour, affecté par de nombreux phénomènes. Tout indique que, dans l'état actuel de l'art, la compréhension des phénomènes de pression interstitielle acquise à ce jour sera transférable à la ZIRA. On peut supposer que cette question continuera de faire l'objet d'autres recherches approfondies, comme cela semble être nécessaire et approprié.

Tout indique que la recherche qui a conduit à l'estimation des paramètres mécaniques de la roche dans le laboratoire souterrain et dans la zone de transposition est très fiable, approfondie, correspond bien aux modifications dans le détail de la composition de la roche. Cela constitue une excellente base pour estimer les propriétés mécaniques de la roche dans la ZIRA, et nous espérons que ce travail se poursuivra, notamment une fois que de la roche de la ZIRA sera disponible. Une confirmation des propriétés de la ZIRA serait évidemment très souhaitable ou, si des différences significatives dans les propriétés sont découvertes, une réévaluation des analyses et des études fondées sur les hypothèses précédentes deviendrait nécessaire.

4.3 Transférabilité de la recherche sur les scellements dans le laboratoire souterrain à d'autres parties de la zone de transposition, notamment à la ZIRA.

Tout donne à penser que l'Andra a une bonne compréhension préliminaire des similitudes et des différences entre la ZIRA et le laboratoire souterrain, et est donc en mesure de transférer de façon fiable et crédible les résultats du laboratoire à la ZIRA, en tenant compte de toutes les différences importantes.

Nous souhaitons attirer l'attention sur certains engagements prometteurs, ainsi que certaines préoccupations au sujet des études et des analyses sur les scellements dont nous disposons, même si elles ne sont pas directement, ou principalement, ou exclusivement liées à la ZIRA.

²³⁶ Par exemple, voir CNE 2010 pp. 10-11.

Nous attachons une grande valeur à l'essai de scellement proposé (ou au moins envisagé) qui doit être effectué dans le laboratoire souterrain.²³⁷ 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'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*²³⁸ 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.

De nombreuses analyses de scellements, en particulier le « scénario de défaillance des scellements », considère les systèmes de scellement comme des continuums 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.²³⁹ 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.

L'Andra a considérablement réfléchi à la transférabilité des données provenant d'autres sites. Par exemple, l'Andra est consciente qu'un plus large éventail de données peut être transféré dans les premiers stades préliminaires de l'évaluation de la sûreté que dans des stades ultérieurs.²⁴⁰

Plus un « dossier de sûreté » est avancé, moins il est nécessaire d'utiliser directement des informations externes, et plus les données externes, les

²³⁷ Andra 2010b p. 334

²³⁸ Andra 2010a Tome 2

²³⁹ Andra 2005i

²⁴⁰ Mazurek et al. 2008, p. S99. Traduit de l'Anglais.

observations d'ordre général et les conclusions sont utilisées comme des éléments de preuve indépendants et supplémentaires

Nous souscrivons à cette démarche générale. L'Andra est à une phase relativement avancée de l'élaboration de son « dossier de sûreté », notamment si le calendrier de sa demande d'autorisation (en 2015) n'est pas assoupli. Par conséquent, en vertu de ce raisonnement, il serait de moins en moins justifiable de faire appel à des données, essentielles pour faire valoir l'argument en faveur du « dossier de sûreté », provenant d'autres sites.

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.

Le concept fondamental de l'approche de scellement proposée est très solide: des scellements multiples pour isoler les différentes sections du stockage, ainsi que des scellements complets des puits. La redondance dans l'étanchéité proposée est en effet très séduisante.

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 reprises²⁴¹ 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 6.1.22.²⁴²

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 des galeries et des puits d'un stockage en formation argileuse profonde*, il est mentionné très brièvement à la page 75 et de façon un peu plus détaillée dans les pages 95-96²⁴³, mais il ne semble pas être considéré comme un problème sérieux pour la performance des scellements.

²⁴¹ Andra 2005c

²⁴² Andra 2005c Figure 6.1.22 (p. 78)

²⁴³ Andra 2005c pp. 75, 95-96

4.4 Lien entre les aspects de mécanique des roches entrant dans la sélection de la ZIRA et la pertinence des études sismiques sur le terrain dans la zone de transposition.

Les résultats 2010 de la caractérisation sismique 3D de la ZIRA n'étaient pas encore disponibles au moment de la rédaction de cette évaluation. 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 roche comme le constatent de multiples publications de l'Andra. Certaines incertitudes demeurent cependant, en particulier en ce qui concerne l'influence potentielle des petites failles sur la stabilité des excavations, la zone perturbée, les performances de confinement des déchets et d'autres aspects (par exemple les flux d'eau et/ou de gaz, le flux thermique, les propriétés mécaniques). Il est important que l'éventuelle nécessité de mieux caractériser ces failles, dans l'éventualité où elles seraient rencontrées au cours du développement et de la construction du stockage, soit reconnue et traitée.²⁴⁴

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

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.²⁴⁵ 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.

4.6 Examen de la recherche de l'Andra sur la condition de réversibilité sur une longue période de temps (≥ 100 ans).

Il est certes encourageant de constater que l'Andra s'est engagée à poursuivre les recherches sur les perturbations créées par les creusements dans la roche hôte.²⁴⁶ Comme l'a souligné un groupe international d'évaluation par les pairs, « Si l'on considère une période de réversibilité de 200 à 300 ans, l'expérience est limitée pour des périodes aussi longues en ce qui concerne l'entretien et la réparation de structures souterraines ainsi que d'équipements souterrains ». C'est également vrai pour l'observation et la surveillance.²⁴⁷ Nous jugeons certainement encourageant de lire que « l'Andra a identifié les besoins dans ce domaine dans son projet de Programme scientifique et technique 2006-2010 ».²⁴⁸

²⁴⁴ Voir les chapitres 2 et 3 pour la discussion sur les microfissures et les hétérogénéités.

²⁴⁵ Andra 2010a Chapitre 25

²⁴⁶ Autorité Environnementale 2010 p. 7

²⁴⁷ OCDE 2006 p. 55

²⁴⁸ OCDE 2006 p. 55

Il est encourageant que l'Andra reconnaisse et tienne compte de la préoccupation exprimée par la CNE quant aux conséquences potentielles si un stockage restait ouvert pendant une durée très longue (par exemple, au-delà de 100 ans).²⁴⁹ Il serait extrêmement souhaitable que cette question soit abordée de manière plus formelle, et plus en détail.

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 ?

Tout indique, à partir des analyses sismiques 2D précédentes, mais surtout d'une compréhension sédimentologique et géologique approfondie du site, que les caractéristiques géomécaniques/géotechniques de la ZIRA sont comparables à celles du laboratoire. 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.

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

Les performances des revêtements sont essentielles à la fois pendant la phase opérationnelle et pendant la phase de post-fermeture. En outre, les exigences de réversibilité ne pourront être satisfaites que si les revêtements conservent leur intégrité au cours de la période de réversibilité.

Dans le dossier 2005 Argile figure l'affirmation suivante :

Le fluage et le gonflement de l'argilite augmentent ainsi la charge sur le support au sol/le revêtement, ce qui entraîne une augmentation des contraintes dans le revêtement jusqu'à ce que la résistance du béton soit atteinte au bout de quelques milliers à 10 000 années, alors que ses propriétés mécaniques ne sont pas réduites par la dégradation chimique.²⁵⁰

Sur la base de l'expérience passée et de publications en ce domaine, il faut s'attendre à ce que des fissures se développent dans les revêtements en béton, peut-être dans quelques décennies. Par exemple, selon une association de professionnels des tunnels :

Un revêtement en maçonnerie ou en béton non armé est fréquemment fissuré. Dès la mise en œuvre, le béton non armé a tendance à se fissurer en raison du retrait et des sollicitations dues à son propre poids propre, ainsi que des singularités

²⁴⁹ Andra 2010d p. 15, où un rapport de la CNE (CNE 2005) est cité et référencé.

²⁵⁰ Andra 2005e p. 365

rarement évitables telles que les hors profils générant des variations d'épaisseur importantes du revêtement.²⁵¹

Ainsi, que la dégradation chimique intervienne ou non, les propriétés mécaniques du revêtement sont susceptibles de se dégrader à cause de ces fissures ainsi qu'à cause d'autres facteurs environnementaux. Par exemple, le vieillissement du béton, le cycle de désaturation/resaturation, la pression des gaz, et les alternances contrainte/relaxation dues aux variations dans les taux de fluage des argilites auront tendance à affaiblir le revêtement.

Nous sommes aussi particulièrement préoccupés par le développement de fortes contraintes tangentielles dans les revêtements en béton des galeries et dans des alvéoles de stockage des déchets de type B. Les calculs préliminaires pour un cylindre creux épais (tels que les revêtements en béton dans les galeries) montrent qu'une contrainte tangentielle de plus de 60 MPa peut se développer dans un revêtement de 70 cm d'épaisseur dans une galerie d'un diamètre de 7 m, à une profondeur de 490 m. L'importance de la contrainte est légèrement supérieure à la résistance du béton adoptée pour les structures ouvragées.²⁵² En outre, une profondeur de mise en place supérieure à 490 m se traduirait par une contrainte tangentielle proportionnellement plus élevée dans le revêtement. En conséquence, nous recommandons que l'épaisseur du revêtement soit soigneusement analysée de manière à permettre une meilleure marge de sûreté vis-à-vis de la résistance du béton.

L'Andra affirme qu'à cause du fluage de l'argilite et des joints d'argile gonflante, la perméabilité de l'EDZ sera restaurée dans la limite d'un ordre de grandeur, soit d'un facteur dix de la perméabilité de la masse rocheuse. 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 d'un facteur 1000 à 100 000.²⁵³ Il est difficile de croire que la charge/décharge de ces fractures dans la zone perturbée soit un processus élastique. En d'autres termes, il est douteux que la perméabilité de la zone perturbée puisse être sensiblement restaurée pour se rapprocher de sa valeur d'origine. Quels tests ont été effectués (ou conçus) pour démontrer cette cicatrisation quasi totale de fractures ?

Le comportement au fluage de l'argilite est une fonction complexe qui dépend d'au moins trois paramètres tous variables, dans l'espace et dans le temps, dans un environnement de stockage. 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.²⁵⁴ L'interaction de ces facteurs environnementaux et leurs effets sur les performances du stockage semblent avoir été traités de façon plutôt qualitative. En outre, quel que soit le sens de variation de l'un de ces paramètres, un résultat généralement positif est postulé par l'Andra. 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.

²⁵¹ AFTES 1999 Section 2.4 p. 112

²⁵² Andra 2005e p. 361

²⁵³ Andra 2005e p. 350

²⁵⁴ Andra 2005e Encadré 8.3 (p. 354)

La montée en température a un effet antagoniste sur l'effet de désaturation, à savoir l'activation du fluage de l'argilite (encadré 8.3). On comprend peu de choses actuellement sur la combinaison de ces effets opposés, mais pour des augmentations de température limitées les effets de désaturation devraient rester dominants, et devraient donc ralentir le fluage.²⁵⁵

Le processus de pose de scellements d'argile gonflante comprend le creusement de saignées dans la formation à des intervalles choisis dans le but d'interrompre l'écoulement de fluide le long de l'interface revêtement/argilite. Certaines parties du revêtement en béton sont enlevées pour permettre le creusement de saignées à ces intervalles. Cependant, la méthode utilisée pour la suppression de sections du revêtement en béton n'est pas mentionnée. Nous craignons que des dommages mécaniques sur le reste du revêtement soit inévitables dans le cadre de la méthode proposée. Une option consiste à intégrer les saignées (et les scellements associés) en même temps que le revêtement est installé pour éviter d'avoir à enlever des sections du revêtement.

4.9 Observations finales et conclusions.

L'Andra a accompli un effort de recherche remarquable et impressionnant à l'appui de son programme de stockage de Bure. La diversité et l'ampleur des efforts sont remarquables.

Néanmoins, quelques réserves demeurent. Dans l'ensemble, la plus grave, probablement, concerne un optimisme omniprésent dans l'interprétation de phénomènes complexes concernant les performances du stockage. L'exemple le plus frappant, qui revient dans plusieurs rapports, est le postulat que le stockage, sur le très long terme (dans un horizon de temps géologique, c'est-à-dire 1 000 000 années) et sur le très court terme (dans un horizon de temps lié à l'ingénierie, c'est-à-dire de 1 000 années)²⁵⁶, se comporte grosso modo comme un fluide idéal : tous les vides seront fermés et scellés (y compris l'espace vide dans les colis de déchets primaires, l'espace vide dans les colis de déchets mis en place, l'espace vide dans les alvéoles de stockage, les espaces vides dans la roche perturbée, l'espace vide dans les scellements), et toutes les contraintes déviatoriques disparaîtront, c'est-à-dire que le site de stockage reviendra pour l'essentiel à l'état dans lequel il se trouvait avant la construction en ce qui concerne les caractéristiques et le comportement de confinement des déchets. 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

²⁵⁵ Andra 2005e Encadré 8.5 (p. 360)

²⁵⁶ On peut voir ce délai de 1 000 000 d'années par exemple dans Andra 2005d Figure. 3.2.1 (p. 24), un chiffre qui est très similaire à de nombreux chiffres qui illustrent les durées caractéristiques des différents processus importants. Les figures 3.2.1 (p. 26), 3.2.2 (p. 27), 5.1.1 (p. 57), et 5.1.2 (p. 58) de Andra 2005f fournissent d'autres exemples. L'objectif de référence d'un million d'années est défini comme tel dans Andra 2005g pp. 21 et 24, et encore plus explicitement, avec une référence explicite à la pratique internationale, à la p. 186 d'Andra 2005h.

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.

Nous souhaitons tempérer ce constat en reconnaissant explicitement que la plupart de nos commentaires sont basés sur l'examen de documents de synthèse. Nous reconnaissons que nous n'avons pas examiné de nombreux documents plus techniques correspondants qui présentent peut-être des preuves plus convaincantes du postulat remis en cause plus haut.

Nous tenons également à reconnaître explicitement que, de ce point de vue, la sélection de la zone de 100 km² au sein de la zone de transposition semble tout à fait justifiée sur la base de critères scientifiques et techniques solides : un horizon de stockage avec une teneur en argile maximale, raisonnablement proche de la profondeur optimale et situé dans un emplacement central au sein de la formation hôte, c'est-à-dire avec des distances de confinement maximales.²⁵⁷

Nous approuvons clairement l'approche de conception modulaire pour l'implantation du stockage. La séparation par de grandes distances des emplacements de mise en place entre les divers types de déchets améliore considérablement la crédibilité des arguments à l'appui des performances de confinement et d'isolement, même si elle pourrait entraîner un coût supplémentaire considérable. En outre, les multiples composants d'étanchéité à mettre en place entre les différents modules renforcent grandement la confiance dans le confinement à long terme des déchets placés dans ces différents composants modulaires de stockage.

Nous sommes tout à fait d'accord avec l'accent mis, dans la planification et la conception, sur le maintien de la réversibilité et de la récupérabilité. En revanche, nous sommes moins convaincus que les arguments en faveur de la possibilité du maintien de la réversibilité et de la récupérabilité pendant une période très longue, par ex. plusieurs siècles ou même un seul siècle, sont suffisants pour compenser les conséquences des endommagements possibles causés par des excavations ouvertes pendant si longtemps, et nous nous demandons dans quelle mesure les dommages induits pourraient être annulés. Bien que l'Andra présente généralement un tableau extrêmement optimiste de la cicatrisation de la totalité de la structure après la fermeture, cette approche reste très peu convaincante. Les risques de détériorations et de dommages posent la question de savoir s'il serait préférable d'envisager de minimiser les dégâts, par exemple en ne laissant les excavations ouvertes que le temps absolument nécessaire et justifiable. Nous croyons que cette approche fondamentale de la planification du stockage mérite une étude plus approfondie.

²⁵⁷ Le passage des 100 km² aux 30 km² de la ZIRA à l'intérieur de cette zone a été fait sur la base de considérations d'aménagement du territoire et d'insertion locale.

4.10 Références

AFTES 1998	Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain. "L'utilisation du béton non armé en tunnel." [AFTES recommandation GT7R5F1] <i>Tunnels et Ouvrages Souterrains</i> N° 149 (Septembre/Octobre 1998): pp. 387-395. Disponible sur http://www.aftes.asso.fr/commande-recommandation.html . Approuvé du 7 avril 1998. Edition anglaise: "The Use of Plain Concrete in Tunnels." [AFTES recommandation GT7R5A1] <i>Tunnels et Ouvrages Souterrains</i> N° 158 (Mars/avril 2000): pp. 110-118. Traduit en 1999.
AFTES 2000	Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain. <i>AFTES Recommendations for the Design of Sprayed Concrete for Underground Support</i> . [AFTES recommandation GT20R1A1] Paris: AFTES, 2000. Available at http://www.aftes.asso.fr/commande-recommandation.html . Publié à l'origine comme "Conception et dimensionnement du béton projeté utilisé en travaux souterrains." [Recommandation de l'AFTES GT20R1F1] <i>Tunnels et Ouvrages Souterrains</i> n°164 (2001).
AFTES 2005	Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain. "Recommandations de l'AFTES relatives aux AFTES, 2005, Méthodes d'auscultation des ouvrages souterrains. [Recommandation de l'AFTES GT19R2F1] <i>Tunnels et Ouvrages Souterrains</i> - N° 187 (Janvier/février 2005). pp. 10-47. Disponible sur http://www.aftes.asso.fr/commande-recommandation.html .
Andra 2005a	Andra. <i>Le Comportement Mécanique d'Alvéoles de Stockage de Déchets B dans le Temps: Site de Meuse/Haute-Marne</i> . (C.RP.ASMG.03.0110.B) [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, 2 Juin 2005.
Andra 2005b	Andra. <i>L'évolution phénoménologique des galeries d'un stockage et le comportement des radionucléides dans les galeries: Site de Meuse/Haute-Marne</i> . (C.NT.ASIT.04.0014.C) [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, 31 mai 2005.
Andra 2005c	Andra. <i>Scellements et remblais des galeries et des puits d'un stockage en formation argileuse profonde: Site de Meuse/Haute-Marne</i> . (C.NT.AHVL.04.0030.A). [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, 15 juin 2005.
Andra 2005d	Andra. <i>Le Comportement Mécanique des Scellements de Puits dans le Temps: Site de Meuse/Haute-Marne</i> . (C.RP.ASMG.03.0112.A) [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, 16 juin 2005.

Andra 2005e	Andra. <i>Dossier 2005 Argile, Tome: Évolution phénoménologique du stockage géologique</i> . Seconde éd. (Collection les Rapports) [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, décembre 2005. Le numéro du rapport donné dans la version anglaise est: (C RP ADS 04 0025 B) (269)
Andra 2005f	Andra. <i>Le Comportement Mécanique d'Alvéoles de Stockage de Déchets C et de Combustibles Usés dans le Temps: Site de Meuse/Haute-Marne</i> . (C.RP.ASMG.03.0109.B) [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, 3 juin 2005.
Andra 2005g	Andra. <i>Dossier 2005: Les recherches de l'Andra sur le stockage géologique des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue: Résultats et perspectives</i> . (Collection les Rapports) (265) [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, juin 2005. Site Web http://www.andra.fr/download/site-principal/document/editions/265.pdf .
Andra 2005h	Andra. <i>Dossier 2005 Argile: Synthèse: Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse</i> . Seconde éd. (Collection les rapports) (266 B) [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, décembre 2005.
Andra 2005i	Andra. <i>Rapport de synthèse des calculs de sûreté du dossier argile 2005 – Scénario d'Evolution Altérée (S.E.A.) “Défaut de scellement” - Calculs de référence et de sensibilité – Schémas de calculs, hypothèses, données et résultats</i> ” Andra C.RP.ACSS.05.0010, Mai 2005. [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, décembre 2005.
Andra 2009a	Andra. <i>Stockage réversible profond: Proposition d'une zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie et de scénarios d'implantation en surface</i> . (C.RP.ADP.09.0035.A) [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, 30 octobre 2009. Liens sur le web à http://www.andra.fr/andra-meuse/pages/fr/menu18/la-demarche-d-implantation/2009---une-nouvelle-etape-vers-le-choix-du-site-6662.html . Sur le Web à http://www.andra.fr/download/andra-meuse-fr/document/proposition_zira_C-RP-ADP-09-0035A.pdf .
Andra 2009b	Andra. <i>Proposition de l'Andra: Démarche d'implantation du projet de centre de stockage géologique profond</i> . (C.TR.ADP.09.0038.A) [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, 9 novembre, 2009. Site Web http://www.andra.fr/download/site-principal/document/actualites/ctradp090038-a.pdf .
Andra 2009c	Andra. <i>Réponses de l'Andra aux questions posées par la Commission «localisation» du Comité local d'information et de suivi</i> . (C.NT.ADP.09.0037.A) [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, 2 novembre 2009. Site Web www.clis-bure.com/pdf/commissions/reponse%20andra%20localisation.pdf .

Andra 2010a	Andra. <i>Référentiel du Site Meuse/Haute-Marne</i> . (C.RP.ADS.09.0007.B) [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, 29 Janvier 2010.
Andra 2010b	Andra. <i>Options de sûreté du stockage en formation géologique profonde</i> . (C.NT.ASSN.09.0029.B) [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, 26 février 2010. Titre courant: JALON 2009 HA-MAVL.
Andra 2010c	Andra. <i>2006-2009: 4 ans de recherches scientifiques à l'Andra pour les projets de stockage</i> . [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, juin 2010. Site Web at http://www.andra.fr/download/site-principal/document/editions/383.pdf .
Andra 2010d	Andra. <i>Options de réversibilité du stockage en formation géologique profonde</i> . (C.NT.AHVL.09.0005.B) [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, 10 mars 2010.
Andra undated	Andra. <i>Scientific and Technical Programme HAVL – Argile (HLLL-Clay) 2006-2010</i> (draft, provisional version A, 96 pp.) [undated] (as referenced in OECD, 2006, p. 71)
Autorité Environnementale 2010	Autorité Environnementale. <i>Avis délibéré de l'Autorité environnementale concernant le renouvellement de l'autorisation d'exploitation du laboratoire de recherche souterrain de l'ANDRA à Bure (Meuse)</i> . (Avis n° 2010-27) (Dossier SIGMANET n°007334-01). La Défense: AE, Conseil général de l'environnement et du développement durable, 22 juillet 2010. SiteWeb http://portail.documentation.developpement-durable.gouv.fr/documents/cgedd/007334-01_avis-delibere_ae.pdf .
BGR 2007	<i>Final Disposal of Radioactive Wastes in Deep Geological Formations of Germany - Investigation and Evaluation of Argillaceous Rock Formations</i> , Site Web http://www.bgr.bund.de/cln_116/nn_335074/EN/Themen/Geotechnik/geotechnik_node_en.html?nn=truehttp://www.bgr.bund.de/nn_335086/EN/Themen/Geotechnik/Downloads/WasteDisposal_HostRockFormations_en,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/WasteDisposal_HostRockFormations_en.pdf .
Bock et al. 2010	Helmut Bock, Helmut, Boris Dehandschutter, C. Derek Martin, Martin Mazurek, and Antoine de Haller, Frédéric Skoczylas, and Catherine Davy. <i>Self-sealing of Fractures in Argillaceous Formations in the Context of Geological Disposal of Radioactive Waste: Review and Synthesis</i> . (Radioactive Waste Management) (NEA No. 6184) Paris: Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-Operation and Development, 2010. Site web at http://www.nea.fr/rwm/reports/2010/nea6184-self-sealing.pdf .

CNE 2005	CNE. <i>Rapport d'Évaluation N° 11</i> . [Paris]: Commission nationale d'évaluation relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs, Instituée par l'article L 542 du Code de l'environnement issu de la loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991, juin 2005. Lien sur le Web à http://lesrapports.ladocumentationfrancaise.fr/BRP/054000461/0000.pdf .
CNE 2010	CNE. <i>Rapport d'Évaluation N° 4</i> . [Paris]: Commission Nationale d'Évaluation des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs instituée par la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006, juin 2010. Lien sur le Web à http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/104000323/index.shtml . Site Web at http://lesrapports.ladocumentationfrancaise.fr/BRP/104000323/0000.pdf .
Duffaut 2003	Pierre Duffaut, ed. <i>Manuel de mécanique des roches, Tome 2: Les applications</i> , par le Comité français de mécanique des roches. Paris: École des mines de Paris, 2003.
Giot et al. 2006	Richard Giot, Richard, Albert Giraud, and Françoise Homand. "Three-dimensional finite element modeling of stress relaxation tests in anisotropic clayey medium: direct problem and back analysis," <i>Geotechnical and Geological Engineering</i> 24 (2006): pp. 919-947.
GNR FORPRO-II 2010	GNR FORPRO-II. <i>Appel d'offres 2010-II</i> . [Paris?]: Groupement de Recherche CNRS – ANDRA (GNR FORPRO-II du programme interdisciplinaire PACEN). Site Web webdr.dr2.cnrs.fr/IMG/pdf/Appel_d_offres_FORPRO_2010-II-1.pdf .
Groupe interministériel «Bure» 2010	Groupe interministériel «Bure». <i>Rapport de synthèse sur le projet français d'un stockage géologique de déchets nucléaires et ses implications pour le Luxembourg</i> . Luxembourg: Le Groupe, le 26 janvier 2010. Site Web http://www.ms.public.lu/fr/activites/radioprotection/protect-popul-nucleaire/coop-nat-internationale/rp_rapport_groupe_bure_final.pdf .
Haack et al. 1995	A. Haack, J. Schreyer, and G. Jackel. "State-of-the-art of Non-destructive Testing Methods for Determining the State of a Tunnel Lining: Report to ITA Working Group on Maintenance and Repair of Underground Structures," <i>Tunnelling and Underground Space Technology</i> 10 (4) (1995): pp. 413-431.
IEER 2005	Institute for Energy and Environmental Research. <i>Examen critique du programme de recherche de l'ANDRA pour déterminer l'aptitude du site de Bure au confinement géologique des déchets à haute activité et à vie longue: Rapport final</i> , Préparé pour le Comité Local d'Information et de Suivi; Directeur du projet: Arjun Makhijani; Coordinatrice du projet: Annie Makhijani; Auteurs du rapport (par ordre alphabétique): Detlef Appel, Jaak Daemen, George Danko, Yuri Dublyansky, Rod Ewing, Gerhard Jentzsch, Horst Letz, Arjun Makhijani. Takoma Park, Maryland, IEER, 27 décembre 2004, avec corrections 11 janvier 2005. Lien sur le Web à http://www.ieer.org/reports/bure/1204index.html .

Jacobi 1981	O. Jacobi. <i>Praxis der Gebirgsbeherrschung</i> . 2nd ed. Essen: Glückauf, 1981. Translation of title: Practice of Ground Control.
Massman et al. 2009	Jobst Massman, Shin-ichi Uehara, Amel Rejeb, and Alain Millard. "Investigation of desaturation in an old tunnel and new galleries at an argillaceous site," <i>Environmental Geology</i> 57 (2009): pp. 1337-1345.
Mazurek et al. 2008	Martin Mazurek, Andreas Gautschi, Paul Marschall, Georges Vigneron, Patrick Lebon, Jacques Delay, "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," <i>Physics and Chemistry of the Earth</i> , 33 (2008), pp. S95–S105.
OCDE 2006	OECD. <i>Safety of Geological Disposal of High-level and Long-lived Radioactive Waste in France: An International Peer Review of the "Dossier 2005 Argile 2005" Concerning Disposal in the Callovo-Oxfordian Formation</i> . (Radioactive Waste Management) (NEA No. 6178) Paris: Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-Operation and Development. Sur le Web http://www.nea.fr/rwm/reports/2006/nea6178-argile.pdf .
Seedsman 1993	Ross W. Seedsman. "Characterizing Clay Shales." In <i>Comprehensive Rock Engineering, Volume 3: Rock Testing and Site Characterization</i> , John A. Hudson, Volume Editor and Editor-in-Chief, (Oxford, Pergamon Press, 1993), Chapter 7, pp. 151-165.
Young et al. 2005	R.P. Young, D.S. Collins, J. Hazzard, A. Heath, W.S. Pettitt, C. Baker, D. Billiaux, P. Cundall, D. Potyondy, F. Dedecker, C. Svemar, P. Lebon. <i>Seismic Validation of 3-D Thermo-mechanical Models for the Prediction of the Rock Damage around Radioactive Waste packages Packages in Geological Repositories – SAFETI, Final Report</i> . (EUR 21925) (Nuclear science and technology) [Brussels]: Directorate-General for Research, Euratom, European Commission, 2005. Lien sur le Web à http://cordis.europa.eu/search/index.cfm?fuseaction=lib.document&DOC_LANG_ID=EN&DOC_ID=78493291&pid=0&q=5DD13ACA4D98AD0663837EA4901FF055&type=adv .

Chapitre 5 : Aspects thermiques

Point forts

1. Les méthodes de mesures utilisées par l'Andra sont crédibles et jugées aptes à évaluer correctement les propriétés thermiques, même dans une roche anisotrope, comme de l'argilite sédimentaire caractérisée par une conductivité thermique légèrement plus faible perpendiculairement que parallèlement à la stratification.
2. En règle générale, les propriétés thermiques mesurées le long des couches sédimentaires, à partir de méthodes différentes et pour différents types de roches, qui sont présentées dans des figures du Dossier 2005 Argile concordent bien. Les résultats pour l'argilite du Callovo-Oxfordien, la roche la plus près des sources de chaleur, dont l'influence sur le pic thermique est la plus importante, revêtent une importance particulière.
3. L'anisotropie de la conductivité thermique de l'argilite est un détail extrêmement important lorsque l'on réalise des calculs thermiques prédictifs. Nos analyses démontrent qu'une valeur isotrope « équivalente » (par exemple, la moyenne géométrique) peut-être utilisée pour obtenir une réponse thermique suffisamment « équivalente ».
4. Le modèle thermique du Dossier 2005 Argile, pour la température de l'argilite en interface avec un colis CU1 peut être raisonnablement corroboré par des modèles alternatifs, mais il subsiste des différences de l'ordre de 10 % à 15 %.

Conclusions

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. La piste s'arrête en de nombreux endroits; par conséquent la présentation des résultats et les conclusions présentées dans les documents manquent de transparence.
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.
3. L'utilisation de données puisées dans la littérature ouverte au public 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).
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.
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.

Recommandations

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.

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

La désintégration radioactive de certains types de déchets mis en place dans le site de stockage proposé génèrera de la chaleur qui, à son tour, chauffera la roche hôte environnante conduisant à un changement de température transitoire. Un important objectif de conception consiste à limiter l'augmentation de la température de façon à ce que la température de l'argilite (ou la température de l'argile gonflange, si c'est le cas) reste inférieure à une limite prescrite. Lorsque la température se rapproche ou dépasse 100 °C, les processus couplés peuvent évoluer et avoir un impact néfaste sur la performance du stockage. Cette évaluation consiste en un bref examen des analyses de l'Andra et des calculs sélectionnés. Quand cela s'est avéré nécessaire, nous avons tenté de mettre en évidence les problèmes potentiels.

5.1.1 Les scénarios de mise en stockage

Le site de stockage proposé est nécessaire pour accueillir divers types de matières radioactives selon le Dossier 2005 Argile.²⁵⁸

- Déchets de type B de moyenne activité avec un dégagement de chaleur négligeable;²⁵⁹
- Déchets retraités de type C de haute activité avec un taux considérablement élevé de dégagement de chaleur en fonction de leur âge et de leur composition,²⁶⁰ et

²⁵⁸ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 14

²⁵⁹ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 46

²⁶⁰ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 47

- 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.²⁶¹

Aujourd'hui, l'Andra n'est pas tenue de prendre en considération la mise en stockage en l'état du combustible usé non retraité, seulement celle des déchets de type B et C. Néanmoins, il a été reconnu que, selon les décisions politiques futures, des combustibles uranium et MOX irradiés pourraient, un jour, être destinés à un stockage en l'état. Dans ce chapitre, nous abordons la question du combustible usé dans ce contexte, d'autant plus qu'il peut présenter, du point de vue thermique, certaines des questions les plus complexes.

Quatre scénarios, (1) à (4) sont considérés dans le Dossier 2005 Argile concernant le type et la composition des matériaux à évacuer :²⁶²

(1) **Le scénario S1a** suppose que tout le combustible irradié généré par les centrales nucléaires françaises actuellement en exploitation sera retraité (45000 tonnes de métal lourd (tML), comprenant 8000 tML de UOX1, 20500 tML de UOX2, 13000 tML de UOX3, 800 tML d'URE et 2700 tML de MOX). Ce scénario traite seulement des déchets vitrifiés et des déchets de type B.

(2, 3) **Les scénarios S1b et S1c** supposent tous les deux que les 42300 tML de UOX / URE seront retraités. Toutefois, il est sous-entendu que le MOX irradié (2700 tML) ne le sera pas, et nécessitera un stockage en l'état. Dans le scénario S1b, on attribue une puissance thermique plus élevée aux colis de déchets vitrifiés qu'aux colis de déchets déjà produits. Dans le scénario S1c, leur puissance thermique est équivalente à celle des colis de déchets déjà produits. Ce scénario traite du stockage des déchets B, des déchets vitrifiés ainsi que du stockage en l'état du combustible nucléaire irradié.

(4) **Le scénario S2** suppose une évacuation des combustibles UOX et MOX irradiés, sans retraitement au-delà de 2010. Le retraitement partiel du combustible UOX usé est pris en compte jusqu'à 2010 (8000 tML de UOX1 et 8000 tML de UOX2). Au-delà de 2010, le stockage direct est supposé pour 29000 tML avec 12500 tML de UOX2, 14000 tML de UOX3, 500 tML de URE et 2000 tML de MOX. Ce scénario couvre le stockage des déchets B, C et du CU. Nous sommes conscients du fait que ce scénario est obsolète, puisque la France continue à retraiter alors que 2011 a déjà débuté. Une de nos recommandations demande qu'il soit mis à jour.

En 2009, dans une mise à jour du terme source, l'Andra décrit deux scénarios de base. Elle déclare également qu'un autre scénario qui comprend un stockage du combustible usé « pourrait être défini » :

- un scénario de base « SB », avec ajout de marges quantitatives par rapport au scénario des exploitants nucléaires. Par précaution, ce scénario inclut également des déchets dont la filière de gestion n'est pas encore définitivement arrêtée.... ;

²⁶¹ Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 47

²⁶² Dossier 2005 Argile, Synthèse p. 44

- un scénario de dimensionnement « SD ». Il ajoute au scénario de base, pour certaines familles de déchets, une marge de dimensionnement supplémentaire, fixée conventionnellement à + 50 %. Cette marge couvre (i) un éventuel allongement de la durée d'exploitation du parc engagé, (ii) l'exploitation et la déconstruction d'installations futures (prototype de réacteur de quatrième génération par exemple), (iii) des aléas sur les opérations de déconstruction. Par ailleurs, un scénario alternatif « SA » pourra être défini en support aux études exploratoires sur le stockage direct de combustibles usés non traités, prévues par le PNGMDR. Ces études auront pour objectif de vérifier que l'architecture de stockage projetée ne présente pas de caractère rédhibitoire vis-à-vis d'un éventuel abandon du traitement des combustibles usés.²⁶³

Nous recommandons que l'élaboration d'un scénario comprenant le stockage direct du combustible usé soit définie le plus vite possible.

Les déchets C ainsi que les combustibles usés dégagent une chaleur importante qui doit être dissipée dans la roche tout en maintenant une différence modérée entre la température des alvéoles et celle de la température ambiante des zones dans le champ lointain. L'objectif est de maintenir la température de la roche en-dessous du point d'ébullition pendant toute la durée de fonctionnement. Par conséquent, les considérations thermiques doivent faire partie de la conception du stockage et des critères de sélection de la zone de dissipation de chaleur, liée à la taille de la ZIRA.

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

Le programme expérimental à l'appui de la conception du site de stockage est-il adéquat ? La taille du site de stockage maintenant envisagée est-elle acceptable compte tenu des propriétés thermophysiques acquises à partir des mesures en laboratoire et sur le terrain et des évolutions possibles de la politique de retraitement ? Ces questions peuvent devenir critiques en ce qui concerne les dimensions du site de stockage dans l'éventualité où il deviendrait nécessaire d'évacuer le combustible usé (c'est-à-dire les combustibles usés CU1 et CU2). Des calculs de cadrage ont été faits pour étudier la sensibilité de la température cible à la conductivité thermique de la roche hôte du site, le paramètre privilégié dans l'évolution du champ de température sous la charge thermique causée par la décroissance radioactive.

Ces calculs sont faits dans le contexte incertain de la politique future du retraitement. Bien que la France continue à retraiter le combustible usé d'uranium, il n'existe pas de politique exigeant le retraitement du MOX. Il existe aussi une accumulation importante de combustible d'uranium usé non retraité provenant de la production passée d'électricité, car la totalité des combustibles de cette nature n'a pas été retraitée. Pour le moment, la France envisage de retraiter la totalité du combustible usé à l'avenir, mais il est difficile de savoir combien de temps cela pourra se faire si l'énergie nucléaire se développe ou si des pressions financières pour réduire les coûts de l'électricité s'accroissent. Notons que le traitement du combustible usé déchargé des réacteurs à eau légère coûte près de deux fois plus que le simple entreposage du combustible irradié sur

²⁶³ Andra 2009, Colis p. 14

site.²⁶⁴ Nous recommandons vivement que l'Andra développe un scénario plausible avec une composante importante d'évacuation du combustible irradié en même temps que l'élimination des types de déchets C et B. Nous avons effectué des calculs indicatifs de température sur un colis de combustible irradié de type CU1 pour illustrer l'importance de développer une version actualisée du scénario S2.

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

Les données d'entrée du modèle ont été trouvées dans le Dossier 2005 Argile et d'autres documents de référence.²⁶⁵ La disposition géométrique d'un colis de type CU1 (long) est illustrée à la Figure 5-1. Le domaine du modèle est délimité par des surfaces adiabatiques, avec une répétition du bloc dans les directions x et y. Pour une étude de courte durée, cette hypothèse est généralement acceptée. En effet, la température maximale sera atteinte après quelques décennies, au cours desquelles la profondeur de pénétration du flux de chaleur n'est que de quelques dizaines de mètres, et reste très localisé au voisinage du colis. On estime que le bloc adiabatique d'un colis est une bonne approximation pour de nombreux colis de même type dans un motif répété à l'infini dans le plan horizontal. En effet, les limites adiabatiques signifient exactement cela : une distribution plane et uniforme de sources de chaleur répétées. Les zones non chauffées autour des galeries d'accès et de ventilation auront indubitablement un effet de bordure, mais cet effet ne se fera pas sentir pendant des décennies, une hypothèse utilisée dans le calcul d'investigation préliminaire.

Les paramètres d'entrée du modèle sont résumés dans le Tableau 5-1 ci-dessous. Nous avons utilisé le code numérique NUFT²⁶⁶, une version à usage plus simple du modèle de la famille TOUGH, en supposant uniquement un modèle de conduction. La masse rocheuse est considérée anisotrope en matière de conductivité thermique, $k_z = 1,3 \text{ W/(m-K)}$ dans la direction verticale et $k_x = k_y = 1,9 \text{ W/(m-K)}$ dans les directions horizontales. A titre de comparaison, un modèle de conduction isotrope est également inclus en supposant que la conductivité thermique moyenne est de $k_x = k_y = k_z = 1,6742 \text{ W/(m-K)}$ dans toutes les directions avec une valeur géométrique moyenne de $K_{\text{avg}} = (k_x * k_y * k_z)^{0.333}$. Il est tout à fait possible de rencontrer une conductivité thermique de $1,6742 \text{ W/(m-K)}$ avec une incertitude de $\pm 0,37$, une valeur acceptable en raison de la fourchette des valeurs de conductivité trouvées dans de nombreux documents de l'Andra.

Les propriétés thermophysiques de l'argile gonflante de type MX80 sont présentées dans le Tableau 3.4.1 de *La Charge thermique d'un stockage: Site de Meuse/Haute-Marne*.²⁶⁷ La conductivité thermique montre une forte variation avec la saturation, S ²⁶⁸ et peut s'écrire :

$$\lambda = \lambda_0 + (\lambda_s - \lambda_0) * S, \quad (5-1)$$

Où

²⁶⁴ Von Hippel 2007

²⁶⁵ Dossier 2005 Argile, Architecture ; Plötze et al. 2007 ; Tang et al. 2007

²⁶⁶ Nitao 2000

²⁶⁷ Andra 2005, Thermique Tableau 3.4.1

²⁶⁸ Andra 2005, Thermique Section 3.4.1

λ_0 est la conductivité thermique à l'état sec ($S = 0$)

λ_s est la conductivité thermique à l'état saturé ($S = 1$)

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. Des conditions de désaturation totale pour la MX80 pourraient se produire au voisinage des colis CU au cours de la période de l'évolution du pic thermique. En utilisant $\lambda_s = 1,5$ quand $S = 1$ et $\lambda = 1,2$ quand $S = 0,8$ dans l'équation. 5-1, k_0 peut être calculé comme suit:

$$1,2 = \lambda_0 + (1.5 - \lambda_0)*0,8 \quad (5-2)$$

$\lambda_0 = 0$ est obtenu de l'équation (5-2), ce qui est tout à fait irréaliste, donnant l'équation suivante:

$$\lambda = 1,5*S \quad (5-3)$$

L'équation (5-3) fournit une valeur de $\lambda = 0,3$ W/(m-K) pour un degré de saturation de 20 %, une valeur proche des données publiées pour la bentonite sèche.²⁶⁹ Plutôt que d'utiliser cette faible valeur, la moyenne des valeurs des propriétés thermophysiques de la bentonite dans la littérature a été utilisée.²⁷⁰ La valeur la plus réaliste pour la conductivité thermique pourrait se situer autour de 0,75 W/(m-K). L'Andra a utilisé une valeur minimale de 1,2 (W/m-K) pour la conductivité thermique de la bentonite en supposant que (i) la saturation initiale sera élevée (environ 70 à 80 %), (ii) la température restera toujours en-dessous de 100 °C, et (iii) la resaturation à 100 % se fera sans que la température ne dépasse jamais 100 °C.²⁷¹ Ces conditions pourraient s'appliquer aux déchets HAVL. Cependant, une faible saturation dans les 100 premières années pourrait ne pas s'appliquer au stockage du combustible irradié, comme indiqué par les calculs ci-dessous. Nous avons aussi examiné l'effet de la valeur haute de 1,2 W/(m-k) (à $S = 0,8$) pour comparer avec les résultats de l'Andra. Ces valeurs, associées à d'autres propriétés sont énumérées dans le Tableau 5.1.

La Figure 5-2 montre les résultats du comportement de la température, obtenus à partir des deux modèles, sur 200 ans après la mise en place des colis. La différence entre les résultats des modèles isotropes et anisotropes atteint jusqu'à 8 °C pour les valeurs maximales, indiquant une sensibilité importante aux conductivités et à l'anisotropie. C'est une constatation significative en ce sens que la nécessité de choisir des valeurs anisotropes de conductivité se trouve renforcée, en dehors de la question de la mise en stockage ou non du combustible usé. Quand une conductivité

²⁶⁹ Plötze et al. 2007; Tang et al. 2007

²⁷⁰ Plötze et al. 2007; Tang et al. 2007

²⁷¹ L'Andra a effectué un travail de recherche considérable sur l'argile gonflante (Andra 2005 Matériaux), notamment sur la conductivité thermique (voir Andra 2005 Matériaux, Figure 4.2.1, par exemple). Le choix de 1,2 W / (m-K) de l'Andra serait raisonnable pour une saturation élevée qui pourrait accompagner l'évacuation des déchets HAVL (Voir aussi Su 2006, p. 69-74.) Cependant une valeur inférieure de la conductivité thermique est indiquée pour la modélisation du combustible usé. Les données fournies - voir la figure 4.2.1 - et les données de la littérature indiquent que la valeur de 0,75 W / (mK) que nous avons utilisée est plus réaliste pour la modélisation du combustible usé. A notre connaissance, l'Andra n'a pas indiqué quelle valeur elle utiliserait pour la bentonite à faible saturation

de la bentonite plus réaliste de 0,75 W/(m-K) est utilisée dans notre modèle, un désaccord d'environ 10 °C apparaît entre les résultats des modèles anisotropes et isotropes, par rapport à la température obtenue par l'Andra.²⁷² 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. Comme illustré, indépendamment de cette question, aucune concordance n'est atteinte.

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. Cette conclusion devrait être vérifiée à l'aide de modèles plus réalistes qui utiliseraient, comme nous l'avons fait, une conductivité thermique anisotrope et une valeur plus réaliste de conductivité thermique de la bentonite.

Une meilleure concordance peut être obtenue avec les résultats de température de l'Andra si une valeur de $\lambda = 1,2$ W/(m-K) associée à 80 % de saturation est utilisée comme indiqué dans la Figure 5-2

Tableau 5-1 Paramètres d'entrée du modèle thermique

Paramètres d'entrée	
Longueur axiale du conteneur de déchets	5,4 m
Diamètre du conteneur de déchets	1,25 m
Diamètre de la galerie	3,3 m
Masse rocheuse:	
Conductivité thermique (anisotrope)	$k_x=1,9, k_y=1,9, k_z=1,3$ W/(m-K)
Conductivité thermique (moyenne)	$k_x = k_y = k_z = 1,6742$ W/(m-K)
C _p	1214 J/(kg-K)
Densité	2390 kg/m ³
Bentonite / gonflement des argiles:	
conductivité thermique	0,75 W/(m-K)
C _p	1200 J/(kg-K)
Densité	1600 (kg/m ³)
Colis de déchets:	
La conductivité thermique (effective)	50 W/(m-K)
C _p (effective)	250 J/(kg-K)
Densité (effective)	8000 kg/m ³
Charge thermique au moment du stockage (colis CU1 long avec 4 assemblages)	1600 W/conteneur (stockage après 60 ans d'entreposage)

Note : C_p est la chaleur spécifique à pression constante

²⁷² Dossier 2005 Argile, Architecture pp. 152 et 249

La Figure 5-3 illustre la variation de la charge thermique en fonction du temps pour un colis de CU1 à partir des données de la charge thermique indiquées dans le Tableau 5-1. Les caractéristiques de décroissance thermique suivent celles de l'Andra.²⁷³

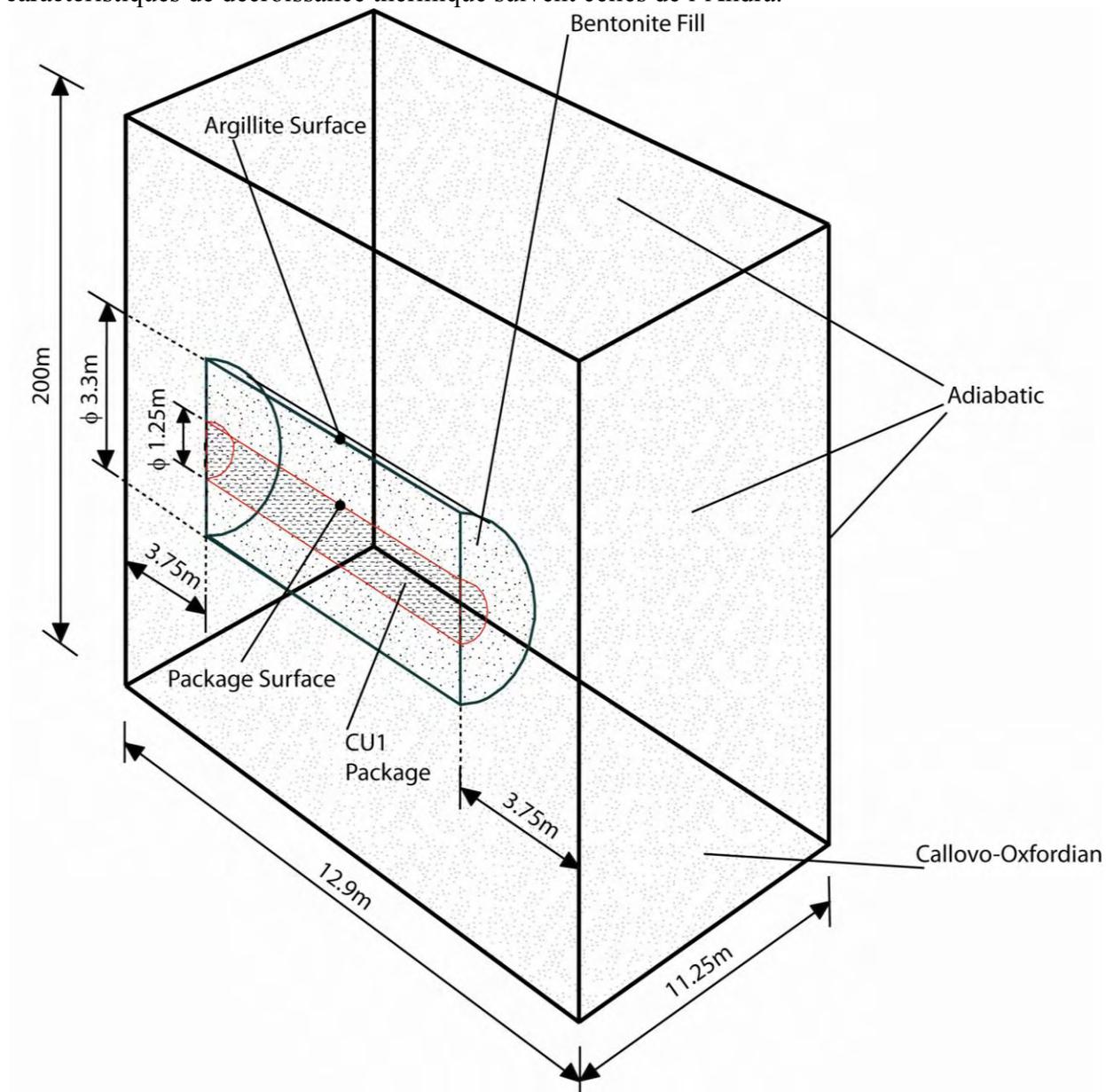


Figure 5-1. Le modèle pour un colis CU1 (Source : G.Danko)

²⁷³ Dossier 2005 Argile, Architecture Figure 3.2.20 (95)

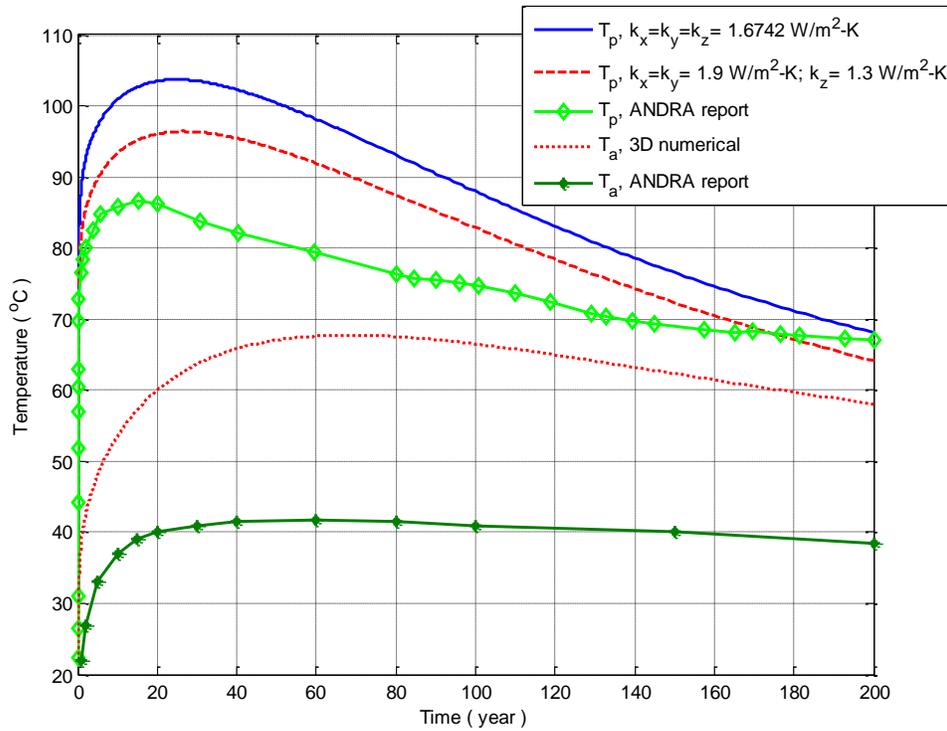


Figure 5-2. Evolution de la température de surface (T_p) d'un colis CU1 en fonction du temps en utilisant différentes propriétés thermophysiques pour l'argilite et l'argile gonflante (bentonite) (Source G. Danko)

Note : La conductivité thermique est indiquée par k au lieu de λ dans la légende.

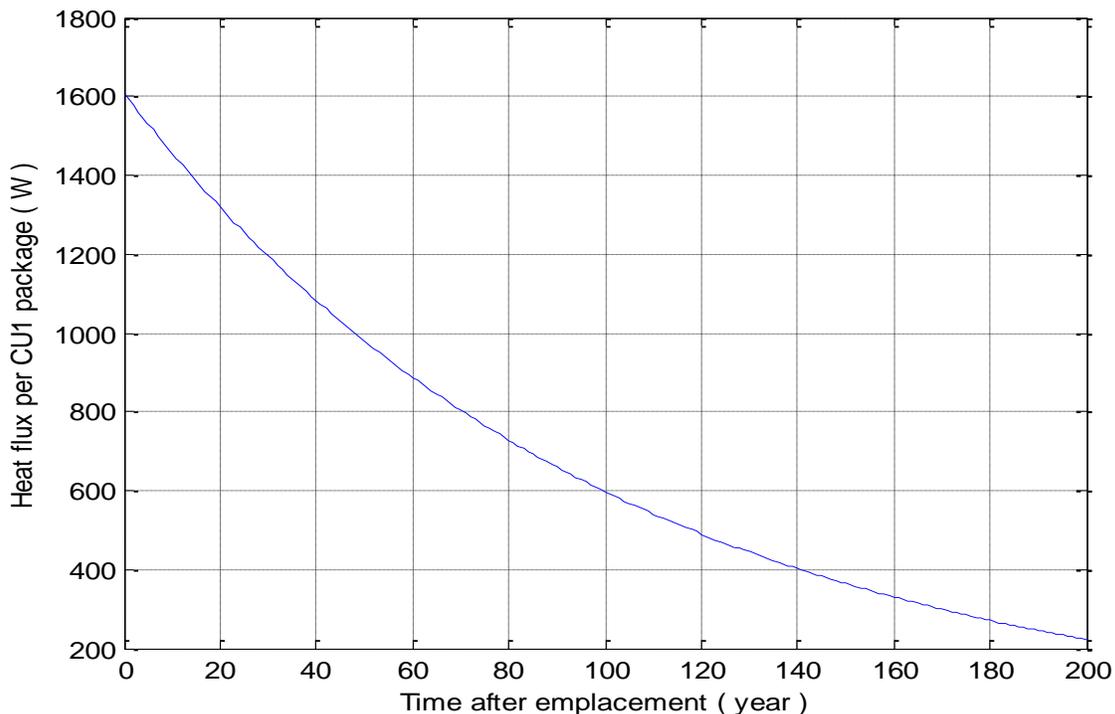


Figure 5-3. Variation de la charge thermique en fonction du temps pour un colis de CU1 (d'après Dossier 2005 Argile, Architecture Figure 3.2.20 (p. 96) (Source: G. Danko)

5.2.2 Les propriétés thermiques de la roche hôte Callovo-Oxfordienne

Les propriétés thermiques de la roche dans la ZIRA affectent la distance entre les colis de déchets générant de la chaleur. La conductivité thermique et la diffusivité sont les principales variables de l'évolution de la température en fonction du temps dans la roche entourant les colis de déchets générant de la chaleur. En général, une conductivité thermique plus basse de l'argilite conduirait à une distance plus grande entre les colis pour un objectif de température maximale dans la roche hôte (ou la bentonite). A ce stade, des incertitudes de 10 % à 20 %, voire plus, de la conductivité thermique sont tout à fait possibles, étant données les fortes variations dans certaines des estimations préliminaires de mesures en laboratoire sur des échantillons de roches, qui ne sont pas nécessairement prélevés dans la ZIRA. La taille de la ZIRA sera-t-elle adéquate si les valeurs mesurées de la conductivité thermique lors de la caractérisation du site sont au bas de la fourchette et/ou l'objectif de capacité de mise en stockage le plus haut possible est exigé pour la conception ?

Il est possible de faire une observation générale sur une question précise ayant trait à la nature anisotrope de la roche hôte sur le site de Bure. Il est important d'utiliser des propriétés thermiques anisotropes pour établir correctement les évolutions de la température maximale dans des zones précises telles que les interfaces de l'argilite ou de l'argile gonflante au cours de la période du pic thermique. Comme l'indique la Figure 5-2, les températures maximales de

l'argilite sont estimées à 96 °C et 104 °C pour les propriétés des matériaux anisotropes et isotropes, respectivement, en supposant une conductivité de 0,75 W/(m-K) pour la bentonite de remplissage dans l'éventualité de l'évacuation du CU1. Par conséquent, la moyenne de la conductivité thermique pour un matériau anisotrope aboutit à des résultats de modélisation numérique erronés. L'utilisation d'un champ 3D de flux de chaleur peut produire une erreur dans la mesure des propriétés thermiques si une modélisation inverse de la fonction de réponse avec un modèle anisotrope n'est pas faite. Trouver trois valeurs se rapportant aux trois directions spatiales d'une propriété thermique est une tâche ambiguë à résoudre à partir d'une seule fonction de réponse. Une itération est donc nécessaire. Cependant, un modèle de cette nature avec un cadre d'évaluation itérative, n'est pas décrit dans les documents.

5.2.2.1 Revue des méthodes de mesure des propriétés thermiques sur des échantillons

L'Andra a tout à fait conscience de l'importance des propriétés thermiques pour le site proposé, et présente dans le *Dossier 2005 Référentiel du Site Meuse/Haute-Marne, Tome 2*,²⁷⁴ une revue complète des méthodes de mesure en laboratoire sur des échantillons de roche.²⁷⁵ Les différentes méthodes de mesures en régime transitoire et en régime permanent sont brièvement décrites et référencées. Les mêmes techniques sont documentées par l'Andra dans un document plus récent de 2009.²⁷⁶ Il y est fait référence aux mesures de la vitesse sonique qui peuvent être empiriquement corrélées avec la conductivité thermique de la roche.

La mesure en régime permanent fournit directement la conductivité thermique, λ , tandis que les méthodes en régime transitoire fournissent d'abord la diffusivité thermique, qui doit alors être convertie en conductivité avec la formule $\lambda = \rho * c_p * a$, où ρ , c_p , et a représentent respectivement la densité, la chaleur spécifique, et la diffusivité thermique. Par conséquent, la chaleur spécifique ainsi que des mesures de densité sont également impliquées dans certaines évaluations de la conductivité thermique. Dans le cas des mesures acoustiques, la conversion en conductivité thermique nécessite des équations de corrélation empiriques propres aux ondes P (pression) et S (cisaillement).

Des exercices de vérification sont cités pour la validation de la méthode « flash » en régime transitoire et de la méthode de la barre divisée en régime permanent. Les résultats de la méthode de la barre divisée et de la méthode flash provenant de plusieurs laboratoires sont globalement comparables. Les différences pour le pyrex et la céramique se situent entre -6,9 et 12,5% à l'exception d'un cas. Pour le laboratoire MeSy les différences vont jusqu'à 41,2%.²⁷⁷ Ces résultats ont été écartés sans recherches complémentaires.

Les méthodes utilisées par l'Andra sont crédibles et jugées susceptibles d'évaluer correctement les propriétés thermiques, même dans une roche anisotrope, comme l'argilite sédimentaire dont la conductivité thermique est légèrement inférieure dans la direction perpendiculaire à la stratification que dans la direction parallèle. Il est possible que la sonde à choc en anneau

²⁷⁴ Référentiel du Site 2005 Tome 2 Chapitre 27

²⁷⁵ Référentiel du Site 2005 Tome 2

²⁷⁶ Référentiel du Site 2010 Tome 2, Chapitre 19

²⁷⁷ Référentiel du Site 2005 Tome 2 Tableaux 27-1 et 27-2 (p. 219)

indiquée à la Figure 19.2²⁷⁸ du Référentiel du Site 2010 Tome 2 soit une technique moins fiable pour mesurer les valeurs spécifiques d'une diffusivité thermique, qui varie suivant la direction dans un milieu non-isotrope. L'anneau chauffant génère un champ de température légèrement semi-sphérique dans l'échantillon situé sous l'anneau, intégrant la conduction de la chaleur dans toutes les directions. En raison du flux 3D de chaleur dans l'échantillon, et de la moyenne des mesures au niveau du capteur ponctuel, cette méthode ne sera pas utile pour distinguer clairement entre les conductivités thermiques dans des directions différentes.

De manière générale, les propriétés thermiques obtenues à partir de différentes méthodes d'évaluation pour différents types de roches le long des couches sédimentaires sont globalement comparables dans un certain nombre de figures des documents du Dossier 2005 Argile. Les résultats pour l'argilite du Callovo-Oxfordien, la roche la plus proche des sources de chaleur et dont l'influence sur les températures maximales est la plus grande, sont particulièrement importants.

Un examen plus approfondi de la conductivité thermique, λ (W(m-K)) dont les résultats pour l'argilite sont présentés dans le Référentiel du Site 2005, Tome 2,²⁷⁹ fournissent l'éventail suivant de résultats à une profondeur entre 460 m et 510 m :²⁸⁰

Echantillons des forages EST104 et HTM102 analysés par la méthode de bar divisée

$\lambda_{\text{perpendiculaire}}$: ~ 1,1 à 1,6, avec huit mesures en dessous de 1,3

$\lambda_{\text{parallèle}}$: ~ 1,4 à 2,2

Echantillons du forage EST205, mesurés à partir de la vitesse sonique

$\lambda_{\text{vitesse sonique}}$: ~ 1,2 à 1,4

Ces valeurs concordent très bien avec celles utilisées dans les modèles thermiques du Dossier 2005 Argile examinés ci-dessus.

Toutefois, des valeurs de $\lambda_{\text{perpendiculaire}}$ quelques peu plus élevées sont présentées pour les mêmes échantillons des forages EST104 dans le document plus récent, Référentiel du Site 2010, montrant côte à côte toutes les données de conductivité thermique et des résultats expérimentaux in situ. La valeur la plus basse $\lambda_{\text{perpendiculaire}}$ des échantillons dans ce document est la suivante:²⁸¹

$\lambda_{\text{perpendiculaire}}$: ~1,22, sans autre résultat mesuré inférieur à 1,3

Ces résultats ne correspondent pas tout à fait à ceux de 2005. Cependant une comparaison est difficile à faire puisque les résultats présentés ci-dessus se rapportaient à deux forages, EST104 et HTM102, alors que ce dernier n'apparaît pas dans le document de 2010. Il aurait été souhaitable de présenter les valeurs de manière à pouvoir faire une comparaison directe.

²⁷⁸ Référentiel du Site 2010 Tome 2 p. 168

²⁷⁹ Référentiel du Site 2005 Tome 2 Figures 27-4 et 27-5 (p. 225)

²⁸⁰ Référentiel du Site 2005 Tome 2 p.225

²⁸¹ Référentiel du Site 2010 Tome 2 p.174

5.2.2.2 Revue des mesures in situ des propriétés thermiques

Les mesures in situ sont importantes pour vérifier la validité de l'extrapolation des résultats des propriétés thermophysiques obtenues sur des échantillons en laboratoire à de grands volumes de roche. Des effets d'échelle, le cas échéant, peuvent être obtenus d'une telle comparaison. Deux expérimentations de mesures in situ sont présentées dans le Référentiel du Site 2005 et le Référentiel du Site 2010 : les expériences TER dans le laboratoire souterrain, et les mesures REP effectuées au cours du fonçage du puits d'accès au laboratoire souterrain. Les mesures de ces deux expérimentations ont été réalisées et évaluées avec rigueur, corroborant les résultats de mesures sur des échantillons de laboratoire. Par conséquent, les effets d'échelle ne semblent pas être un facteur pour les valeurs de conductivité thermique trouvées dans les échantillons ou la masse rocheuse à Bure.

La première présentation des mesures de conductivité thermique in situ pour l'argilite, le matériau le plus critique, se trouve dans Référentiel du Site 2005.²⁸² Les valeurs de la zone comprise entre 460 m et 510 m provenant du forage EST205 sont les suivantes:

$\lambda_{\text{perpendiculaire}}$: 1,1, (deux résultats) et 1,35 (un seul résultat)

$\lambda_{\text{parallèle}}$: 2,0, (un seul résultat)

Les deux valeurs les plus faibles pour $\lambda_{\text{perpendiculaire}}$ sont quelque peu inférieures aux résultats des mesures par onde sonique provenant du forage EST205 mentionné ci-dessus.

Cependant, une relation différente est illustrée dans la Figure 5-4 ci-dessous :

²⁸² Référentiel du Site 2005 Tome 2 Figure 27-5 (p. 225). Les échantillons proviennent du forage EST205.

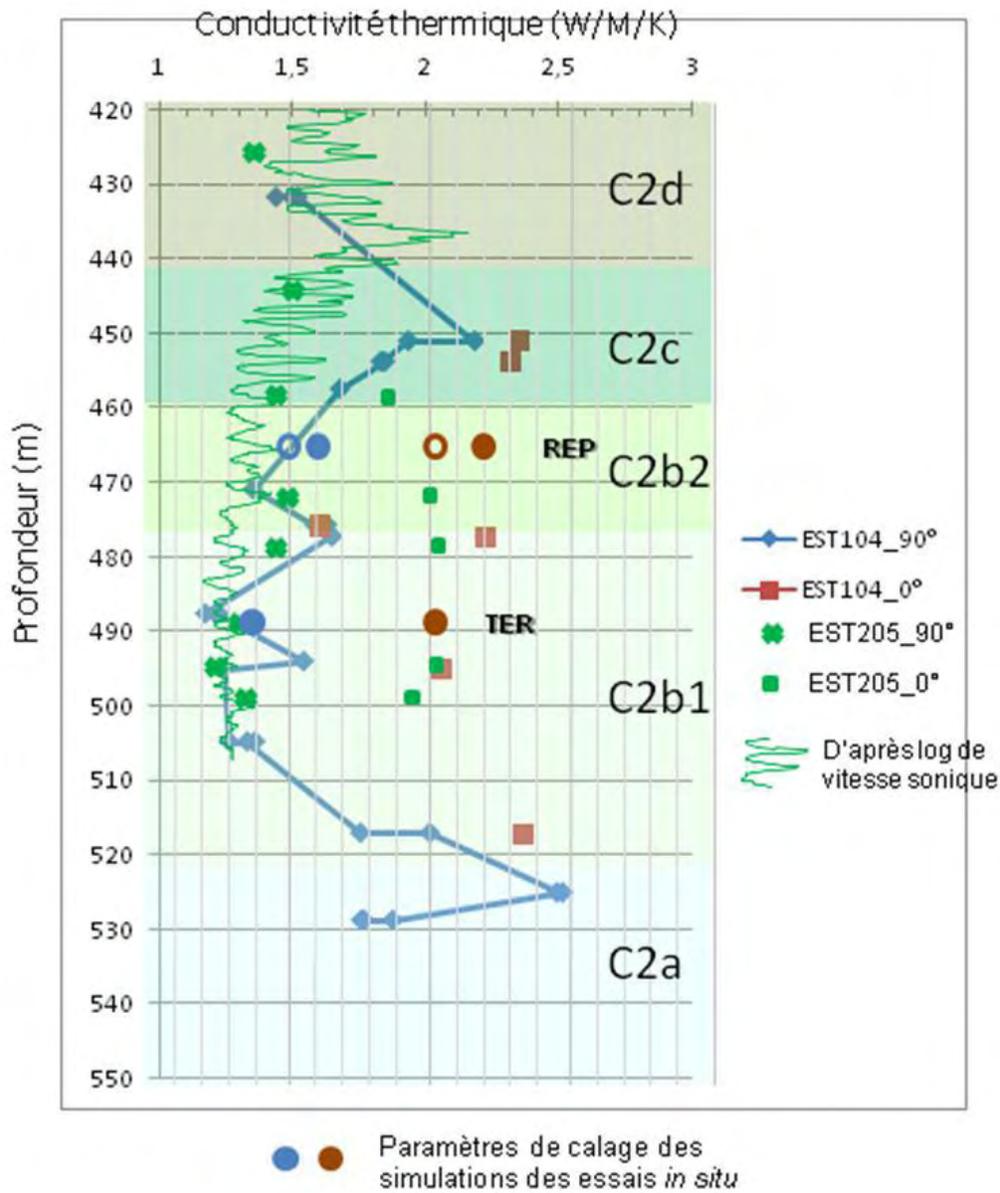


Figure 5-4. Ensemble des données de conductivité thermique obtenues sur le site du Laboratoire souterrain (Source: Référentiel du Site 2010, Tome 2 Figure 19-5 (p. 174))

Les résultats des mesures in situ ne sont plus inférieurs aux valeurs obtenues à partir de la courbe de vitesse sonique qui peut être utilisée comme guide de référence. La différence entre les résultats pour $\lambda_{\text{perpendiculaire}}$ indiquée à la Figure 27-5 du rapport 2005 et dans la Figure 19-5 du rapport 2009 demande à être justifiée.

5.3. Revue des modèles thermiques

5.3.1 Le modèle thermique de l'Andra dans le contexte des calculs de cadrage de la section 5.2.1

Les modèles thermiques sont des outils prédictifs à l'appui du concept initial du site de stockage et pour aider à la préparation du programme de caractérisation du site en vue de confirmer ses propriétés pour la conception finale. Le programme de stockage de l'Andra utilise des modèles thermiques crédibles, bien développés et testés pour définir le concept initial. Les modèles ont la capacité d'intégrer l'anisotropie, l'inhomogénéité, et une saturation variable. Une fois que les propriétés de la roche et que la charge thermique des déchets générateurs de chaleur seront définies, les modèles seront pleinement aptes à prédire l'évolution du champ de température dans les zones de stockage, y compris les interactions avec les processus dans les alvéoles où peuvent se produire un dégagement d'hydrogène et une resaturation différée.

L'Andra continue d'améliorer les modèles numériques pour l'évaluation du flux thermique ainsi que les effets de couplages hydrologique, mécanique, et chimiques qui l'accompagnent. L'application récente du modèle TOUGH²⁸³ témoigne de l'intérêt constant porté à l'amélioration du modèle. Toutefois, pour l'évaluation de la taille appropriée de la ZIRA ou des calculs de sensibilité de l'espacement des colis, une approche de modélisation plus simple est suffisante. Dans les documents, l'Andra a présenté des études simplifiées de cette nature, 2D et 3D, en utilisant les résultats obtenus de modèles antérieurs qui ne tiennent compte que de la conductivité de la chaleur.²⁸⁴

Le problème avec la documentation des résultats vient de son caractère illustratif : elle explique, plutôt qu'elle ne documente les modèles illustratifs d'agencement et les courbes représentatives de température. La tâche de la compréhension des détails techniques et des calculs revient au lecteur ou à l'évaluateur. Il est extrêmement difficile de reconstituer le travail dans un laps de temps raisonnable et de le répliquer avec les informations extraites de la masse des documents avec leurs nombreuses références imbriquées. Ces informations devraient être rassemblées dans un document concis comprenant: (1) la description du modèle, les conditions, les hypothèses; (2) la spécification géométrique, (3) les conditions initiales et aux limites spécifiques à chaque tâche; (4) les propriétés d'entrée pour le matériel pour chaque composant.

Le manque de traçabilité a été l'un des motifs pour procéder à un calcul thermique simplifié indépendant, décrit à la section 5.2.1. Des différences d'environ 20 °C à la surface du colis (Tb) entre les résultats du modèle et les documents de l'Andra sont présentées dans la Figure 5-2 et expliquées ci-dessus. Deux remarques supplémentaires sont proposées pour expliquer l'importance de ces écarts.

Remarque 1 : Les incertitudes relatives à la conductivité thermique de la bentonite. Le modèle thermique utilisé par l'Andra, et référencé dans plusieurs figures,²⁸⁵ indique une température maximum de la bentonite d'environ 20 °C inférieure à celle du modèle de la section 5.2.1. Cette différence peut être due à la différence de la conductivité thermique de la bentonite

²⁸³ Pruess et al. 1999, Poppei et al. 2009 et Popper et al.

²⁸⁴ Dossier 2005 Argile, Architecture, Dossier 2005 Argile, Evolution et Dossier 2005 Argile, Thermique.

²⁸⁵ Voir par exemple: Dossier 2005 Argile, Architecture Figure 4.3.8 (p. 152) ou Figure 5.3.15 (p. 249) pour le colis de CU1 (long).

de remplissage. Par conséquent, la différence de température à la surface des colis pourrait être considérée comme le résultat d'hypothèses de modèle différentes.

Remarque 2 : Autres accords et désaccord des modèles. La température de l'interface (T_a) entre la bentonite de remplissage et l'argilite de la roche hôte dépend peu des propriétés de la bentonite. Par conséquent, elle pourrait être plus appropriée pour comparer les résultats des calculs de cadrage de cet examen à ceux de l'Andra. La Figure 5-6 présente la température de l'argilite, T_a , du modèle de calcul décrit dans la section 5.2.1. Un maximum de 67 °C est atteint aux alentours de 70 ans après la mise en place du colis CU1, après 60 ans d'entreposage. Le rapport de l'Andra *La Charge thermique d'un stockage: Site de Meuse/Haute-Marne* présente un maximum de 42 °C pour la même température de l'interface de l'argilite atteint aux alentours de 70 ans²⁸⁶, qui est censé être une différence de température supérieure à la température initiale ambiante de 22 °C. L'ajout de la température initiale de 22 °C au changement de température de 42 °C prévu par l'Andra donne une température maximale de 64 °C. Il s'agit d'un écart de seulement 3 °C pour la température de l'interface argilite maximum (T_a), ce qui est tout à fait acceptable.

Un modèle analytique numérique, 3 D, simplifié est également utilisé pour confirmer les résultats du modèle numérique de la section 5 2.1 pour la température de l'argilite en utilisant un modèle linéaire de charge thermique.

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

L'objectif du modèle analytique-numérique simplifié est d'étudier plus en détail le caractère raisonnable de l'évolution de la température de l'argilite (T_a) dans le temps, un paramètre considéré comme faiblement affecté par les propriétés thermophysiques de la bentonite. La géométrie du modèle simplifié est illustrée à la Figure 5-5. Cinq galeries sont modélisées avec une charge thermique linéaire à l'infini dans une roche isotrope avec des propriétés moyennées. L'objectif est de prédire la température T_a à la paroi de la galerie au point central du dispositif. Le modèle simplifié utilise une conductivité thermique moyenne de l'argilite de $k = 1,6742$ W/(m-K), et une diffusivité thermique de $a = 5,7702 * 10^{-7}$ m²/s, calculées à partir des propriétés du Tableau 5.1. La charge thermique linéaire, une moyenne de la dissipation de la chaleur du colis sur une longueur de 12,9 m, la distance entre deux rangées de conteneurs, donne $1600/12,9 = 124,03$ W/m au moment de la mise en stockage. Selon les caractéristiques de désintégration de la chaleur avec une demi-vie de 70 ans pour la période de temps de quelques décennies, la charge thermique moyenne linéaire en W/m est la suivante : $q(t) = \exp*124,03 (-t/100,99)$, où t est le temps en années après la mise en stockage.

Un modèle analytique-numérique peut être développé à partir de Carslaw et Jaeger²⁸⁷ pour la température située au centre d'une ligne de charge chauffante, de 200 m de longueur, à la paroi d'un tunnel de 3,3 m de diamètre, tracée dans un milieu infini, en utilisant une solution pour une source de chaleur ponctuelle et une superposition double dans le temps et l'espace. La variation dans le temps est utilisée pour rendre compte de la variation de la charge thermique en fonction

²⁸⁶ Andra 2005, Thermique Figure 5.3.3 (p. 56)

²⁸⁷ Carslaw and Jaeger 1959 p. 261

du temps. La variation dans l'espace est modélisée en tenant compte de sources ponctuelles sur une longueur de 200 m et en ajoutant les résultats des températures partielles à celle du point central à la paroi du tunnel. Deux galeries de stockage voisines de chaque côté de la galerie centrale, d'une distance inter-axiale de 22,5 m et de 200 m de longueur sont également incluses, comme le montre la Figure 5-5. Les galeries voisines contribuent à l'accroissement de la température du point central, cet effet est inclus, par superposition, à la température du point central.

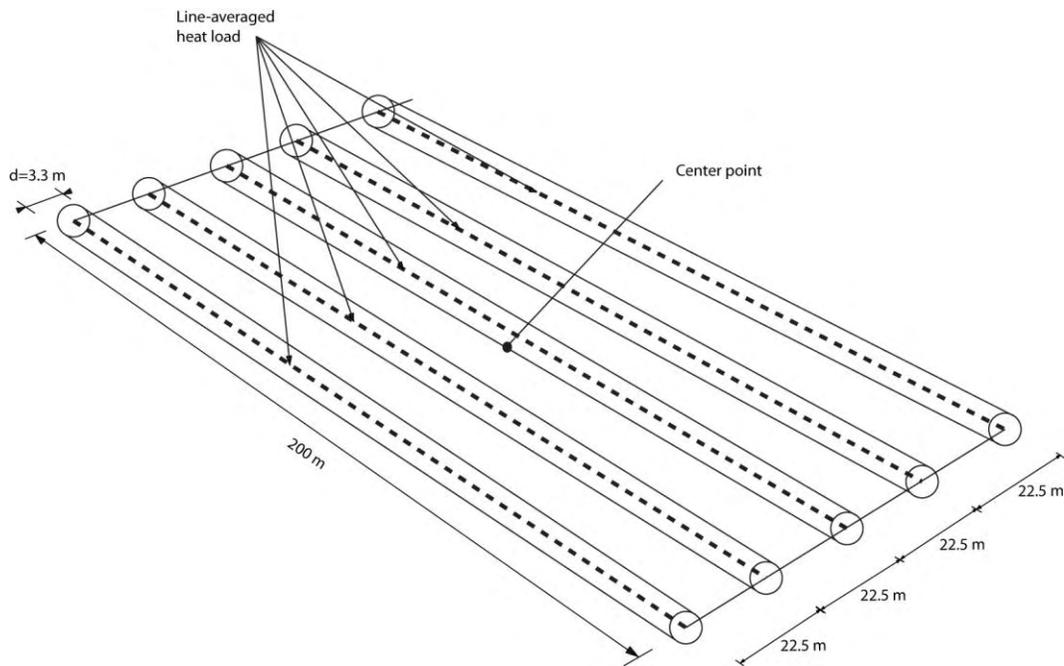


Figure 5-5. La géométrie du modèle de charge thermique linéaire moyenne simplifiée (Source : G.Danko)

La charge thermique linéaire de ces deux galeries voisines ajoute une température incrémentale variable dans le temps, de quelques °C uniquement à la paroi de l'argilite au point central. Cependant, il n'y a aucune raison de modéliser parfaitement l'empreinte du stockage dans cet exercice de confirmation en ajoutant des galeries voisines et des lignes de charge plus longues le long de la galerie. L'augmentation de la température provenant des sources de chaleur lointaines au début de la courte période de 100 ans, qui inclut la température maximale de l'argilite entourant un colis de CU1, est relativement faible.

Le résultat du modèle pour la température de l'interface de l'argilite est illustré à la Figure 5-6 ci-dessous ainsi qu'à la Figure 5.3.3 du rapport *La Charge thermique d'un stockage*.²⁸⁸ L'accord entre les températures du modèle analytique numérique linéaire et celles du modèle de la section 5.2 est excellent pour les premières décennies avec des différences explicables, et encore raisonnables bien que se dégradant progressivement en se rapprochant de 100 ans. Le modèle 3D avec des colis individuels est censé donner une température plus élevée et localisée de l'argilite sur de courtes périodes de temps, alors que le modèle linéaire analytique-numérique de charge

²⁸⁸ Andra 2005, Thermique Figure 5.3.3 (p. 56)

thermique simplifié, avec une surface de charge de chaleur tronquée devrait donner des températures maximales plus basses de l'argilite au fil du temps. En effet, la température maximale à 50 ans est d'environ 66,5 °C, un petit peu en dessous de 68 °C à 70 ans à partir du modèle homogène 3D, et très en dessous de 72 °C à partir du modèle numérique homogène 3D. La sous-estimation relative au modèle numérique 3D avec des colis individuels est une erreur, du fait de l'hypothèse de charge linéaire, pour des raisons de simplicité et de robustesse.

Toutefois, le modèle simplifié confirme parfaitement le modèle 3D sur une courte période de quelques décennies, au cours de laquelle la distance de pénétration visible du flux de chaleur est courte. Les modèles, présentés comme des alternatives, des exercices de vérification, montrent tous les deux que l'évolution de la température de l'argilite est en bon accord avec les résultats du modèle thermique du Dossier 2005 Argile. 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.

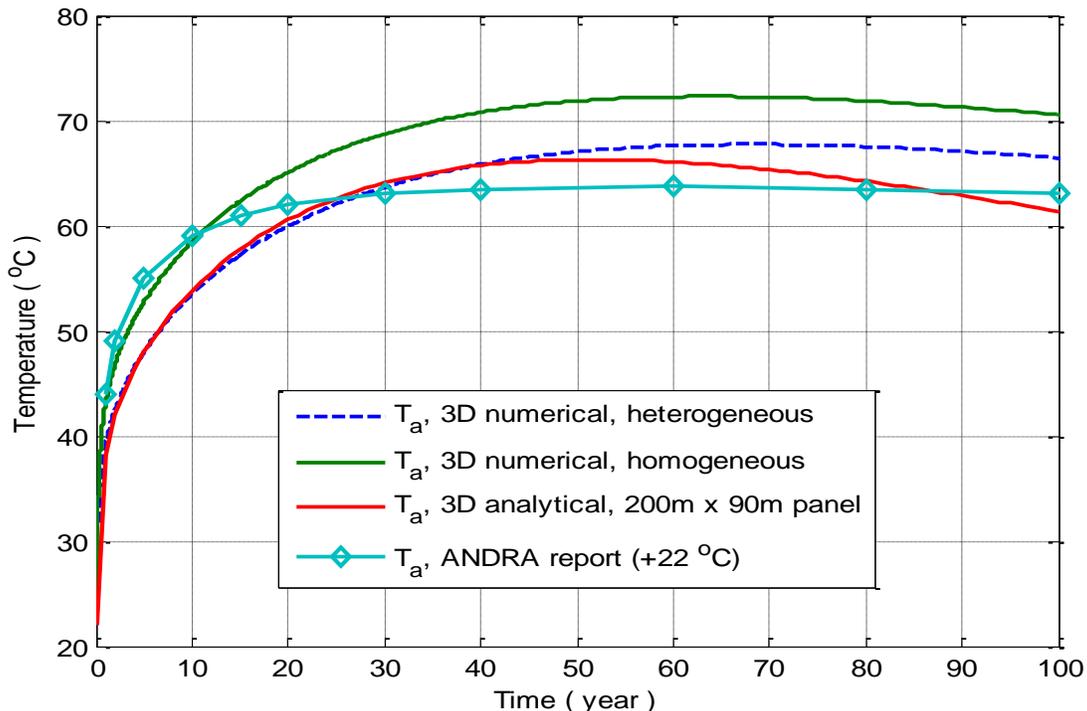


Figure 5-6. Température de l'interface argilite issue de trois modèles (Source : G. Danko). (Source pour la courbe de l'Andra: Andra 2005, Thermique Figure 5.3.3 (p. 56))

Les modèles dans les sections 5.2.1 et 5.3.2 s'appliquent aux propriétés de l'argilite selon les spécifications de l'Andra. La différence entre les températures d'interface ne peut être attribuée qu'à des différences dans le modèle thermique, soit dans les hypothèses, soit dans les conditions ou les paramètres d'entrée. En somme, le modèle thermique de l'Andra 2005 Thermique pour l'interface argilite autour du colis CU1 peut être raisonnablement confirmé par d'autres modèles, mais il subsiste des différences de l'ordre de 10 % à 15 %.

Pour conclure, il peut être parfaitement raisonnable d'accepter de l'Andra les résultats d'une étude illustrative pour montrer le potentiel de son programme, pour convenir que le dimensionnement thermique sera possible lorsque cela sera nécessaire, et de reporter les évaluations détaillées jusqu'à l'actuelle phase de conception.

De toute évidence, une conception ne peut pas être réalisée tant que le terme source n'est pas entièrement spécifié. Il s'agit notamment d'une spécification du nombre de chaque type de colis de déchets qui seront évacués, leur durée d'entreposage préalable et les caractéristiques thermiques des colis. Mais surtout, l'incertitude présente, à savoir si le combustible usé non retraité sera éliminé, doit être abordée et levée.

5.4 Revue des effets thermiques

Nous avons choisi la convection thermique comme l'élément le plus critique pour le transport potentiel de radionucléides dans l'environnement. 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. Des températures localisées plus élevées et des variations de température dans le plan horizontal peuvent engendrer une convection thermique localisée durant le pic thermique.

La Figure 5-6 illustre l'évolution de la température au cours des 100 premières années de la montée thermique, et un désaccord entre notre analyse et le résultat de l'Andra. L'Andra décrit la convection attendue induite par la chaleur.²⁸⁹ L'analyse suppose une température plus basse qui pourrait ne pas être réaliste pour un scénario S2. Par conséquent, la conclusion pourrait ne pas tenir si une température d'entrée différente était utilisée.

Il existe un autre problème qui remet en cause la conclusion de l'analyse donnée par l'Andra.²⁹⁰ L'application des lois d'échelle unidimensionnelle, telle que représentée par le nombre de Rayleigh (Ra) pour estimer la thermoconvection, manque de raisonnement scientifique, car elle est appliquée au champ de température dans le sens vertical. Dans le sens horizontal, la variation de température va générer une force de thermo-convection pour la circulation hydrothermique, pour laquelle le nombre critique de Rayleigh, établi pour un gradient vertical, n'est pas applicable. On pense que tout $Ra > 0$ calculé dans le sens horizontal génère une circulation non nulle verticale, si petite soit-elle, dans un milieu poreux.

²⁸⁹ Dossier 2005 Argile, Thermo-convection

²⁹⁰ Dossier 2005 Argile, Thermo-convection

5.5 Références

Andra 2005, Matériaux	Andra. <i>Référentiel des matériaux d'un stockage de déchets à haute activité et à vie longue – Tome 1 : Matériaux à base d'argile gonflantes.</i> (C.RP.ASCM.04.0015). [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, 17 mai 2005
Andra 2005, Thermique	Andra. <i>La Charge thermique d'un stockage: Site de Meuse/Haute-Marne.</i> (C.NT.ASIT.03.118.C) [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, 14 juin 2005.
Andra 2005, Thermo- convection	Andra. <i>La thermo-convection dans la couche du Callovo-Oxfordien et les formations géologiques encaissantes sous l'effet de la charge thermique d'un stockage Site de Meuse / Haute-Marne.</i> (C.NT.ASTR.03.105.B) [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, 15 juin 2005.
Andra 2009, Colis	Andra. <i>Référentiel de connaissances et modèle d'inventaire des colis de déchets à haute activité et à moyenne activité à vie longue - Partie 1.</i> (C.RP.AHVL.09.0114.A) [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, novembre 2009. Titre courant: <i>JALON 2009 HA-MAVL.</i>
Carslaw and Jaeger 1959	H.S. Carslaw and J.C. Jaeger. <i>Conduction of Heat in Solids.</i> 2nd ed. Oxford: Clarendon Press, 1959.
Dossier 2005 Argile, Architecture	Andra. <i>Dossier 2005 Argile: Tome: Architecture et gestion du stockage géologique.</i> Seconde éd. (Collection Les Rapports) (C.RP.ADP.04.0001) (268 VA) [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, décembre 2005.
Dossier 2005 Argile, Evolution	Andra. <i>Dossier 2005 Argile: Tome: Évolution phénoménologique du stockage géologique.</i> Seconde éd. (Collection Les Rapports) (269 VA) [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, Décembre 2005.
Dossier 2005 Argile, Synthèse	Andra. <i>Dossier 2005 Argile: Synthèse : Evaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse.</i> Seconde éd. (Collection Les Rapports) [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, décembre 2005.
Nitao 2000	J. Nitao. <i>NUFT, Flow and Transport code V3.0s. Software Configuration Management, Yucca Mountain Project – STN: 10088-3.0S-00.</i> [Livermore, CA: Lawrence Livermore National Laboratory, September 2000.
Plötze et al. 2007	Michael <u>Plötze</u> , Ueli <u>Schärli</u> , Andreas <u>Koch</u> , and Hanspeter <u>Weber</u> . "Thermophysical Properties of Bentonite." In <i>Proceedings of Clays in Natural & Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement</i> , 3rd International Meeting, 17.-20.9. 2007 Lille, 2007. Abstract Book, pp.579-580. Sur le Web http://www.andra.fr/lille2007/abstract_lille2007/donnees/pdf/579_580_P_THM E_19.pdf .

Poller et al. 2009	Andreas Poller, Carl Philipp Enle, Gerhard Mayer, Jean Croisé, Jacques Wendling. “Repository-Scale Modeling of the Long-Term Hydraulic Perturbation Induced by Gas and Heat Generation in a Geological Repository For High and Intermediate Level Radioactive Waste—Methodology and Results.” In <i>Proceedings, TOUGH Symposium 2009</i> , Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, September 14-16, 2009. Sur le Web http://esd.lbl.gov/FILES/newsandevents/toughsymposium09/TOUGH Symposium 2009.zip (, under Nuclear Waste).
Poppei et al. 2009	Joachim Poppei, Gerhard Mayer, Nicolas Hubschwerlen, Pepin Guillaume, and Jacques Wendling. Estimation of Humidity During Tunnel Ventilation—Supported By TOUGH2 Calculations of Liquid, Vapor, and Heat Transport.” In <i>Proceedings, TOUGH Symposium 2009</i> , Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, September 14-16, 2009. Sur le Web http://esd.lbl.gov/FILES/newsandevents/toughsymposium09/TOUGH Symposium 2009.zip , under Nuclear Waste. http://esd.lbl.gov/FILES/newsandevents/toughsymposium09/TOUGH Symposium 2009.zip (under Nuclear Waste).
Pruess et al. 1999	Karsten Pruess, Curt Oldenburg, and George Moridis. <i>TOUGH2 User’s Guide, Version 2.0.</i> (LBNL-43134) Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory, Earth Sciences Division, November 1999. Sur le Web http://esd.lbl.gov/tough2/LBNL_43134.pdf .
Référentiel du Site 2005, Tome 2	Andra. <i>Dossier 2005 Référentiel du site Meuse/Haute-Marne. Tome 2: Caractérisation comportementale du milieu géologique sous perturbation.</i> (C.RP.ADS.04.0022B). [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, 15 décembre 2005.
Référentiel du Site 2010, Tome 2	Andra. <i>Référentiel du Site Meuse/Haute-Marne: Tome 2.</i> (C.RP.ADS.A09.0007.B) [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, 29 janvier 2010. Titre courant: Jalon 2009 HA-MAVL. “Document interne.”
Su 2006	Contribution à l’étude du comportement mécanique et thermo-hydro-mécanique des argilites du Callovo-Oxfordien : Application au stockage des déchets radioactifs. [Lille] : L’université des sciences et technologies de Lille, 6 décembre 2005. https://iris.univ-lille1.fr/dspace/bitstream/1908/368/2/50376-2005-Su2.pdf
Tang et al. 2007	Anh-Minh Tang, Yu-Jun Cui, Trung-Tinh Le. A study on the thermal conductivity of compacted bentonites, <i>Applied Clay Science</i> 41 (2008) 181-189. Sur le Web à http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/33/70/24/PDF/Thermal_conductivity_ACS_2008_for_HAL.pdf . Journal = “DOI : 10.1016/j.clay.2007.11.001.”

von Hippel
2007

Frank von Hippel. *Managing spent fuel in the United States: The illogic of reprocessing (report on www.fissilematerials.org)*. [Presented before the Panel on The U.S. and the Future of Reprocessing, 2007 Carnegie International Nonproliferation Conference, June 26, Ronald Reagan International Trade Center, Washington, DC. Sur le Web <http://carnegieendowment.org/files/FvHReprocPanelCarnegie26June07Rev.pdf>].

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

Points forts

1. L'Andra a effectué de nombreux travaux en collaboration avec d'autres programmes de site de stockage et de laboratoire souterrain, notamment ceux de Mol en Belgique et du Mont Terri en Suisse.
2. L'Andra a été un leader pour beaucoup de travaux de collaboration internationale. Par exemple, le programme Engineering Studies and Demonstration of Repository Designs (ESDRED).
3. Les travaux de collaboration internationale ont été bénéfiques pour ceux de la France et d'autres pays. Ils ont également fait progresser l'état de l'art dans un certain nombre de domaines, comme le développement des techniques, de l'équipement et des matériaux.

Conclusions

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.
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.

Recommandation

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.

6.1 Introduction

Outre la France, de nombreux pays envisagent la construction d'un site de stockage pour accueillir leur combustible usé ou leurs déchets de retraitement de haute activité. On considère généralement que ce site de stockage doit être implanté dans un milieu géologique, à une profondeur de plusieurs centaines de mètres dans une formation propice et stable. Alors que, pour de nombreux pays il s'agit d'un objectif futur, sans encore de programme défini, quelques pays sont déjà engagés dans un programme de recherche et de développement qui aboutira, probablement, à une sélection de site, à sa caractérisation, et à une demande d'autorisation à

soumettre à l'organisme de réglementation approprié. Comme on peut s'y attendre, certains programmes sont bien plus avancés que beaucoup d'autres.

Encore récemment, le programme américain pour un site de stockage des déchets nucléaires civils à Yucca Mountain (Nevada) était peut-être le plus avancé, puisqu'une demande d'autorisation auprès de la Commission de réglementation nucléaire des États-Unis avait été déposée. Le gouvernement américain a mis fin à une évaluation plus approfondie de ce site et il semble improbable qu'elle soit relancée, bien que cette décision soit contestée sur plusieurs fronts. Néanmoins, ce programme a apporté de nombreuses contributions aux études internationales sur l'implantation d'éventuels sites de stockage.

Au mois de février 2011, le seul site de stockage en formation profonde en activité pour des déchets nucléaires était celui de Carlsbad, dans l'État du Nouveau-Mexique, aux États-Unis. Il est situé dans une couche de sel. Selon la loi il ne peut accueillir que les déchets transuraniens²⁹¹ issus du programme américain d'armes nucléaires.

Puisqu'en France le programme de stockage de l'Andra a opté pour un site dans un milieu argileux (argilite), nos discussions porteront essentiellement sur les autres programmes qui ont choisi un site de stockage dans les formations argileuses, tout en étant conscients qu'il existe d'importantes différences entre les diverses formations argileuses. Mais à titre d'exemple, nous ferons aussi référence à des programmes dans des milieux non argileux comme le sel ou le granite. En outre, plusieurs programmes européens, qui semblent s'être engagés sérieusement vers un site d'enfouissement en couche géologique profonde ainsi que vers une contribution importante à la base de connaissances scientifiques et d'ingénierie, seront comparés. Par exemple, des laboratoires de recherche souterrains dans plusieurs pays mènent des recherches depuis de nombreuses années. La plupart, sinon tous, ont travaillé en collaboration et partagé ouvertement les réussites et les échecs.

Durant ces 10 dernières années, de nombreux rapports ont été publiés présentant l'état d'avancement des différents programmes de site de stockage à travers le monde. Par exemple, Witherspoon et Bodvarsson ont publié un long rapport dans lequel les programmes d'au moins 24 pays sont décrits.²⁹² Parmi ces programmes, seul un petit nombre a fait des progrès significatifs sur les recherches in situ pour guider le choix d'un site et compléter le socle des connaissances scientifiques. Une comparaison plus récente a été publiée dans un rapport au Congrès américain et au Secrétaire à l'Énergie préparé par la Nuclear Waste Technical Review Board (NWTRB) (2009),²⁹³ l'équivalent de la Commission nationale d'évaluation. Afin de fournir une base de comparaison avec le programme de l'Andra dans son laboratoire souterrain de Bure, ce chapitre passe brièvement en revue une sélection de programmes nationaux de site de stockage pour les déchets de haute activité et le combustible usé pour lesquels existent des laboratoires souterrains. Nous avons connaissance, bien sûr, de la participation et de la collaboration de l'Andra avec les programmes de ces laboratoires nationaux.

²⁹¹ Aux États-Unis les déchets transuraniens sont définis comme des déchets contenant des émetteurs transuraniens alpha de longues durées de vie ayant une activité supérieure à 100 nanocuries par gramme (370 Bq/gramme)

²⁹² Witherspoon et Bodvarsson 2006

²⁹³ NWTRB 2009 est la source principale pour ce chapitre.

6.2 Six programmes de comparaison

Nous avons choisi six programmes qui ont actuellement, ont eu par le passé, ou font le projet d'avoir un laboratoire de recherche souterrain en vue de caractériser un milieu géologique et par conséquent d'acquérir une compréhension fondamentale de l'évolution des processus auxquels on s'attend durant la durée d'un site de stockage. Plus précisément, les pays européens suivants poursuivent des projets de site de stockage pour les déchets nucléaires dans un milieu géologique pour un enfouissement souterrain profond.

1. Belgique
2. Finlande
3. France
4. Allemagne
5. Suède
6. Suisse

Le laboratoire belge est situé à Mol et est en exploitation depuis plus de 20 ans. L'installation est située à 224 m de profondeur dans une formation d'argile de Boom. Mol fait partie d'un réseau de centres d'excellence de l'AIEA en relation avec sept autres laboratoires souterrains.²⁹⁴ Bien que la Belgique n'ait pas encore choisi un site de stockage, les essais et les expériences dans le laboratoire ont généré d'énormes quantités de données d'une valeur pratique, non seulement pour elle, mais aussi pour d'autres programmes de stockage. Un essai in situ de grande envergure, le projet RESEAL II, a été réalisé en deux étapes entre 1996 et 2007.²⁹⁵

Les objectifs étaient multiples, notamment, mais sans s'y limiter, la démonstration de la technologie, la compréhension du comportement hydromécanique des scellements et l'acquisition des paramètres de modélisation pour des simulations numériques. Par exemple, un objectif majeur consistait à concevoir, instrumenter, et « poser un scellement de bentonite dans un puits à axe vertical de 2 m de diamètre dans l'argile de Boom ». ²⁹⁶ Cet essai, effectué dans un milieu argileux, est d'une valeur inestimable pour le programme français. Les résultats et l'expérience de cet essai ont été largement utilisés par l'Andra, à la fois dans un contexte de modélisation numérique et pour démontrer la faisabilité de scellements de cette nature dans l'argilite. Selon les informations recueillies sur le site web de Mol, un autre test étudie les performances d'un matériau en verre qui doit être utilisé comme matrice d'encapsulation de déchets à haute activité.²⁹⁷

Bien qu'en 2000 le programme d'enfouissement finlandais ait choisi un site de stockage près de la centrale nucléaire d'Olkiluoto, un tunnel de « recherche » pour le site de stockage (appelé ONKALO) est encore en cours de construction. Ce tunnel est construit dans un substratum rocheux Archéen/Protérozoïque dont l'âge est estimé entre 1,25 et 3,2 milliards d'années.²⁹⁸ La

²⁹⁴ SCK-CEN 2011

²⁹⁵ Van Geet et al. 2009

²⁹⁶ Van Geet et al. 2009 p. 1

²⁹⁷ Voir SCK-CEN Web Site, at <http://www.sckcen.be/en>.

²⁹⁸ GTK 2010 slide 5.

NWTRB l'identifie comme de la « migmatite ». ²⁹⁹ Selon l'Encyclopedia Britannica (2010), la migmatite est une roche composée d'un matériau hôte métamorphique strié ou veiné. Ces roches sont généralement gneissique (rubanées) et felsiques plutôt que de composition ferromagnésienne.

La construction du tunnel est réalisée en quatre phases. La phase 1 qui consiste en la construction d'un tunnel en spirale descendante à une profondeur de 420 m devait se terminer en 2009. Pendant la phase 2, la construction continuera pour atteindre une profondeur finale de 520 m. Une chose curieuse au sujet de ce programme est que Posiva Oy (l'agence responsable de la construction à Olkiluoto) prévoit de soumettre une demande d'autorisation de construction d'un centre de stockage en 2012. Cela laisserait très peu de temps pour mener et interpréter les recherches envisagées avant de soumettre la demande. En dépit de cela, il est prévu que la phase 3 commence en 2015, phase durant laquelle l'installation de mise en stockage sera construite. La phase 4 (encapsulation et enfouissement des déchets) débutera en 2020. Il existe une étroite coopération entre les programmes finlandais et suédois, ce dernier ayant également choisi une formation de granite. Le programme finlandais s'appuie sur les travaux effectués dans le laboratoire souterrain suédois d'Äspö ainsi que sur sa conception de conteneur. La réalisation du laboratoire souterrain finlandais ne se fera pas dans une zone complètement distincte du site de stockage. Des travaux dans des forages creusés dans le tunnel complèteront ce travail pour établir la caractérisation du site avant la demande d'autorisation. Nous n'avons pas examiné la façon dont Posiva a l'intention de valider les effets de la corrosion et les autres données étudiées sur le site suédois pour les conditions spécifiques au site d'Olkiluoto (voir le commentaire ci-dessous).

Le programme français, bien sûr, a choisi l'argilite comme milieu géologique pour l'enfouissement. Le laboratoire de l'Andra est situé à Bure, à une profondeur de 490 m. ³⁰⁰ L'Andra a entretenu, et continue d'avoir une collaboration étroite avec des programmes européens, en particulier avec les laboratoires souterrains implantés dans des milieux argileux, ceux-ci représentant les sources les plus pertinentes de connaissance et de validation pour l'Andra.

Le programme allemand a toujours prévu un site de stockage dans le sel. Les difficultés techniques et politiques auxquelles le programme a été confronté peuvent servir de leçon à d'autres programmes. Le site de Gorleben, bien qu'inactif aujourd'hui, a été étudié pour déterminer son aptitude à accueillir des déchets nucléaires dès 1979. Un moratoire sur le projet a été imposé en 2000. Il a été levé en 2010 pour y mener des recherches. ³⁰¹ Par contre, aucun site n'a été choisi pour l'évacuation des déchets radioactifs de haute activité. Il existe une autre mine de recherche, Asse II, située à environ 140 km de Gorleben. Il s'agit d'une ancienne mine de sel dans laquelle, de 1965 à 1992, des exercices d'évacuation de déchets ont été effectués en vue d'apprendre à gérer l'évacuation des déchets nucléaires. Ce travail pourrait être considéré comme un travail en taille réelle dans un laboratoire souterrain. Cependant, cela n'a pas permis une expérience pour des déchets de haute activité, puisque les déchets qui ont été stockés ne

²⁹⁹ NWTRB 2009 p. 30

³⁰⁰ Dossier 2005 Argile, Synthèse p.5

³⁰¹ BfS Gorleben 2010

gènèrent pas une quantité importante de chaleur.³⁰² L'implantation d'un site de stockage dans une formation d'argile/d'argile schisteuse est envisagée ; pour l'instant nous n'avons pas d'informations concrètes sur cette activité.³⁰³

Il semble que le programme suédois soit le plus avancé pour ce qui est de la construction d'un site de stockage pour le combustible usé. A certains égards, il est le plus pertinent pour les ouvrages et les expérimentations à accomplir dans un laboratoire souterrain avant la sélection d'un site de stockage et sa caractérisation. Bien sûr, puisque la roche hôte et la réglementation suédoises sont différentes de celles du programme français, de nombreux détails seront différents. Par exemple, la loi française exige la réversibilité pendant au moins 100 ans, alors que la loi suédoise ne l'exige pas. Le programme du laboratoire suédois est néanmoins intéressant à examiner, puisque les types d'évaluation à faire, comme les tests thermiques, la validation des modèles à partir des résultats expérimentaux, etc., sont généralement les mêmes indépendamment du type de roche.

Le programme suédois affirme que sa politique nationale de gestion des déchets nucléaires est entièrement intégrée (et « holistique »). Le milieu géologique est le granite. Le choix final pour le site de stockage a été fait en 2009. Le programme suédois a dirigé au moins deux laboratoires souterrains pendant plusieurs années. Le plus ancien est le projet Stripa qui existe depuis plus de 30 ans.³⁰⁴ L'autre laboratoire, Äspö Hard Rock Laboratory, situé près de la municipalité d'Oskarshamn est exploité depuis 15 ans. Il est situé au sein d'une formation granitique à environ 460 m de profondeur. Le programme suédois le considère comme « une répétition générale » avant la construction d'un véritable site de stockage du combustible usé.³⁰⁵ Comme le tunnel finlandais d'ONKALO, le tunnel d'Äspö est creusé en spirale jusqu'à ce qu'il atteigne sa profondeur finale.³⁰⁶ Différents tests et expériences sont menés dans les branches et les niches de ce tunnel.

A part le fait qu'aucun combustible usé n'y a été placé, le laboratoire d'Äspö s'est penché sur tous les autres aspects de l'ingénierie, y compris ceux des conteneurs, des scellements de bentonite, des tunnels et des alvéoles. Le concept suédois repose principalement sur la robustesse du conteneur en cuivre qui sera le suremballage pour les colis de déchets contenant les barres de combustible irradié. La conception suédoise de mise en stockage exige que les conteneurs en cuivre soient incorporés dans de l'argile bentonite pour son effet tampon. Notamment, l'un des tests à Äspö le « Canister Retrieval Test » aborde la question de la réversibilité.³⁰⁷ Nous sommes conscients que le concept suédois préfère une mise en stockage verticale des conteneurs de combustible usé. Néanmoins, l'équipement spécial, nécessaire pour le creusement d'alvéoles horizontales, et la mise en stockage de conteneurs dans ces alvéoles, est testé à Äspö.³⁰⁸ L'utilité de l'expérimentation suédoise de reprise des colis est limitée pour l'Andra puisque la roche hôte du site de Bure est beaucoup plus meuble. Par conséquent, il incombe à l'Andra de mener ses propres expérimentations in situ de reprise des colis. L'une des préoccupations que nous avons

³⁰² BfS Asse 2010 et BfS Repository 2011

³⁰³ Voir, BGR 2007, par exemple.

³⁰⁴ SKB 2009 p. 11

³⁰⁵ SKB 2008 pp. 3, 64

³⁰⁶ SKB 2008 p. 19

³⁰⁷ SKB 2008 pp. 5, 79-81

³⁰⁸ SKB 2008 pp. 6, 86-88

porte sur la déformation du chemisage et/ou de l'alvéole, rendant très problématique la reprise des conteneurs. Par exemple, la Figure 6-1 montre les dommages (hors-profil par rapport à la forme circulaire) dans un forage expérimental d'alvéole à Bure.



Figure 6-1 : Hors-profil par rapport à la forme circulaire d'un forage dans le laboratoire souterrain de Bure. Photo prise par Krishan Wahi, 18 août 2010.

Le sixième (et dernier) programme européen sur notre liste est celui de la Suisse. Le programme suisse dispose de deux laboratoires souterrains : le laboratoire souterrain du Mont Terri (canton du Jura) et le laboratoire souterrain du Grimsel (canton de Berne). Le laboratoire du Mont Terri se trouve dans une argile à Opalinus tandis que celui de Grimsel est dans le granite. Bien que la décision n'ait pas encore été prise, il est probable que le site de stockage se fera dans une formation d'argile à Opalinus. Cette prévision se fonde sur la recommandation de la Société coopérative nationale pour le stockage géologique de déchets nucléaires que trois régions, toutes dans l'argile à Opalinus, soient davantage étudiées.³⁰⁹ Les travaux se déroulent dans les deux laboratoires depuis plusieurs années. Le projet de Mont Terri est un International Research project for the Hydrogeological, Geochemical and Geotechnical Characterization of a Clay

³⁰⁹ NWTRB 2009 p. 46

Formation (Opalinus Clay) ». ³¹⁰ Avec plus de 25 années de recherche, le laboratoire souterrain du Grimsel Test Site a fait progresser les techniques d'investigation sur le terrain, testé les technologies pour la construction d'un site de stockage, développé et testé le système de barrières ouvragées. En outre, de nombreuses données ont été générées et partagées avec d'autres programmes pour faire avancer l'art des modèles de simulation numérique et des analyses de sûreté.

Dans le Tableau 6-1, une comparaison de certains éléments des six programmes brièvement discutés ci-dessus est fournie. Il s'agit seulement d'un exemple de l'énorme quantité d'informations disponibles sur chacun des programmes. Le Tableau 6-1 a pour but d'être indicatif et de donner un bref aperçu des calendriers, des types de roches et s'il existe un programme de laboratoire souterrain. Ce n'est *pas* une liste exhaustive des types de travaux effectués dans les différents programmes.

³¹⁰ Voir le site web du Grimsel Test Site <http://www.grimsel.com> et celui du Mont Terri <http://www.mont-terri.ch>.

Tableau 6-1 : COMPARAISON DES PROGRAMMES D'ENFOUISSEMENT DES DÉCHETS NUCLÉAIRES ¹

Pays	Milieux géologiques étudiés	Processus de sélection du site	Laboratoire souterrain	Reprise des colis Réversibilité	Recours à des barrières multiples	Types de déchets/formes de déchets	Date prévue de la demande d'autorisation	Date prévue pour le commencement des activités
Belgique	Argile et schiste	Pas de processus de sélection en cours	Mol	aucune décision	non déterminé. mais probable	HAVL	inconnue	~ Année 2040
Finlande	Migmatite	Choisi Migmatite	En construction, Onkalo, même emplacement que le site de stockage	Non	Oui	CU	2012	2020
France	Argilite du Callovo - Oxfordien	Bure	Bure	Oui	Oui	HAVL, MAVL (et éventuellement CU ?)	2015	2025
Allemagne	Sel	Incertain	Goreleben (actuellement suspendu)	Non	Oui	CU, HAVL, MAVL	inconnue	pas prévu
Suède	Granite	Municipalité de Osthhammar	Aspo	Non	Exigence de redondance Note 2	CU	2011	2023
Suisse	Argiles à Opalinus, Granite	Pas encore choisi, probablement Argiles à Opalinus	Mont Terri et site de Grimsel	Oui	Oui	CU, HAVL	nconnue	Pas avant 2040

1. La source principale des informations figurant dans ce tableau est le rapport NWTRB 2009. Aussi Finnish Energy 2007, Andra 2010 p. 32.

2.L'objectif du program suédois est, autant que possible, que chaque barrière assure le maintien de la sûreté dans l'éventualité d'une défaillance de toutes les autres. (NWTRB 2009 p. 46)

6.3 Collaboration de l'Andra - Mont Terri et Mol

L'Andra a collaboré avec plusieurs autres programmes européens pour le bénéfice mutuel de tous les participants. Notamment, comme le programme français, deux de ces programmes sont consacrés aux milieux argileux. Plus précisément, depuis de nombreuses années, les laboratoires souterrains suisse et belge ont effectué des recherches sur la caractérisation du comportement de l'argile. La roche du laboratoire du Mont Terri, situé à une profondeur d'environ 300 m, est l'argile à Opalinus, similaire à l'argilite de Bure. En effet, le laboratoire souterrain de Bure effectue des expériences qui, sans aucun doute, profiteront à d'autres programmes nationaux. Certaines de ces collaborations sont axées sur le développement de nouvelles technologies à appliquer dans la conception et la construction de sites de stockage souterrain. Une collaboration importante de ce type a été proposée par la Commission européenne en 2003 qui a approuvé un projet en janvier 2004. Le projet, intitulé ESDRED (Engineering Studies and Demonstrations of Repository Designs)³¹¹ (Etudes d'ingénierie et de démonstrations de site de stockage), a commencé le travail en février 2004 et l'a terminé en janvier 2009 (voir la section 6.5 ci-dessous).

De nombreuses conclusions et résultats expérimentaux à partir des travaux réalisés au Mont Terri ont été utilisés par l'Andra dans ses propres analyses prédictives présentées dans le Dossier 2005 Argile et dans d'autres rapports ultérieurs. En outre, certaines démonstrations de technologies et maquettes de principe des techniques de construction effectuées à Mont ont été abondamment citées dans les rapports de l'Andra comme preuve de son aptitude à concevoir et construire un site de stockage sûr dans la ZIRA (au sein de la zone de transposition).³¹² L'Andra a considérablement réfléchi sur la question du transfert de données d'un site à un autre. Elle est consciente que, plus les recherches sur le site arrivent à une phase avancée, moins de données directement pertinentes pour le « dossier de sûreté » peuvent être transférées.³¹³ Ce qui est le cas aujourd'hui relativement à 2005.

Dans une présentation par M. J. Delay (Andra) à la Conférence TOPSEAL de 2006, il était implicite que des scellements en vraie grandeur seraient testés dans le laboratoire souterrain de Bure dans le cadre de la phase de recherche débutant en 2007. Plus précisément, dans la section intitulée « Conclusions » 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. »³¹⁴ Nous n'avons pas trouvé de description des performances de ces tests dans les publications de l'Andra depuis 2006. Par exemple, le rapport d'étape intitulé « 2006 - 2009: 4 ans de recherches scientifiques à l'Andra pour les projets de stockage » ne mentionne pas les conclusions relatives aux essais de

³¹¹ ESDRED Leaflet 2009 p. 2

³¹² Par exemple, la certitude de l'Andra dans les mesures de perméabilité réalisées à Bure se fonde en partie sur les résultats similaires obtenus au Mont Terri. Andra 2005c, p.126. Delay 2006 note également que « ..plusieurs techniques et méthodes utilisées dans le laboratoire souterrain de Bure avaient été développées auparavant dans le laboratoire de Mont Terri. » Traduit de l'Anglais

³¹³ Mazurek et al. 2008, p. S99.

³¹⁴ Delay 2006 p.136, Traduit de l'Anglais

scellement ou de rebouchage dans le laboratoire souterrain de Bure.³¹⁵ Il serait instructif d'obtenir des informations sur ces essais (si, effectivement, ils ont été effectués). En particulier si les résultats étaient accessibles ils pourraient être examinés et comparés avec des données similaires obtenues dans d'autres laboratoires souterrains notamment celui du Mont Terri.

Le laboratoire de géologie à Mol, en Belgique, situé dans une formation « d'argile de Boom » à 224 m de profondeur est un autre collaborateur important de l'Andra. Mol fait également partie du réseau des « centres d'excellence » de l'AIEA. Les travaux à Mol durent depuis plus de vingt ans. Un exemple de ce travail est l'étude, en conditions réelles (ou simulées) de rayonnement et de température, des performances d'un matériau en verre dans lequel des déchets de retraitement de haute activité sont immobilisés. D'autres travaux se rapportent à la caractérisation hydrogéologique, géochimique et aux processus couplés auxquels on s'attend dans un site de stockage.³¹⁶

6.4 Quelques remarques de comparaison

Comparée à certains autres programmes, l'Andra a effectué beaucoup plus de travaux dans le laboratoire souterrain avant de commencer la caractérisation de la zone du site de stockage. C'est le cas, par exemple, du programme finlandais, où ces travaux se déroulent plus ou moins en parallèle et où un site de stockage, distinct du laboratoire souterrain, ne sera pas construit. Outre ses travaux dans le laboratoire souterrain de Bure, l'Andra a maintenu une étroite collaboration avec le programme de Mont Terri, où le type de roche est similaire à l'argilite de Bure, comme indiqué ci-dessus. Les échéances pour une demande d'autorisation et le démarrage de l'exploitation du site de stockage sont prévues quelques années après celles des Finlandais, mais beaucoup plus rapidement que le programme suisse.

Par contre, il est important de noter que le programme de l'Andra à Bure a été, jusqu'à présent, beaucoup moins approfondi que le programme suédois dans le laboratoire d'Aspö. Notamment, une partie de ce programme a consisté à forer des alvéoles de grande échelle, à la mise en place de conteneurs en vraie grandeur, et des essais thermiques avec des simulateurs de chauffage électrique avant de procéder à la sélection de la zone de stockage définitif pour caractérisation à Forsmark en 2009.³¹⁷ Au laboratoire de Bure, une alvéole, avec un chemisage en acier, a été achevée en 2010, après quelques problèmes initiaux de stabilité de la paroi du forage et environ un an après la sélection de la ZIRA. Lors de sa visite du site le 18 août 2010, l'équipe de l'IEER a observé ce type de problème. Comme nous le verrons ci-dessous, l'Andra a coordonné un programme international, ESDRED, dans lequel les équipements de mise en place ont été conçus et testés. ESDRED est un élément essentiel de la recherche et du développement pour lesquels l'Andra a été un leader.³¹⁸ Mais souvent, il ne constitue pas un substitut à une recherche in situ.

³¹⁵ Andra quatre ans 2010

³¹⁶ Une description des travaux peut être consultée sur le site web du laboratoire : <http://www.sckcen.be/en/Our-Research/Research-projects/NIRAS-ONDRAF-projects/Geological-disposal-R-D-for-the-geological-disposal-of-medium-and-high-level-waste-in-the-Boom-Clay>.

³¹⁷ SKB 2008 et WNN 2009. Forsmark est dans la municipalité de Östhammar.

³¹⁸ ESDRED Leaflet 2009 donne un bref aperçu.

Bien que le type de roche en Suède soit très différent de celui de Bure, les principes de la recherche et les éléments essentiels qui ont été retenus dans le laboratoire d'Äspö pourraient utilement s'appliquer aux travaux de l'Andra dans le laboratoire souterrain. Plus précisément, SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB or Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company) a commencé à tester son Démonstrateur de concept de stockage (Prototype Repository en anglais) à Äspö début 2001³¹⁹, environ dix ans avant la sélection de la zone du site de stockage.³²⁰ SKB décrit les objectifs du Démonstrateur de concept de stockage comme suit :

La réalisation du Démonstrateur de concept de stockage est une « répétition générale » des actions nécessaires pour la construction d'un site de stockage définitif en commençant par la caractérisation et pour finir avec la resaturation des alvéoles et le remblayage des tunnels. Le Démonstrateur de site de stockage apporte une démonstration de la fonction intégrée du site de stockage et fournit une référence en vraie grandeur et complète pour tester des modèles prédictifs des composants individuels ainsi que l'ensemble du système du site de stockage. *Le Démonstrateur de site de stockage devrait démontrer que les processus importants qui ont lieu dans les barrières ouvragées et la roche hôte sont suffisamment bien compris.*³²¹

Les paramètres spécifiques étudiés dans le Démonstrateur de concept de stockage ont été:³²²

- L'absorption de l'eau dans la bentonite et le remblayage
- La distribution de la température (conteneurs, bentonite, remblayage et roche).
- Le déplacement du conteneur.
- La pression de gonflement et le déplacement dans la bentonite et le remblayage.
- 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.
- La pression de gaz dans la bentonite et le remblayage.
- Les processus chimiques dans la roche, la bentonite et le remblayage.
- La croissance bactérienne et la migration dans la bentonite et le remblayage.

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 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. Bien que les travaux de collaboration avec d'autres programmes puissent fournir et ont fourni une expérience et des informations précieuses pour la poursuite des études à Bure, ils ne peuvent néanmoins remplacer la recherche in situ essentielle dans le laboratoire souterrain. Comme indiqué plus haut, l'Andra en est consciente dans le principe; néanmoins,

³¹⁹ SKB 2008 p. 65

³²⁰ Bien que le site d'enfouissement définitif ne se trouve pas au même endroit que le laboratoire, le type de roche est le même, par conséquent le processus de sélection est largement comparable à celui de la ZIRA.

³²¹ SKB 2008 p. 64. C'est nous qui soulignons.

³²² SKB 2008 pp. 64-65. Traduit de l'Anglais

pour le moment, elle ne propose pas de construire un démonstrateur de concept de site pour tester globalement in situ, le concept de mise en stockage.

6.5 Projet international (ESDRED)

L'Andra a participé à un projet international établi pour aborder, examiner et résoudre des problèmes spécifiques d'ingénierie dans la conception d'un stockage et de son exploitation. Le programme : Engineering Studies and Demonstration of Repository Designs, ou ESDRED, auquel sept agences de gestion des déchets, ainsi que des organismes de recherche et de développement ont participé, a été coordonné par l'Andra.

Un grand nombre d'expériences et d'activités de conception ont eu lieu dans le cadre de cette collaboration internationale et des rapports finaux sur les différents aspects du projet ont été publiés en 2009.³²³ Les quatre principales composantes techniques de la collaboration ESDRED peuvent être résumées comme suit (bien que le travail dans chaque module ait été plus complexe et plus varié que décrit dans ce bref aperçu):³²⁴

- **Le Module 1** a été orienté vers la démonstration de la construction d'anneaux de bentonite pour servir de barrière ouvragée, « le remblayage d'un espace annulaire entre un conteneur de déchets et la paroi de l'alvéole » avec différents types de matériaux, et le développement de « techniques de surveillance/suivi non-intrusives ». Ce module est venu compléter un travail effectué par l'Andra dans le laboratoire souterrain de Bure.
- **Le Module 2** a été orienté vers la conception, la fabrication, et la démonstration de l'équipement qui sera utilisé pour le transport des conteneurs de déchets plus petits (2 à 5,2 tonnes) et leur mise en stockage dans des alvéoles horizontales ou verticales. La prise en compte de la réversibilité faisait partie de ce module.
- **Le Module 3** a été consacré à la conception et à la démonstration de gros équipements pour la mise en stockage de conteneurs lourds (43 à 45 tonnes) dans les tunnels ainsi que l'adaptation de ces machines pour le placement d'anneaux de bentonite pré-assemblés.
- **Le Module 4** consistait à concevoir et à tester des bouchons de scellement en béton fabriqués avec un ciment spécial à bas pH.

Les quatre modules ci-dessus se rapportaient à l'objectif technique du programme. D'autres objectifs abordaient des aspects liés à l'intégration d'un site de stockage européen et à la formation et la communication. Ces objectifs dépassent le cadre de la présente étude et ne sont pas traités ici.

Bon nombre de ces expériences ont préparé la voie à l'Andra et aux autres agences participant au projet pour la mise en œuvre d'un programme de stockage souterrain. Certaines de ces activités, comme la conception et les essais de machines de grande taille, n'auraient pas pu être faites ou auraient été très difficiles à faire dans un laboratoire souterrain ne disposant pas de tunnels en vraie grandeur. Diverses actions visaient des activités de sites de stockage dans différentes

³²³ Les différents rapports sont disponibles sur le site Web de ESDRED: http://www.esdred.info/proj_mod.htm.

³²⁴ ESDRED 2009 pp. 13-14. Traduit de l'Anglais

roches hôtes - différents types d'argile dont l'argilite et l'argile à Opanilus ainsi que le granite. Le travail effectué dans le cadre du projet ESDRED a été un complément et, dans une certaine mesure, un supplément aux activités dans le laboratoire souterrain à Bure. Les aspects complémentaires concernaient le développement et des tests sur divers types de ciments et d'autres matériaux ainsi que pour les machines de mise en stockage des conteneurs de déchets. Les aspects supplémentaires concernaient la mise en place de conteneurs dans des installations d'essai et des essais de scellement. Certains de ces travaux seront poursuivis dans le laboratoire souterrain de Bure, tandis que d'autres aspects seront sans doute poursuivis lors de la caractérisation de la ZIRA.

Les activités, l'expérience et les résultats du projet ESDRED fournissent des éléments pour la recherche fondamentale et le développement qui doivent être réalisés dans le cadre du développement d'un site de stockage. Mais il convient de noter que le projet ESDRED n'a pas réalisé de tests in-situ des colis dans l'argilite. Bien qu'il y ait beaucoup à apprendre de la vaste expérimentation qui a été menée dans le laboratoire d'Aspö en Suède, des essais dans le laboratoire de Bure dans les conditions de roche qu'on s'attend à trouver dans le site de stockage sont très souhaitables avant la vaste caractérisation souterraine dans la ZIRA. 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.

Le programme ESDRED a développé et testé des forages verticaux de mise en place mais, pour le moment, l'Andra n'envisage pas de mise en stockage des déchets HAVL ou de combustibles usés dans des alvéoles verticales.³²⁵ Cependant, comme il est indiqué dans le Chapitre 4, dans l'éventualité où l'élimination du combustible usé devrait se faire, des forages de 3,3 m de diamètre seraient nécessaires. Assurer la stabilité de forages horizontaux de cette dimension présentera de sérieuses difficultés dans l'argilite de Bure, comme l'indiquent les difficultés déjà rencontrées avec des forages de 0,7 m de diamètre. Nous savons que, pour le moment, l'Andra n'est pas tenue d'aborder la question du combustible irradié non retraité. Néanmoins, la mise en stockage du combustible usé (combustible usé d'uranium et/ou combustible usé de MOX) n'a pas été écartée. Tout dépend de la politique de retraitement qui n'est pas sous le contrôle de l'Andra. 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.

³²⁵ Nous remarquons qu'un forage vertical de 12,3 m de long a été creusé dans le laboratoire souterrain de Bure pour effectuer notamment des tests de corrosion. Cependant, le diamètre de ce forage n'était que de 360 mm. (Andra quatre ans 2010 p.45) Le diamètre d'un forage pour de combustible usé serait de 3,3 m.

6.6 Références

Andra 2010	Andral. <i>2009 Rapport d'Activité : gérer aujourd'hui pour préparer demain.</i> (384-1) [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, 2010. Sur le Web à http://www.andra.fr/download/site-principal/document/editions/384.1.pdf .
Andra quatre ans 2010	Andra. <i>2006 – 2009: 4 ans de recherche scientifiques à l'Andra pour les projets de stockage.</i> (383) [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, Juin 2010. Site web : http://www.andra.fr/download/site-principal/document/editions/383.pdf .
BfS Asse 2010	BfS. <i>Asse II. From salt dome to nuclear repository: The changeful history of the Asse II mine.</i> Salzgitter: Bundesamt für Strahlenschutz, 15/01/2010. Site Web http://www.endlager-asse.de/cln_135/EN/2_WhatIs/B_History/_node.html . BfS = Federal Office for Radiation Protection
BfS Gorleben 2010	BfS. <i>Introduction to the Gorleben site.</i> Salzgitter: Bundesamt für Strahlenschutz, 2010/11/19. Site Web http://www.bfs.de/en/endlager/erkundungsbergwerk_gorleben/einfuehrung.html .
BfS Repository 2011	BfS. <i>Disposal.</i> Salzgitter: Bundesamt für Strahlenschutz, 2011/01/24. Site Web http://www.bfs.de/en/endlager .
BGR 2007	Peer Hoth, Holger Wirth, Klaus Reinhold, Volkmar Bräuer, Paul Krull, and Hagen Feldrappe. <i>Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands: Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen.</i> Berlin/Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, April 2007. Lien sur le site Web : http://www.bgr.bund.de/cln_116/nn_329200/DE/Themen/Geotechnik/Download/BGR_Tonstudie2007.html . Version anglaise: <i>Final Disposal of Radioactive Wastes in Deep Geological Formations of Germany - Investigation and Evaluation of Argillaceous Rock Formations</i> , Lien sur le site Web http://www.bgr.bund.de/cln_116/nn_335074/EN/Themen/Geotechnik/geotechnik_node_en.html?nnn=truehttp://www.bgr.bund.de/nn_335086/EN/Themen/Geotechnik/Downloads/WasteDisposal_HostRockFormations_en,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/WasteDisposal_HostRockFormations_en.pdf .
Delay 2006	J. Delay. "Overview of Current and Planned Activities in the French Underground Research Laboratory at Bure," in <i>TOPSEAL 2006: Transactions</i> , International Topical Meeting, Olkiluoto Information Centre, Finland, 17-20 September 2006, (European Nuclear Society, Brussels, 2006). Sur le Web http://www.euronuclear.org/events/topseal/transactions/TopSeal-Transactions.pdf .

Dossier 2005 Argile, Evolution	Andra. <i>Dossier 2005 Argile, Tome: Évolution phénoménologique du stockage géologique</i> . Seconde éd. (Collection Les Rapports) [(C RP ADS 04 0025 B) (269)] [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, Décembre 2005.
Dossier 2005 Argile, Synthèse	Andra. <i>Dossier 2005 Argile: Synthèse: Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse</i> . seconde éd. (Collection les rapports) (266 B) [Châtenay-Malabry]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, Décembre 2005.
Encyclopedia Britannica	<u>Encyclopædia Britannica</u> . "Migmatite," <i>Encyclopædia Britannica Online</i> . Chicago: EB, November 8, 2010. Sur le Web http://www.britannica.com/EBchecked/topic/381818/migmatite .
ESDRED 2009	Integrated Project Coordinator. <i>Deliverable D6 of Module 6, WP4 Final Summary Report and Global Evaluation of the Project</i> . Author(s): IPC with contribution of all Contractors. [Châtenay-Malabry: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs], ESDRED, 30 January 2009. Sur le Web http://www.esdred.info/medias/Mod6-WP4-D6_FinalSummaryReport_Final30Jan09.pdf . Titre courant: <i>Mod6-WP4-D6 – Final Summary Report</i> .
ESDRED Leaflet 2009	Wolf K Seidler. <i>Project Results Leaflet: Engineering Studies and Demonstration of Repository Designs</i> . Brussels: European Commission, Research Directorate-General, 27 January 2009. Sur le Web http://www.esdred.info/medias/project-results-leaflet.pdf . Titre courant: Mod5-WP9-D12 – Project Results Leaflet.
ESDRED Web Site	Engineering Studies and Demonstration of Repository Designs. <i>ESDRED Project Results</i> [Web page]. [Châtenay-Malabry: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs], ESDRED, viewed on November 8, 2010. Sur le Web http://www.esdred.info/proj_mod.htm .
Finnish Energy 2007	Finnish Energy Industries. <i>Nuclear Waste Management in Finland</i> . Helsinki: Energiateollisuus ry, 2007. Sur le Web http://www.energia.fi/en/publications/nuclear%20waste.pdf .
Grimsel Web Page	Le site d'essais de Grimsel en Suisse [Page Web]. Wettingen: Nagra, consulté le 20 janvier 2011. Site web http://www.grimsel.com
GTK 2010	Timo Ruskeeniemi and Seppo Paulamäki. <i>Geological site selection process for the high-level nuclear waste repository in Finland</i> . [Presented before the] Blue Ribbon Commission for America's Nuclear Future, 21.10.2010, Crowne Plaza Hotel, Helsinki, Finland. [Helsinki?]: Geological Survey of Finland (GTK), 21 October 2010. Sur le Web http://brc.gov/Disposal_SC/Finland_meeting_docs/Ruskeeniemi_BRC_21_10_2010.pdf .

Mazurek et al. 2008	Martin Mazurek, Andreas Gautschi, Paul Marschall, Georges Vigneron, Patrick Lebon, Jacques Delay, “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,” <i>Physics and Chemistry of the Earth</i> , 33 (2008), pp. S95–S105 Supplement 1: Clays in Natural & Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement. Disponible en ligne pour achat ou gratuity dans les bibliothèques de recherche.
NWTRB 2009	United States. Nuclear Waste Technical Review Board. <i>Survey of National Programs for Managing High-Level Radioactive Waste and Spent Nuclear Fuel: A Report to Congress and the Secretary of Energy</i> . Arlington, VA: NWTRB, October 2009. Sur le Web http://www.nwtrb.gov/reports/nwtrb%20sept%2009.pdf .
SCK-CEN 2011a	Belgian Nuclear Research Centre. <i>HADES - Underground laboratory</i> . Mol, Belgium: SCK-CEN, viewed January 20, 2011. Sur le Web http://www.sckcen.be/en/Our-Research/Research-facilities/HADES-Underground-laboratory .
SCK-CEN 2011b	Belgian Nuclear Research Centre. <i>Geological disposal: R&D for the geological disposal of medium and high level waste in the Boom Clay</i> . Mol, Belgium: SCK-CEN, viewed February 4, 2011. Sur le Web http://www.sckcen.be/en/Our-Research/Research-projects/NIRAS-ONDRAF-projects/Geological-disposal-R-D-for-the-geological-disposal-of-medium-and-high-level-waste-in-the-Boom-Clay
SCK-CEN Web Site	Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire. [<i>SCK-CEN Web Site</i>]. Mol, Belgique, SCK-CEN, viewed January 2011. Sur le Web http://www.sckcen.be/fr/ .
SKB 2008	Svensk Kärnbränslehantering AB. <i>Äspö Hard Rock Laboratory: Annual report 2007</i> . (Technical Report TR-08-10) Stockholm: SKB, April 2008. Sur le Web http://www.skb.se/upload/publications/pdf/TR-08-10webb.pdf . “Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.”
SKB 2009	Svensk Kärnbränslehantering AB. <i>Final repository for spent fuel in Forsmark – basis for decision and reasons for site selection</i> . (SKBdoc 1221293) Stockholm: SKB, June 2009. Sur le Web http://www.skb.se/FileOrganizer/Extranet/Engelska%20webben/Final%20repository%20for%20spent%20fuel%20in%20Forsmark%E2%80%93basis%20for%20decision.pdf . Note dans le document: “Ce document est un traduction du rapport ”Slutförvar för använt kärnbränsle i Forsmark – underlag och motiv för platsval”, SKB document ID 1207622”

Van Geet et al. 2009	M. Van Geet, W. Bastiaens, G. Volckaert, E. Weetjens, X. Sillen, N. Maes, Ch. Imbert, P. Billaud, G. Touzé, M. Filippi, F. Plas, M.V. Villar, M. García-Gutiérrez, M. Mingarro, A. Gens, B. Vallejan. <i>RESEAL II: A large-scale in situ demonstration test for repository sealing in an argillaceous host rock – Phase II: Final report.</i> (EUR 24161 EN) (Nuclear science and technology) Luxembourg: European Commission, Directorate-General for Research, Nuclear Fission Safety, 2009. Sur le Web upcommons.upc.edu/e-prints/bitstream/2117/9640/1/EUR%2024161%20EN_RESEAL%20II%20Final.pdf .
Witherspoon et Bodvarsson 2006	P.A. Witherspoon and G.S. Bodvarsson (eds.). 2006. <i>Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation: Fourth Worldwide Review.</i> (LBNL-59808) Berkeley, Earth Science Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, April 2006. Sur le Web http://esd.lbl.gov/FILES/research/programs/new/lbnl-59808-wwr4.pdf .
WNN 2009	Forsmark for Swedish nuclear waste: Sweden's permanent disposal site for used nuclear fuel will be at Forsmark, the company responsible for building it announced today, <i>World Nuclear News</i> , 3 June 2009. Sur le Web http://www.world-nuclear-news.org/print.aspx?id=25336 . (Waste and Recycling)
