

Chapitre 5 : Hydrogéologie

Detlef Appel

Conclusions principales

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

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

Principales recommandations

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

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

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

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

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

5.1 Introduction

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

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

La zone d'intérêt majeure pour la construction d'un laboratoire souterrain de recherches et, tout particulièrement, d'un site potentiel de stockage, est désignée sous le nom de zone équivalente de transposition¹. Dans cette zone, l'ANDRA s'attend à une situation géologique équivalente permettant la transposition (l'extrapolation) des résultats obtenus en laboratoire à l'éventuel site de stockage. Cette zone, située au nord des puits d'accès du laboratoire prévu, est définie du point de vue des propriétés géologiques² : épaisseur minimum du Callovo-Oxfordien argileux (130 m), structure tectonique (absence de failles majeures), faciès lithologique (indiquant une faible perméabilité) et profondeur maximale (en fait 600 m). La zone est limitée par un système de failles et de graben à l'ouest, à l'est et au sud du site (fossé de la Marne, fossé de Gondrecourt et des failles secondaires) et la flexure d'Aulnois en Perthois au nord³.

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

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

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

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

¹ ANDRA Référentiel Géologique Tome 5, 2001, chapitre IV, Figure 4.4-01; ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A, chapitre VI.1.2.9

² ANDRA Référentiel Géologique Tome 5, 2001, Fig. 4.4-01

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

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

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

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

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

La Règle fondamentale III.2.f sur le stockage ultime des déchets radioactifs dans des formations géologiques profondes comporte les critères fondamentaux de radioprotection⁴, qui doivent être respectés pour un site de stockage de déchets radioactifs. Parmi ces critères de radioprotection figure la limite de dose de 0,25 mSv par

⁴ Règle N° III.2.f, section 3.2

an déjà abordée dans le Chapitre 1. La limite de dose peut être comprise comme un critère qui fait partie intégrante de l'évaluation de l'adéquation d'un site de stockage et/ou d'évaluation de la performance d'une installation de stockage. En outre, la Règle comprend un ensemble de critères portant sur le choix d'un site⁵. Ces critères de choix d'un site peuvent être interprétés comme des indicateurs permettant de parvenir au respect des critères de radioprotection dans la mesure où des estimations de dose fiables, sur la base d'un ensemble de données complètes et fiables spécifiques au site, ne sont pas encore possibles.

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

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

5.2.1 Le critère hydrogéologique essentiel

Le critère hydrogéologique essentiel se rapporte à tous les types de roches hôtes et comprend les exigences suivantes⁶ :

- « . . . une très faible perméabilité de la formation hôte et un faible gradient [..] hydraulique⁷,
- Un faible gradient régional hydraulique [...] recherché de préférence pour les formations environnantes de la formation hôte. »
- « Il faudra prendre en compte les discontinuités ou les hétérogénéités dont la nature et la géométrie pourraient tendre à amoindrir significativement l'efficacité de la barrière géologique. Ces objets devront donc être repérés et caractérisés avec la plus grande attention, de façon, s'il y a lieu, à les éviter au niveau du site ».

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

⁵ Règle N° III.2.f, section 4.4

⁶ Règle N° III.2.f, section 4.4.1

⁷ Il faut souligner ici que, en ce qui concerne les roches hôtes de perméabilité globalement faible, comme c'est le cas des roches argileuses du Callovo-Oxfordien, le gradient hydraulique dans la formation hôte est d'une importance mineure comparativement à la répartition des charges ou des pressions hydrauliques dans l'ensemble de la formation hôte et entre les formations avoisinantes.

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

5.2.2 Critère essentiel de stabilité

Le critère essentiel de stabilité⁸ d'un site de stockage établit que « ...pour une période qui doit être égale au moins à 10 000 ans, la stabilité (qui englobe une évolution limitée et prévisible) doit être démontrée. » « La stabilité du site devra être telle que les éventuelles modifications des conditions initiales dues aux phénomènes géologiques qui peuvent survenir [...] restent acceptables ... » La stabilité du site sera évaluée en « ...se reportant à la situation actuelle, au passé proche (historique) et surtout au passé plus ancien (quaternaire et éventuellement fin du tertiaire). » A partir de cette évaluation, il faudra apprécier les futurs événements et processus géologiques et juger si les modifications qu'ils pourraient apporter « restent acceptables au regard de la sûreté du stockage. »

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

5.2.3 Recommandations méthodologiques de la Règle III.2.f

L'Annexe N°1 de la Règle traite des objectifs et des principaux éléments des investigations à mener sur le site. De plus, elle comporte des recommandations méthodologiques pour la recherche hydrogéologique en distinguant les différents types de roches hôtes. Ces recommandations peuvent être interprétées comme un ensemble d'exigences minimum sur la quantité et la qualité des investigations à mener sur le site. Pour les formations argileuses, les travaux suivants sont recommandés⁹ :

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

⁸ Règle N° III.2.f, section 4.4.1

⁹ Règle N° III.2.f, Annexe N° 1, section 4.3

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

5.2.4 Critères importants

Les « critères importants »¹⁰ se rapportent aux propriétés mécaniques, thermiques et géochimiques de la roche hôte. Il faudra tout particulièrement étudier la manière dont le stockage des déchets et tout autre événement ou processus affecteront le champ proche. De plus, la Règle III.2.f exige le respect d'une profondeur minimale du site de stockage (environ 150 à 200 m) pour prévenir une défaillance du site de stockage à la suite de l'érosion. Elle suggère également que les régions disposant de ressources souterraines ou susceptibles d'en receler ne soient pas choisies.

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

5.3 Informations utilisées

Au cours des dernières dix années, environ, l'ANDRA a recueilli une quantité importante et détaillée d'informations hydrogéologiques sur le site de Bure. La totalité de ces informations ne nous a pas été accessible malgré leur intérêt pour cette évaluation. La situation géologique générale autour du site peut être déduite de la carte géologique publiée en 2001¹¹. La description la plus complète de la situation hydrogéologique du site de Bure et des environs est présentée par l'ANDRA dans le "Référentiel Géologique du site de Meuse/Haute-Marne", désigné ci-après comme le Référentiel Géologique. Le Référentiel Géologique¹² est la source principale d'informations sur l'hydrogéologie.

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

¹⁰ Règle N° III.2.f, section 4.4.2

¹¹ ANDRA Cartographie 2001, v.1 et v.2

¹² ANDRA Référentiel Géologique Tomes 1, 2001

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

Quelques résultats importants obtenus en 2001 et 2002 sont présentés dans le document de l'ANDRA "Bilan des Études et Travaux 2001"¹³ et "Bilan des Études et Travaux 2002"¹⁴ ainsi que dans un certain nombre d'articles scientifiques.

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

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

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

- **Scientific Programme HLLW Clay Repository Project – 2002-2005** du 19 Septembre 2002, C PE ADS 02-039 cité sous la référence « ANDRA 2002-2005 ». Ce document contient les informations les plus récentes sur le programme de recherche de l'ANDRA.
- **Dossier Argile 2001** sur l'avancement des études & recherches relatives à la faisabilité d'un stockage de déchets à haute activité et à vie longue en formation géologique profonde - **Rapport de synthèse**. Ce rapport est cité sous la référence "ANDRA Dossier Argile 2001". Le rapport de synthèse est également disponible en anglais.
- Dossier Argile 2001 sur l'avancement des études & recherches relatives à la faisabilité d'un stockage de déchets à haute activité et à vie longue en formation géologique profonde – **Rapport de synthèse Partie B Compléments scientifiques et techniques**
- Quelques information récentes et détaillées proviennent du « Bilan des Études et Travaux 2001 et 2002 ». ¹⁵

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

¹³ ANDRA BET 2001

¹⁴ ANDRA BET 2002

¹⁵ ANDRA BET 2001 et 2002

5.4 Hydrogéologie du site de Bure

5.4.1 Situation géologique et généralités

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

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

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

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

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

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

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

Aucune hétérogénéité n'a été observée et aucune faille à déplacement vertical notable n'a été détectée¹⁶ dans cette zone équivalente de transposition¹⁷.

5.4.1.2 Composition du Callovo-Oxfordien

Les argiles silteuses dominent la composition du Callovo-Oxfordien¹⁸. La composition minéralogique moyenne (pourcentage en poids) est la suivante¹⁹ :

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

Une observation détaillée met en évidence une variation verticale de la composition²⁰, avec les trois séquences sédimentaires suivantes (de la base jusqu'au sommet) :

- une séquence inférieure d'argiles silteuses (35 m) directement au dessus des calcaires du Dogger, est d'âge Callovien. Elle est relativement riche en argiles silteuses (quartz) et relativement pauvre en carbonates.
- une séquence médiane d'argiles silteuses de 80 m composée des trois ensembles qui sont de bas en haut :
 - Un premier ensemble argileux d'une épaisseur de 45 m. La teneur en minéraux argileux augmente sans interruption jusqu'à atteindre 50 - 60 %. La partie inférieure de ce premier ensemble débute par « une passée d'argilites de 6 mètres d'épaisseur comportant 5 niveaux décimétriques de calcaires. »
 - Un deuxième ensemble d'argilites silto-carbonatées est d'une épaisseur de 16 m. Dans cet ensemble la teneur en minéraux argileux diminue légèrement.
 - Un troisième ensemble d'une épaisseur de 19 m se compose « de siltite argilo-carbonatée [...] correspondant à une diminution plus sensible du pourcentage de minéraux argileux et à un enrichissement notable en quartz et en carbonates vers le haut de l'unité ».
- La séquence supérieure (18 m) se compose des siltites carbonatées, avec 4 m à la base de calcaire argilo-silteux.

¹⁶ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A, pages 68, 56

¹⁷ voir Section 5.1

¹⁸) Les termes « siltite » et « silteux » ne sont pas clairement définis. Dans ce cas ils se rapportent à des roches sédimentaires avec une teneur en argile élevée, légèrement durcies, comme le Callovo-Oxfordien sur le site de Bure.

¹⁹ ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001, chapitre II

²⁰ ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001, chapitre I.2.2.1; et Tome 4, Figure 1.1-01

La fraction argileuse est principalement constituée d'illite et de smectite organisés en une couche mixte de séries d'interstratifiés, illite/smectite désordonnés²¹. La proportion de ces constituants change avec la profondeur. La base du Callovo-Oxfordien (approximativement 60 m) est pauvre en smectite. Dans une zone de transition épaisse d'environ 10 m, cette proportion augmente pour atteindre jusqu'à 18 à 20 %. La chlorite est présente dans presque tous les échantillons en faibles proportions, de 5 % au maximum. La kaolinite n'est présente que dans la base, dans des proportions encore plus faibles.²²

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

La composition du Callovo-Oxfordien, en particulier celle des phases des minéraux argileux, et sa variabilité verticale sont interprétées comme correspondant aux séquences de l'histoire sédimentaire (différents sédiments pour les couches mixtes) et à une évolution diagénétique dès la fin du dépôt. Plus tard, on ne note aucune influence majeure de diagénèse ou de métamorphose qui auraient pu changer ou fortement modifier la composition de départ.²³

La subsidence du bassin de Paris ne s'est pas traduite par une forte augmentation de la température et le changement qui l'aurait accompagnée. D'après la détermination des paléotempératures par l'étude de la composition en matière organique²⁴ la paléotempérature maximum n'a pas dépassé 38 °C, ce qui correspond à une profondeur maximale de subsidence d'environ 850 m.

La composition séquentielle du Callovo-Oxfordien est présentée comme étant latéralement homogène.²⁵ Aux trois endroits étudiés jusqu'ici, la composition minéralogique et sa variabilité verticale sont très semblables. Par contre une différenciation latérale doit être prise en compte pour l'évaluation du site.²⁶ Cela vaut particulièrement pour la teneur en carbonates²⁷ et des autres paramètres qui en dépendent.

5.4.2 Situation hydrogéologique

²¹ CLARET 2001, CLARET et al. 2002

²² ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001, Table 2.1-03

²³ CLARET 2001; ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001, chapitre II.1.21

²⁴ ANDRA 1996, page 9, ANDRA 2000, page 26

²⁵ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A, page 56

²⁶ BREGOIN 2003

²⁷ voir Figure 5-1

5.4.2.1 Définition des termes

Comme nous le précisons dans la section 5.1 les propriétés hydrauliques des roches hôtes d'un site de stockage pour les déchets radioactifs et les formations sus- et sous-jacentes sont la diffusion et/ou la convection (transport des solutés dans les eaux souterraines) et la vitesse du transport. La plus importante de ces propriétés est la perméabilité.²⁸

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

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

5.4.2.2 Unités hydrogéologiques importantes

L'ANDRA a défini un secteur de recherche pour les investigations hydrogéologiques pour le site de Bure. Ce secteur s'étend bien au-delà des limites de la zone équivalente de transposition (voir la section 5.1), puisqu'il comprend les zones où l'on pense que se trouvent les sources d'alimentation et les exutoires des eaux souterraines de la zone équivalente de transposition.²⁹ Les zones d'alimentation sont les zones montagneuses à l'est et au sud du laboratoire, on pense que les exutoires se retrouvent tout particulièrement dans les vallées de la Marne, de la Meuse et de la Moselle. Ce secteur comprend également les systèmes de failles et grabens qui ont été exclus de la zone équivalente de transposition, du Fossé de Gondrecourt (au sud-est du site) et du Fossé de la Marne (à l'ouest) ainsi que de quelques failles de moindre importance (au sud-ouest).

Dans cette zone la séquence mésozoïque sédimentaire du secteur de Bure se compose de plusieurs unités où alternent des perméabilités plus fortes ou plus faibles. Parmi ces unités, les couches supérieures en commençant par le Dogger, présentent un intérêt

²⁸ En hydrogéologie dans différents pays le terme « perméabilité » est utilisé avec des significations légèrement différentes. Dans le Référentiel Géologique de l'ANDRA il est normalement utilisé dans le sens d'une conductivité hydraulique (exprimée par la valeur K, dimension: m/sec). Ici, « perméabilité » et « conductivité hydraulique » sont utilisées de la même façon et ont donc la même signification.

²⁹ ANDRA Référentiel Géologique Tome 3, 2001, Figure 1.0-01

particulier, parce qu'elles sont considérées comme des formations dans lesquelles pourraient exister des voies pour le transport potentiel des solutés depuis le site de stockage prévu jusqu'à la biosphère. Ces unités sont les suivantes :

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

5.4.2.3 Propriétés hydrauliques

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

Les calcaires du Dogger et de l'Oxfordien, situés directement au dessus et en dessous du Callovo-Oxfordien sur le site de Bure, présentent à cet endroit des conductivités hydrauliques plus faibles que celles attendues à partir des informations au niveau régional. Dans ces formations, la conductivité hydraulique n'est que légèrement supérieure à celle du Callovo-Oxfordien. Dans le forage HTM 102 la corrélation entre la faible perméabilité et la forte pression hydraulique de ces zones n'est pas claire.³⁰

D'autre part, les calcaires de l'Oxfordien présentent neuf horizons caractérisés par une porosité plus importante et, par conséquent, une perméabilité plus importante.³¹ Ces horizons, en particulier ceux mis en évidence par le forage HTM 102 et les forages sur le site de Bure, sont des sections où l'écoulement des eaux souterraines pourrait être plus important et sont, par conséquent, particulièrement importants pour la modélisation des eaux souterraines.

En outre, les calcaires du Dogger et de l'Oxfordien sont sujets à la karstification, particulièrement en l'absence d'une couverture protectrice de roches insolubles ou moins solubles.³² Ce processus va augmenter la conductivité hydraulique des calcaires, particulièrement le long des fissures et des fractures, et peut même entraîner une

³⁰ Figure 5-2 and 5.3

³¹ ANDRA Référentiel Géologique Tome 3, 2001, chapitres IV and V

³² voir chapitre 5 bis xxx

redistribution et une canalisation des écoulements des eaux souterraines dans ces formations (Section 5.6.5.2).

La porosité dans la séquence est déterminée par le pétrofaciès. Les valeurs obtenues dépendent de la technique utilisée (porosimétrie mercure ou calcul à partir des mesures de densité; les valeurs obtenues à partir des mesures de densité sont légèrement supérieures, parce que les pores les plus petits sont inclus). En règle générale, la porosité des roches carbonatées est faible (Dogger 4 - 6.4 % ; Oxfordien ~10 %). Cependant, dans l'Oxfordien et les calcaires du Kimméridgien, la porosité augmente dans quelques sections pour atteindre plus de 20 %³³. La porosité du Callovo-Oxfordien est positivement corrélée avec la teneur en argile et varie de 10 à 20 % (calcul à partir des mesures de densité) avec une moyenne de 15 %³⁴.

Les données de conductivité et de porosité présentées pour la couche hôte ne sont pas censées être influencées par des fractures. Selon le modèle conceptuel de l'ANDRA de l'écoulement des eaux souterraines et du transport de solutés, des fractures présentant une augmentation de conductivité hydraulique et de porosité significative pour la sûreté ne devraient pas se manifester. Selon le Référentiel Géologique (Tome 3 chapitre II.5) aucune fracture de rejet vertical important dans le Callovo-Oxfordien n'a encore été détectée. Par conséquent, l'ANDRA s'attend à ce que la diffusion soit le processus prévalant pour le transport des solutés, illustré par un **coefficient effectif de diffusion** (De). Les valeurs du De obtenues à partir de la recherche en laboratoire pour plusieurs anions et cations vont de 10^{-13} à 2×10^{-11} m²/sec pour les anions et de 10^{-11} - 4×10^{-10} m²/sec pour les cations.³⁵ Pour le tritium la moyenne des valeurs mesurées est de $1,4 \times 10^{-11}$ m²/sec. Ces valeurs se rapportent à des mesures perpendiculaires à la stratification. Les coefficients sont légèrement plus élevés pour des mesures parallèles à la stratification (tritium : 2×10^{-11} m²/sec). Pour l'évaluation des impacts géologiques et (géo) chimiques potentiels sur la diffusion, l'ANDRA a étudié l'influence de facteurs importants, tels que la composition de la roche, la concentration des solutés, le gradient de concentration, et la salinité.³⁶ Quelques données préliminaires sont également présentées sur la rétention des solutés.

5.4.2.4 Écoulement des eaux souterraines

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

³³ ANDRA Référentiel Géologique Tome 3, 2001, Figure 4.2-03 - 4.2-5

³⁴ ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001, chapitre II.2.1.2

³⁵ ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001, chapitre III.2

³⁶ ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001, chapitre III.2

de Bure sont déterminés et évalués par une modélisation hydrogéologique imbriquée, intégrée aux échelles locales et régionales et aussi à l'échelle du site.³⁷

Les données sur les charge hydrauliques (ou la pression de l'eau) dans les formations hydrogéologiques les plus importantes, du Dogger à l'Oxfordien, font défaut. Seules quelques données sont obtenues des forages HTM 102, MSE 101 et du site lui-même.³⁸ Cette base de données ne permet d'identifier que quelques particularités importantes :³⁸

- Les roches argileuses du Callovo-Oxfordien contiennent une zone à haute pression.³⁹ En particulier, dans le forage MSE 101 il existe une surpression forte à la fois de la pression hydrostatique prévue et des pressions dans les calcaires du Dogger et de l'Oxfordien. La surpression est moins significative dans le forage HTM 102.
- Le gradient entre les charges hydrauliques dans les calcaires du Dogger et de l'Oxfordien change dans la zone concernée. Il est descendant (plus fort dans l'Oxfordien que dans le Dogger) dans le forage HTM 102 et ascendant dans le forage MSE 101. Aux deux endroits ce gradient est plus faible qu'entre le Callovo-Oxfordien et ces formations.

Selon l'ANDRA⁴⁰, cette zone de haute pression empêche un transport convectif ascendant ou descendant des solutés à travers le Callovo-Oxfordien. Par conséquent, c'est pour l'ANDRA l'un des arguments principaux qui sous tend son modèle conceptuel sur la migration diffusive dans la couche hôte.⁴¹

A l'échelle régionale, il n'y a pas non plus de données suffisantes sur les charges hydrauliques ou les pressions de l'eau dans les calcaires du Dogger du secteur de Bure pour pouvoir décrire précisément l'écoulement des eaux souterraines.⁴² L'acquisition des données est en cours.⁴³ Une modélisation hydraulique récente basée sur des données encore insuffisantes indique un écoulement des eaux souterraines vers un exutoire dans la vallée de la Moselle à quelques dizaines de kilomètres au nord-est du site.⁴⁴ Le temps de parcours calculé est de quelques millions d'années.

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

³⁷ WENDLING et al. 2002

³⁸ voir Figures 5-2 and 5-3

³⁹ ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001, Table 3.1-01; ANDRA 1995, Table "Resultats definitifs" au 14/02/1996

⁴⁰ ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001, chapitre III.3

⁴¹ voir Section 5.5

⁴² ANDRA Référentiel Géologique Tome 3, 2001, chapitre 5 and Figure 5.1-01

⁴³ voir Section 5.6.5

⁴⁴ WENDLING et al. 2002

d'informations (Référentiel Géologique, Tome 3, Figures 5.1-01, 5.1-06, 5.1-07, 5.1-08).⁴⁵ Dans le détail, la direction de l'écoulement des eaux souterraines est fortement influencée par les plus importantes rivières de la région, particulièrement la Marne et la Meuse. Ainsi, une modélisation récente basée sur des données encore préliminaires et insuffisantes indique un exutoire dans la vallée de la Marne au sud-ouest du site. Le temps de parcours calculé serait de l'ordre de plusieurs centaines de milliers d'années.⁴⁶

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

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

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

⁴⁵ ANDRA Référentiel Géologique Tome 3, 2001, Figures 5.1-01, 5.1-06, 5.1-07, 5.1-08

⁴⁶ WENDLING et al. 2002

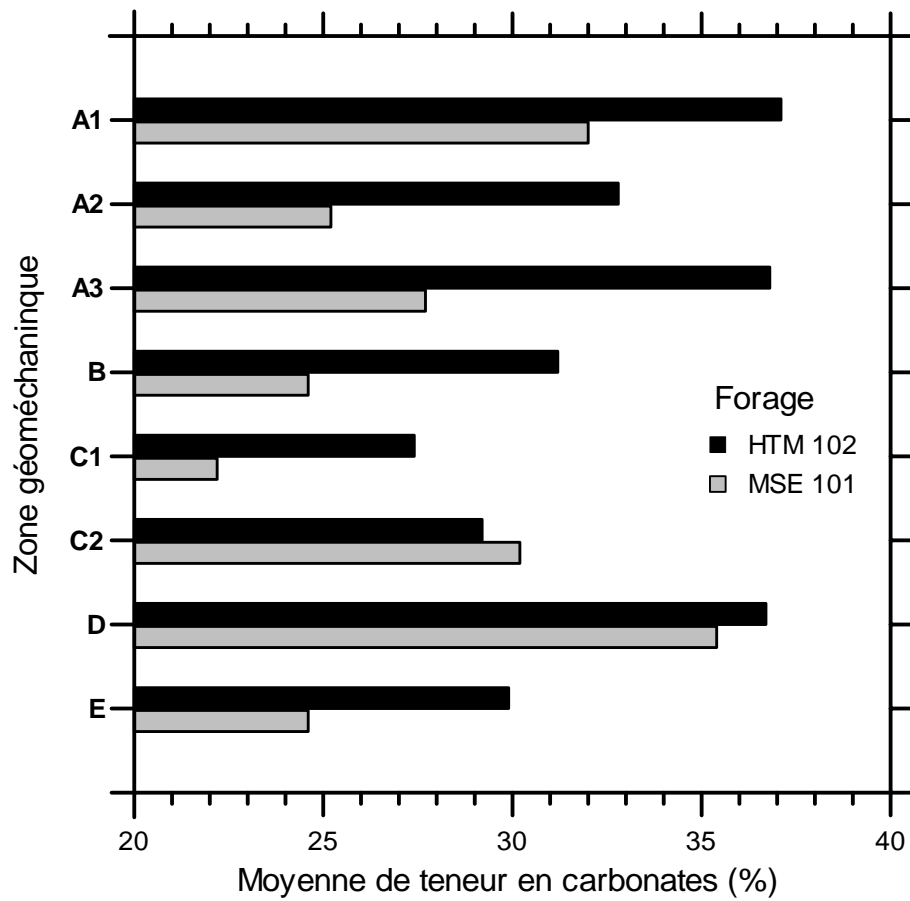


Figure 5-1 Variabilité verticale de la teneur en carbonates du Callovo-Oxfordien à deux endroits de forage sur le site de Bure en fonction des valeurs moyennes pour les zones hydromécaniques Données du Référentiel Géologique, Tome 4, tableau 2.1-02.

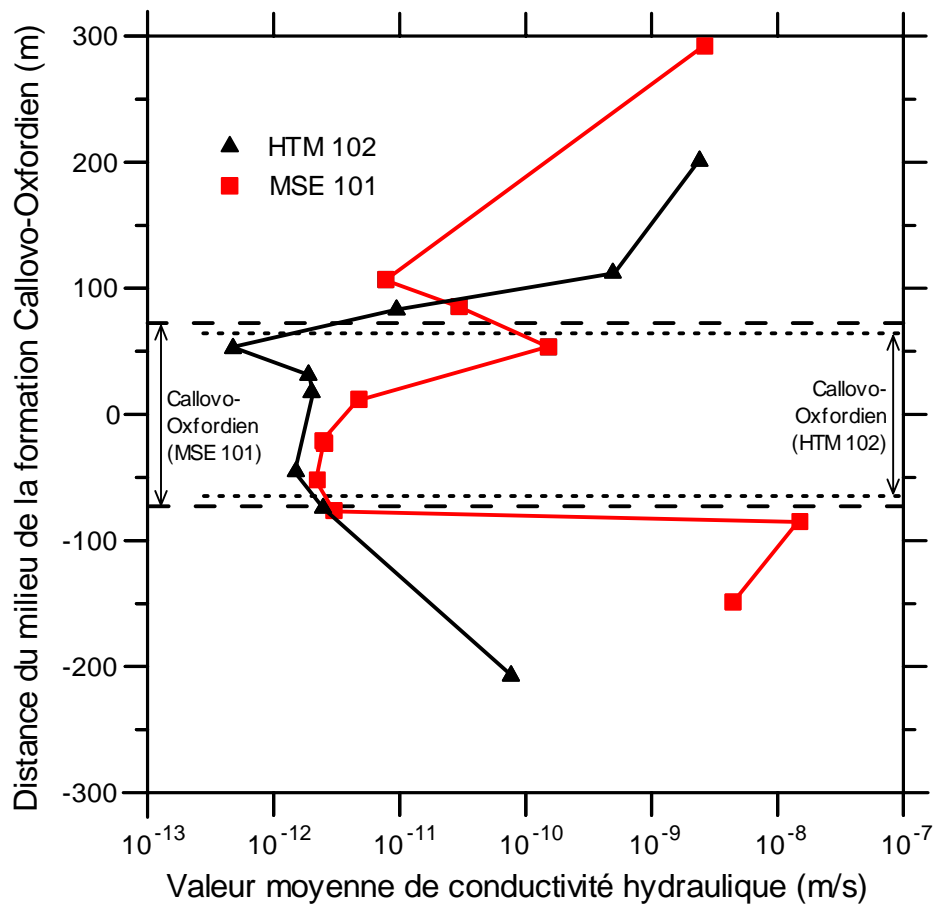


Figure 5-2 Variabilité verticale de la conductivité hydraulique dans le Callovo-Oxfordien et des formations hydrogéologiques sus- et sous jacentes des calcaires du Dogger et de l'Oxfordien en fonction de la distance des intervalles des essais par rapport au milieu du Callovo-Oxfordien.

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

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

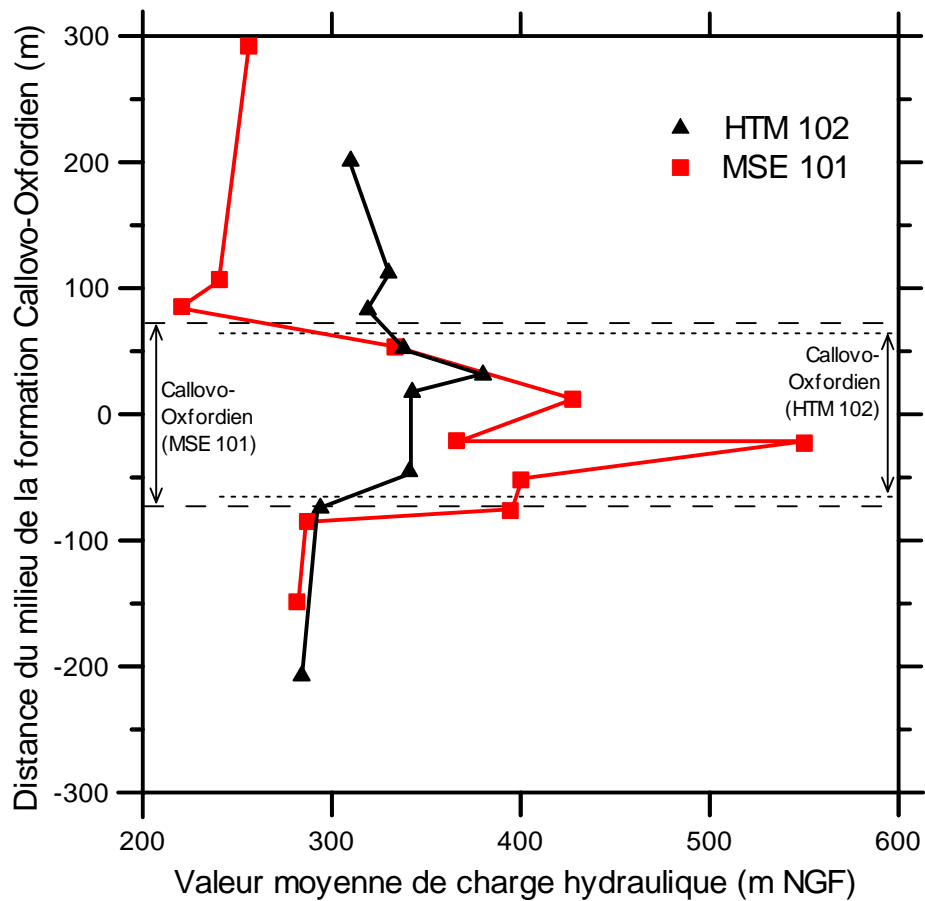


Figure 5-3 Variation verticale de la pression hydraulique dans le Callovo-Oxfordien et les calcaires hydrogéologiques sus et sous-jacents du Dogger et de l'Oxfordien en fonction de la distance des intervalles des essais du milieu du Callovo-Oxfordien.

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

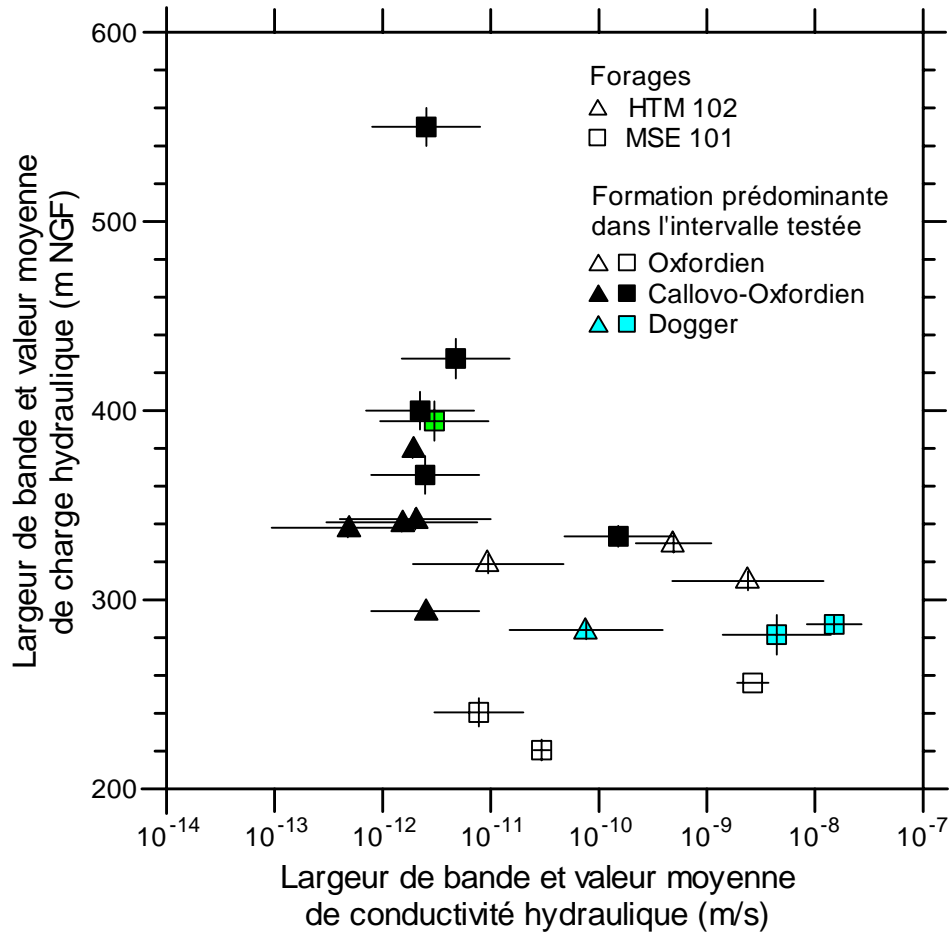


Figure 5-4 Dépendance de la pression hydraulique vis-à-vis de la conductivité hydraulique dans le Callovo-Oxfordien et les calcaires sous- et sus-jacents du Dogger et de l'Oxfordien.

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

5.4.2.5 Hydrochimie

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

Pour ce qui concerne les eaux souterraines des calcaires du Dogger, seul le forage MSE 101 apporte quelques informations.⁴⁷ Avec 4,3 g/l TDS (total des solides dissous) la teneur totale en sel dépasse de beaucoup la concentration normale de l'eau de mer. Le faciès des eaux souterraines est du type NaCl.

En raison des petits diamètres des pores, il est difficile, d'un point de vue méthodologique et technique, d'extraire et d'analyser l'eau des roches argileuses du Callovo-Oxfordien. L'ANDRA a appliqué différentes techniques pour surmonter ces problèmes, le pressage et la lixiviation, la deuxième technique fournissant des concentrations plus élevées des solutés. Les données que nous présentons ont été obtenues par pressage.⁴⁸

L'eau dans les roches argileuses du Callovo-Oxfordien se trouve dans un milieu réducteur comme l'indique la présence de pyrite plutôt que d'oxydes de fer. Les teneurs en sel dans le Callovo-Oxfordien varient quelque peu dans les trois forages HTM 102 (2,7 – 5,5 g/l), EST 104 sur le site du laboratoire (3,7 – 8,5 g/l) et MSE 101 (4,2 – 7,2 g/l). En règle générale, le chlorure et/ou le sulfate dominant, pour les anions, pour les cations ce sont le sodium, suivi du calcium. Les concentrations élevées en sel dans le forage EST 104 sont dues au sulfate plutôt qu'au chlorure. En général, les concentrations en sel sont les plus élevées dans le forage MSE 101. La profondeur du Callovo-Oxfordien, plus élevée dans ce forage qu'aux autres endroits, pourrait en être la raison.⁴⁹

La salinité de l'eau dans les calcaires de l'Oxfordien se situe entre 500 et 650 mg/l dans les zones d'eaux souterraines libres. Au site de Bure (forage EST 103), où l'alimentation et circulation de l'eau sont limitées, la concentration est de 1,455 mg/l. Le faciès hydrochimique est de type Na-HCO₃. La composition chimique des eaux souterraines dans les calcaires du Kimméridgien dépend également de la couverture. Là où la charge hydraulique est libre, la teneur en sel est d'environ 550 mg/l. Au site de Bure (EST 103) la concentration en sel est de 932 mg/l, le faciès des eaux souterraines est du type Mg-HCO₃. Les investigations isotopiques au site de Bure indiquent que les eaux souterraines dans les calcaires de l'Oxfordien et du Kimméridgien sont d'origine météorique⁵⁰.

⁴⁷ ANDRA Référentiel Géologique Tome 2, 2001, chapitre IV.2.2 and tableau 4.2-01

⁴⁸ ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001, chapitre II.3.3

⁴⁹ ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, chapitre II.3.3

⁵⁰ ANDRA BET 2002, page 175

Les concentrations en sel et particulièrement en chlorure, décroissantes des calcaires du Dogger à ceux de l'Oxfordien, sont interprétées de façon préliminaire par l'ANDRA comme des indicateurs de diffusion du Dogger à l'Oxfordien en passant par le Callovo-Oxfordien.⁵¹

5.5 Le modèle hydrogéologique conceptuel de l'ANDRA

A partir des propriétés hydrogéologiques du Callovo-Oxfordien et des formations sus- et sous-jacentes du Dogger et de l'Oxfordien, l'ANDRA a dérivé un modèle conceptuel du transport des solutés qui devrait être validé pour la zone équivalente de transposition⁵².

5.5.1 Callovo-Oxfordien

Les argilites du Callovo-Oxfordien forment un aquifère semi-perméable de taille régionale entre les formations aquifères des calcaires du Dogger et de l'Oxfordien. La diffusion des solutés dans le Callovo-Oxfordien non perturbé est le transport prévalent. La migration potentielle des radionucléides est supposée suivre le gradient de concentration et parvenir à une couche plus perméable, soit les calcaires du Dogger ou ceux de l'Oxfordien. Par conséquent, une migration verticale plutôt que latérale à la stratification est prise en compte. Cette conclusion est principalement dérivée des caractéristiques suivantes.⁵³

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

⁵¹ voir Section 5.5

⁵² ANDRA Référentiel Géologique Tome 1, chapitre II.5.3, Tome 4, chapitre III.3

⁵³ voir aussi Section 5.4, Figures 5-2 and 5-3

5.5.2 Les formations sus- et sous-jacentes

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

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

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

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

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

5.6.1 Contraintes et critères

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

Pour réduire la complexité de l'information hydrogéologique et des informations éventuellement importantes pour l'hydrogéologie, nous avons limité notre évaluation du

programme scientifique de l'ANDRA aux aspects étroitement liés à son modèle conceptuel.

Un programme de forage profond visant à fournir des informations hydrogéologiques sur la zone de Bure, en complément de celles provenant des forages aux trois emplacements mentionnés à la section 5.4, a commencé en 2002. Le programme d'investigations in-situ dans les forages et d'échantillonnage dans le laboratoire n'est pas connu en détail. C'est particulièrement vrai pour les essais in-situ sur la conductivité hydraulique ou la pression hydraulique (numéro, profondeur, longueur, position stratigraphique et pétrofaciales des sections testées, etc.). Par ailleurs, les résultats de ces recherches ne sont pas disponibles jusqu'à maintenant.

Notre évaluation porte sur les questions suivantes :

- le programme sera-t-il mené en fonction de l'état des connaissances et des techniques ? (Section 5.6.2),
- le modèle hydrogéologique conceptuel de l'ANDRA pour décrire l'écoulement des eaux souterraines sur le site de Bure et pour l'évaluation à long terme du transport potentiel de radionucléides du site de stockage à la biosphère est-il plausible ? (Section 5.6.3),
- les connaissances et la compréhension des caractéristiques pertinentes des argilites et des processus associés sont-elles suffisantes ? (Section 5.6.4),
- la base de données est-elle suffisante pour permettre l'évaluation des propriétés de confinement du Callovo-Oxfordien, notamment la validation des modèles conceptuels et mathématiques ? Le programme hydrogéologique est-il conçu de façon à combler les lacunes dans les connaissances et la base des données, pour permettre la validation et l'évaluation des incertitudes et du caractère pénalisant des modèles et des résultats ? (Section 5.6.5),
- la base scientifique est-elle suffisamment rigoureuse pour transposer les résultats des investigations prévues à la zone équivalente de transposition ? (Section 5.6.5).

Les recommandations sur le programme scientifique hydrogéologique découleront des différences identifiées entre l'approche de l'ANDRA et les expérimentations considérées comme essentielles ou utiles. Une évaluation détaillée pour démontrer la conformité réglementaire des résultats obtenus jusqu'ici avec les critères hydrogéologiques de la Règle fondamentale pour la sélection du site dépasse le cadre de notre évaluation. Nous centrons notre étude sur les argilites du Callovo-Oxfordien.

Les thèmes qui suivent ne seront pas traités dans l'évaluation hydrogéologique, même s'ils ont, ou peuvent avoir une certaine importance à long terme pour la situation hydrogéologique dans le « champ lointain » du stockage envisagé.

- la production de gaz à partir des déchets du point de vue des effets de la pression de gaz accrue de manière « critique » sur la fonction de barrière des roches argileuses, et du milieu hydro-chimique autour des zones de stockage des déchets,

- les effets géomécaniques et thermiques liés au creusement et à la mise en place des déchets, et leurs effets éventuels sur les propriétés hydrauliques de la roche hôte dans le « champ lointain ».

Ces aspects sont partiellement traités dans les chapitres 4, 2 et 3.

5.6.2 Etat des connaissances et des techniques

Bien qu'on ne dispose pas d'informations détaillées sur les recherches hydrogéologiques en cours pendant le programme de forage actuel, on peut supposer que l'ANDRA utilise une approche similaire à celle qui a procédé la campagne de forage profond, mais l'a adapté aux avancées des techniques et des instruments de mesure. On peut donc supposer que les recherches, en ce qui concerne la méthodologie et les investigations hydrogéologiques, sont effectuées avec des moyens techniques de haut niveau, en fonction de l'état des connaissances.

L'ANDRA participe à plusieurs projets internationaux qui traitent de certains aspects hydrogéologiques pertinents pour le stockage ultime des déchets radioactifs en général, et dans des formations argileuses en particulier. L'ANDRA participe activement aux expérimentations qui sont menées dans des laboratoires souterrains déjà créés, en particulier ceux du Mont Terri et de Mol. A ce jour, l'information présentée par l'ANDRA dans ses descriptions détaillées de l'hydrogéologie de Bure, notamment le Référentiel Géologique et le Dossier 2001 Argile, a été acquise avec des techniques de pointe. Quand ces techniques ne sont pas disponibles, l'ANDRA contribue au développement d'une méthodologie et de techniques sophistiquées pour l'acquisition de données.

L'approche scientifique pour déterminer et évaluer les propriétés du confinement du Callovo-Oxfordien et du transport des solutés dans les formations aquifères sus- et sous-jacentes telle qu'elle est présentée dans ANDRA 2001 et ANDRA 2002-2005⁵⁴ ainsi que les spécifications du programme semblent être très diversifiées. On peut s'attendre à ce que les résultats de l'ANDRA permettent de répondre aux questions hydrogéologiques résultant des exigences géologiques et méthodologiques de la Règle fondamentale. Il faut en particulier noter, en ce qui concerne l'écoulement régional des eaux souterraines, l'intégration dans le modèle de tout le bassin de Paris. Une attention spéciale est portée sur l'origine et, en particulier, la diagenèse du Callovo-Oxfordien et des formations encaissantes directes, y compris les processus mis en jeu, et leur influence sur la variabilité des propriétés de transport. A ce jour, il n'est pas possible d'évaluer de manière définitive, dans quelle mesure les modifications du programme qui ont été introduites en réponse au retard pris par les expérimentations souterraines, pourront être considérées comme équivalentes du point de vue de la fiabilité et de la représentativité des résultats. L'interprétation des résultats repose sur une base scientifique rigoureuse. La participation à la recherche de l'ANDRA de plusieurs établissements scientifiques permet de s'assurer

⁵⁴ Dossier 2001 Argile et ANDRA 2002-2005, chapitre II

que différentes options scientifiques seront introduites sur les sujets les plus importants. Plusieurs thèses sur des sujets scientifiquement pertinents ont été faites ou sont en cours en coopération avec l'ANDRA. Cependant, il est parfois difficile de suivre comment l'ANDRA passe des résultats de la recherche à des jugements relatifs à la sûreté, tout d'abord parce que l'information est répartie entre un grand nombre de publications scientifiques détaillées plutôt que rassemblée dans des présentations synthétiques.

Il semble que l'ANDRA ait suivi une approche quelque peu restrictive sur certaines questions hydrogéologiques pertinentes relatives à la sûreté. Il est crucial de prendre en compte l'interdépendance des propriétés hydrogéologiques et géomécaniques avec les propriétés hydrauliques les plus importantes, en particulier la perméabilité/conductivité hydraulique **in-situ**. Le Dossier 2001 Argile et ANDRA 2002b ne permettent pas de savoir clairement si l'ANDRA a accordé aux données in-situ pertinentes l'attention qu'elle mérite pour démontrer que les données disponibles peuvent être transposées à la zone équivalente de transposition, et aussi pour conclure que les propriétés hydrauliques du Callovo-Oxfordien sont adéquates à n'importe quel endroit de la zone équivalente de transposition. Il en est de même pour la discussion au sujet de la présence possible d'hétérogénéités qui pourraient altérer la qualité de rétention du Callovo-Oxfordien. Elle recoupe tout particulièrement la question de la pertinence des fractures de différentes tailles et des hétérogénéités sédimentaires pour les propriétés de rétention du Callovo-Oxfordien. C'est une question d'une importance cruciale pour la démonstration des propriétés de confinement de la couche hôte.

5.6.3 Plausibilité du modèle conceptuel de l'ANDRA

Le modèle conceptuel de l'ANDRA postulant le transport diffusif des solutés à travers le Callovo-Oxfordien⁵⁵ et le transport par convection dans les sédiments sus- et sous-jacents est plausible. Les arguments présentés pour appuyer la thèse de la migration diffusive dans le Callovo-Oxfordien sont, en général en conformité avec

- les connaissances scientifiques actuelles sur des propriétés pertinentes des roches argileuses en général (section 5.6.4) et
- les résultats hydrogéologiques du site de Bure et dans les environs montrant clairement la faible perméabilité de la couche hôte (section 5.4.2).

Cependant, la démonstration actuelle de la migration diffusive n'est pas convaincante. Il existe plusieurs points qui n'ont pas encore été pris en compte ou démontrés de façon assez approfondie pour diminuer des incertitudes ou pour exclure toute possibilité d'écoulement non diffusif. Ces points sont les suivants :

- la variabilité latérale et verticale de la conductivité hydraulique de la pression de l'eau et leurs interdépendances et causes,

⁵⁵ voir Section 5.5

- la pertinence de la composition du Callovo-Oxfordien et de sa variabilité latérale et verticale pour la conductivité hydraulique in-situ en particulier pour les sections plus riches en carbonates,
- la pertinence des fractures de différentes tailles,
- la communication hydraulique entre différents types d'hétérogénéités de conductivité hydraulique potentiellement plus élevées, par exemple des couches plus riches en carbonates, des plans de stratifications et des zones de fracture,
- la formation, ainsi que l'extension d'une structure hydraulique de la zone de surpression, y compris la pertinence des hétérogénéités de différentes tailles (section 5.6.5),
- indicateurs de l'extension de la zone de surpression, elle-même étant un indicateur d'une faible perméabilité.

En raison de ces incertitudes il est nécessaire de valider le modèle conceptuel en utilisant des séries de données indépendantes de celles qui sont pertinentes pour le modèle même (voir la section 5.6.5).

5.6.4 Connaissances relatives aux propriétés des roches argileuses consolidées

5.6.4.1 Propriétés et caractéristiques pertinentes

En termes généraux et simplifiés, l'intérêt des argilites, comme celles du Callovo-Oxfordien du site de Bure, comme roche hôte pour le stockage ultime des déchets radioactifs réside dans leur faible perméabilité (ainsi que leur faible porosité effective) et leur capacité de rétention, en particulier par sorption. Comme l'ANDRA le suppose pour le site de Bure, étant donné que la perméabilité est suffisamment faible, la diffusion plutôt que la convection est probablement le type de transport des radionucléides dans les formations encaissantes directes.

La capacité des argilites à servir de barrière efficace au transport par convection des fluides et même des gaz est en général bien connue. Elle peut être déduite de l'existence de certains types de gisements de pétrole et de gaz. L'efficacité avec laquelle les argilites peuvent effectivement séparer différentes formations d'eaux souterraines est un autre exemple. D'un autre côté toutes les formations argileuses ne possèdent pas ces propriétés à un degré suffisant pour assurer un confinement géologique. Cependant, l'identification et la caractérisation d'un site sont compliquées par le fait qu'il n'existe pas de critères permettant de déterminer simplement, à partir de la fourchette des résultats obtenus par les investigations sur le terrain, si le processus important est la migration diffusives ou le transport convectif.

La Règle Fondamentale III.2.f (section 5.2) exige une très faible perméabilité et un faible gradient hydraulique pour la couche hôte, mais elle ne propose pas de critères quantitatifs

pour y répondre⁵⁶. Le Comité allemand sur le processus de sélection d'un site (AkEnd) propose, sans viser un type de roche particulier, que la couche isolante entourant le site de stockage présente un champ de conductivité hydraulique (in situ) inférieure à 10^{-10} m/s et une épaisseur de 100 m minimum⁵⁷. Pour pouvoir comparer différents sites pendant le processus de sélection le comité a classé les formations rocheuses comme "favorables" si leur champ de conductivité hydraulique est $<10^{-12}$ m/sec ou "relativement favorables" s'il est entre 10^{-12} et 10^{-10} m/sec. Une conductivité hydraulique inférieure à 10^{-12} m/sec est considérée comme une indication de diffusion plutôt que de transport convectif. L'isolement des zones rocheuses de moindre perméabilité et de plus grande épaisseur, conformément aux exigences minimum, ou assurée par l'isolement des zones rocheuses d'autres sites, offre évidemment une certaine réserve de sécurité.

En ce qui concerne la comparaison de différents sites candidats de stockage l'AkEnd a indiqué des formations avec des coefficients de diffusion inférieurs à 10^{-11} m²/sec comme "favorables", de 10^{-11} à 10^{-10} m²/sec comme "relativement favorables" et supérieurs à 10^{-10} m²/sec comme "moins favorables"⁵⁸.

Cependant, il ne suffit pas qu'un site réponde à tous les critères "favorables" indiqués par l'AkEnd pendant le choix du site pour qu'il soit réellement adapté ou respecte les exigences légales. Il semblerait que ce soit le cas pour le site de Bure. Bien que le coefficient de diffusion postulé pour le scénario d'évolution normale soit dans le domaine des coefficients de diffusion "favorables" de l'AkEnd, la performance du site estimée de façon préliminaire dans le Dossier 2001 Argile ne répond pas à la norme requise par la Règle III.2.f⁵⁹. En conclusion, dans ces circonstances, l'épaisseur de 100 m, ou même supérieure à 130 m, du Callovo-Oxfordien n'apporterait plus aucune marge de sûreté. Elle ne suffirait même pas à assurer la sûreté nécessaire. Naturellement, ces remarques sont faites à titre de comparaison et nous admettons que l'ANDRA considère que les calculs sont pénalisants.

La perméabilité et la porosité effective des roches argileuses légèrement consolidées du Callovo -Oxfordien de Bure, ne dépendent pas seulement de leurs propriétés "primaires". Les propriétés « primaires » se sont formées durant le dépôt sédimentaire, et ensuite par le processus de diagenèse. Les propriétés géomécaniques sont aussi particulièrement importantes. Elles dépendent elles-mêmes de la composition minéralogique et granulométrique de la formation, de son degré de consolidation, induit par la compaction sous le poids des dépôts sus-jacents ou la décompaction des roches par l'érosion, ainsi que de l'état de contraintes tectoniques spécifique au site. Dans ce contexte, il est important de noter qu'il n'existe pas de massifs rocheux importants qui soient homogènes et se composent uniquement d'argile quand la taille des grains et la composition minéralogique sont toutes les deux prises en compte. La plupart des roches argileuses sont des mélanges composés de fractions différentes de taille de grain et de différentes phases minéralogiques. Cela signifie que l'influence de la variabilité spatiale de la

⁵⁶ voir Section 5.2

⁵⁷ AKEND 2002, chapitre 4.1.3

⁵⁸ AKEND 2002, Tableau 4.3

⁵⁹ see Chapter 1; CNE 2002; ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.A, p. 134

composition sur les propriétés hydrauliques doit être prise en compte dans l'évaluation de la couche hôte. C'est également vrai pour les modifications épigénétiques des propriétés pertinentes pour l'hydrogéologie par la contrainte tectonique, en particulier la formation de fractures à différentes échelles, et les fissures liées à l'activité humaine.

La représentativité spatiale des données hydrauliques des roches de faible perméabilité comme le Callovo-Oxfordien du site de Bure, est insuffisante même si elles sont obtenues par des forages in situ. En effet, du fait de la faible perméabilité, la masse rocheuse affectée par un essai hydraulique et lui répondant, est très réduite. Par conséquent, les indicateurs des propriétés hydrauliques in-situ qui peuvent être obtenues plus facilement et avec plus de représentativité doivent être employés pour s'assurer que les propriétés hydrauliques nécessaires peuvent être trouvées non seulement à proximité du forage examiné mais dans une zone plus étendue. Dans le cas de Bure cette zone est au moins de la taille de la zone équivalente de transposition.

Suivant la situation locale, différentes propriétés et caractéristiques pétrographiques et géochimiques des roches argileuses peuvent servir d'indicateurs pour leurs propriétés hydrauliques in-situ. Un examen des effets des différentes compositions et des effets diagénétiques et épigénétiques selon leurs degrés d'importance montre que les indications suivantes sur la **perméabilité relativement élevée et/ou la porosité effective** des formations argileuses doivent prises en compte

- faible teneur en argile,
- faible teneur en minéraux argileux gonflants (en particulier la smectite),
- forte teneur en carbonates. Elle peut agir sur la porosité et le diamètre des pores, fragiliser la roche et donc créer des cassures ouvertes de différentes tailles, des fissures et des diaclases (également en fonction du type et du degré de contrainte tectonique),
- teneur élevée en argiles silteuses et/ou en quartz. Elle peut engendrer une augmentation du diamètre des pores, de la perméabilité et de la porosité accessible.

Pour une composition donnée, les effets de tous ces facteurs dépendent de la répartition des carbonates et/ou des argiles silteuses dans la formation et donc de sa texture. La dispersion de la répartition des carbonates et/ou des argiles silteuses dans la roche n'affectera pas les propriétés mécaniques de la même manière et au même degré que leur enrichissement dans les couches ou les intercalations. C'est le cas pour les roches argileuses du crétacé inférieur sur le site de stockage de Konrad en Allemagne. Dans ce site, malgré une teneur globale plus faible en carbonates, la nature cassante des couches dont la teneur en carbonates est plus élevée a engendré une perméabilité plus élevée par rapport à celles dont la teneur en carbonates est plus élevée, mais dispersée⁶⁰. Outre la concentration et le type de répartition des hétérogénéités minéralogiques ou granulométriques, bien sûr, la connectivité de ces zones de perméabilité éventuellement

⁶⁰ Appel & Habler 2002, Tableau 7-30

accrue joue un rôle dans leur importance pour le mouvement des eaux souterraines et le transport des solutés.

Les caractéristiques suivantes ne sont liées qu'indirectement à la conductivité hydraulique mais peuvent être néanmoins interprétées comme indicatrices d'une perméabilité élevée :

- une faible profondeur. Elle indique un faible degré des effets de compaction et des effets diagénétiques ou épigénétiques sur la composition minéralogique, mais par contre elle indique une porosité relativement élevée ou la décompression des roches compactes (par exemple en raison de l'érosion) et la formation ou l'ouverture de fractures latentes qui en résultent.
- une forte charge thermique s'étant produite dans le passé géologique qui aurait pu sensiblement changer les propriétés mécaniques de la roche (fragilité accrue) et entraîner des fractures ouvertes en réponse à une contrainte tectonique supplémentaire,
- l'existence de fractures isolées ou d'un réseau relié (ouvert) de fractures de différentes tailles (fissures, diaclases) engendrées par la contrainte tectonique actuelle ou passée ou liée aux activités humaines.

Pour ces mêmes raisons, il est possible que les formations qui ne possèdent pas ces propriétés ou les possèdent à un moindre degré présentent une perméabilité et une porosité effective relativement faibles. Des exemples elucidant l'influence de certains de ces facteurs sur la perméabilité des formations argileuses sont présentés dans Appel et Habler⁶¹.

Ces dernières 10 à 15 années, au cours des recherches détaillées sur l'aptitude de différentes formations argileuses pour le stockage ultime des déchets radioactifs, quelques indicateurs supplémentaires sur la faible perméabilité d'une formation de roche argileuse ont été identifiés et étudiés (par exemple : les argiles Opalinus du site de Benken, Suisse⁶²) :

- L'existence d'une zone significative de surpression dans la formation, concernant aussi bien la situation hydrostatique attendue que les pressions plus basses dans les formations hydrogéologiques sus- et sous-jacentes, particulièrement les couches aquifères, s'opposant au transport par convection des solutés à travers la formation,
- Des profils hydrochimiques et isotopiques caractéristiques à travers la formation dont l'interprétation montre un transport diffusif plutôt que convectif.

A ce jour les processus contrôlant la formation de pressions anormales ne sont pas bien compris.⁶³ Leur quantification est difficile parce que les paramètres pertinents ne sont pas bien connus (par exemple la conductivité hydraulique à grande échelle et sa dépendance vis-à-vis du gradient hydraulique, l'efficacité osmotique). Les processus les plus

⁶¹ Appel & Habler 2002, chapitre 7.2.5

⁶² NAGRA 2002, chapitre 4.2.5

⁶³ OECD-NEA 2003

fréquemment évoqués pour expliquer les pressions anormales sont le couplage hydromécanique (par exemple la compaction due à l'augmentation des terrains de recouvrement, la décompression due à l'érosion ou à la fonte des glaciers) et le couplage géochimique (osmose).

Au site de Benken en Suisse, où le degré de compactage de l'argilite Opalinus est analogue à celui du Callovo-Oxfordien de Bure, la surpression est interprétée comme le résultat de l'évolution d'un enfouissement-soulèvement. Etant donné que ce processus prend beaucoup de temps, la présence d'une zone de surpression peut être interprétée comme un indicateur de la faible perméabilité à long terme. L'aspect le plus significatif qui pourrait affecter cette situation est la présence de fractures, hydrauliquement actives mais ne pouvant pas être détectées par des investigations, comme par exemple les campagnes sismiques 3D.⁶⁴

5.6.4.2 Callovo-Oxfordien de Bure

Une charge thermique élevée dans le passé et une faible profondeur n'apparaissent pas comme des facteurs pouvant avoir des conséquences significatives sur les propriétés hydrauliques du Callovo-Oxfordien argileux sur le site de Bure (voir Section 5.4). Selon les résultats disponibles pour les investigations in-situ et en laboratoire (voir Section 5.4.2.3), la matrice de roches argileuses semble présenter une très faible conductivité hydraulique. Cependant, les hétérogénéités ou les discontinuités de différents types et dimensions posent un problème majeur, parce qu'elles peuvent augmenter localement la conductivité hydraulique et réduire le développement spatial de la "zone homogène de faible perméabilité" qui est recherchée :

- La variabilité verticale et latérale de la teneur en minéraux en général, et en particulier du pourcentage de minéraux d'argile gonflante, résultant peut-être de l'existence de plans de stratification et d'autres interfaces entre les masses rocheuses de composition différente qui présentent une importance pour l'hydrologie.
- la variabilité verticale de la teneur en carbonates. En raison de la formation et de l'existence de fractures dans des sections enrichies en carbonates, elle influence le comportement mécanique de la formation et, indirectement, la conductivité hydraulique,
- l'existence de fractures hydrauliquement actives.

Un travail exhaustif a été effectué par l'ANDRA ou pour l'ANDRA sur la variabilité latérale et verticale des facteurs pétrographiques et géomécaniques.⁶⁵ La pertinence hydraulique de ces variabilités ne peut pas être évaluée sans établir de distinction entre les zones pétrographiques et géomécaniques. D'après l'état des travaux rapporté dans le Dossier 2001 Argile et le Référentiel Géologique, l'ANDRA ne l'a pas encore fait en ce

⁶⁴ NAGRA 2002

⁶⁵ par ex. CLARET et al. 2002

qui concerne les propriétés hydrauliques in-situ. L'orientation et la longueur des échantillons dans les forages HTM 102 et MSE 101 ne permettent même pas une corrélation entre la composition de la roche, les propriétés mécaniques et la perméabilité, puisque les longueurs des échantillons examinés ne correspondent pas aux segments géomécaniques. La corrélation entre ces propriétés et la conductivité hydraulique, n'a donc pas été encore suffisamment démontrée.⁶⁶

Les indicateurs de faible perméabilité et de diffusion à long terme au site de Benken mentionnés ci-dessus sont aussi importants pour Bure. L'osmose est considérée comme un facteur important pour la formation de la zone de surpression dans le Callovo-Oxfordien.⁶⁷ De plus, la question de l'importance des fractures sur la perméabilité est similaire à celle qui se pose pour le site de Benken.

Pour le Callovo-Oxfordien de Bure l'importance éventuelle des fractures est particulièrement évidente, parce que

- les fractures dans les formations hydrogéologiques situées au-dessus du Callovo-Oxfordien indiquent que la contrainte tectonique a eu/a encore une incidence sur le Callovo-Oxfordien (Section 5.6.5.2.) et que l'existence de fractures au sein du Callovo-Oxfordien ne peut être simplement exclue,
- les différences significatives entre les pressions hydrauliques des calcaires du Dogger et de l'Oxfordien⁶⁸ permettraient un transport vertical des solutés, étant donné que la perméabilité est suffisante le long de ces discontinuités verticales.

Les indicateurs hydrochimiques et isotopiques du Callovo-Oxfordien de Bure indiquent une diagénèse complexe avec un échange limité entre les minéraux et les fluides, et la préservation d'une signature isotopique initiale⁶⁹. Par contre il y a pas d'indications qu'un changement dans la composition de l'eau primaire se soit produit⁷⁰. Jusqu'à maintenant, aucun profil de concentration typique d'une migration diffusive depuis le Callovo-Oxfordien dans les couches sous et sus-jacentes n'a été identifié pour un quelconque constituant des eaux souterraines.

En conclusion, il faudra démontrer la possibilité de transposer les résultats de la surpression ainsi que des signatures diffusives typiques d'autres sites à celui de Bure, ceci dans le contexte la formation d'une zone de surpression et de ses caractéristiques. Cette démonstration n'a pas été encore faite. En son absence, les indicateurs d'une faible perméabilité prévue à long terme de la roche hôte doivent être déduits de la recherche sur le site.

⁶⁶ voir Section 5.6.5.1

⁶⁷ ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001, chapitre III.1.2.3

⁶⁸ voir Figure 5-3

⁶⁹ ROUSSET et al. 2002, LAVASTRE et al. 2002

⁷⁰ LAVASTRE et al. 2002

5.6.5 Données hydrogéologiques de base et programme de recherche

5.6.5.1 Exigences générales

Pour l'évaluation hydrogéologique d'un site de stockage, la base de données requise pour le transport potentiel de radionucléides du site de stockage à la biosphère doit être plus développée que celle servant à la formulation d'un modèle conceptuel des propriétés de rétention d'un site et de la situation générale de transport.⁷¹ Cette démarche est essentielle pour une modélisation fiable.

Les données sur la perméabilité et la conductivité hydraulique doivent être acquises principalement par des expérimentations in situ. Généralement, ces données sont recueillies grâce à des mesures utilisant différentes techniques dans les forages. Les résultats de ces mesures doivent fournir des informations intégrées pour l'ensemble des formations ou pour des segments importants. Ils doivent également fournir des informations détaillées sur les propriétés pertinentes de sections plus petites si celles-ci existent.

Cependant, pour des roches de faible perméabilité comme le Callovo-Oxfordien, même des données hydrauliques in-situ ont une représentativité spatiale réduite (Section 5.6.4.1). Par conséquent, il est méthodologiquement difficile de démontrer et de vérifier l'existence de l'extension spatiale de la zone équivalente de transposition et de la qualifier de « zone homogène de faible perméabilité » (Section 5.6.4.2). Comme les roches argileuses naturelles présentent des propriétés et des caractéristiques plus ou moins favorables, il est essentiel de ne pas se borner à évaluer les propriétés et caractéristiques désirées mais aussi celles qui pourraient éventuellement compromettre la faisabilité de la formation concernée ou réduire sa proportion avec des propriétés positives.

Si l'existence de ces propriétés ou caractéristiques ne peut être exclue a priori, il faut analyser leur importance autant que les propriétés ou caractéristiques recherchées pour réduire les incertitudes liées à l'extension et à la qualité de la « zone homogène de faible perméabilité » recherchée. Les principaux objectifs des recherches hydrogéologiques du Callovo-Oxfordien de Bure sont donc de :

- démontrer et vérifier aussi précisément que possible l'existence des propriétés recherchées par des investigations in-situ à l'intérieur de la zone équivalente de transposition,
- démontrer l'absence de caractéristiques ou de propriétés négatives, comme des sections particulières de la séquence, des plans de stratification ou des fractures présentant une augmentation potentielle de la conductivité hydraulique ou,
- démontrer au moins que ces propriétés et caractéristiques ne vont pas nuire à la sûreté du stockage prévu.

⁷¹ voir Section 5.5

Les données de laboratoire sur la conductivité ou la perméabilité hydraulique fourniront des informations supplémentaires permettant de décrire les différences hydrauliques potentielles concernant les différentes échelles d'observation. Pour le Callovo-Oxfordien par exemple, l'ANDRA a relevé que la conductivité hydraulique in situ est supérieure de deux ordres de grandeur aux valeurs obtenues sur les échantillons dans le laboratoire⁷². Pour beaucoup de types de roche, même pour les formations argileuses, les différences entre les conductivités hydrauliques obtenues par essais in situ et l'analyse en laboratoire sont encore plus grandes. Cependant, avant de pouvoir utiliser les résultats des données de laboratoire sur la perméabilité comme indicateurs quantitatifs pour la perméabilité in situ, les raisons d'une telle relation quantitative et les conditions de validité de cette corrélation doivent être comprises. Jusqu'à présent, l'ANDRA n'a fourni des interprétations probables que sur cette relation⁷³.

Pour pouvoir décrire quantitativement les processus de migration et de transport, il faut obtenir des données sur des paramètres supplémentaires. Pour évaluer la diffusion prévue à travers les roches argileuses du Callovo-Oxfordien, il faut disposer de données de diffusion in-situ en plus des données existantes sur les coefficients de diffusion effectifs des échantillons.

Pour évaluer la vitesse et la direction du transport par convection, il faut connaître la porosité efficace des formations hydrogéologiques et la distribution des charges hydrauliques. Il faut aussi connaître leur géométrie et leur configuration, ainsi que l'emplacement des zones d'alimentation et des exutoires des eaux souterraines. Il faut également connaître la situation hydrochimique et la rétention des solutés par des processus chimiques et de sorption (coefficient de partition, Kd). En conclusion, l'importance des hétérogénéités, qu'elles soient sédimentaires ou tectoniques, doit être évaluée. L'objectif principal du programme de recherche en ce domaine est de fournir des données qualitativement suffisantes et représentatives sur les propriétés importantes des éléments concernés pour permettre la description et l'évaluation des voies de transfert depuis le stockage envisagé jusqu'à la biosphère.

5.6.5.2 Le programme de recherches de l'ANDRA

Les résultats des mesures in situ dans les forages et des analyses de laboratoire constituent la base pour le développement et la consolidation du modèle conceptuel de l'ANDRA sur le transport des solutés à travers le Callovo-Oxfordien et les formations sus- et sous-jacentes⁷⁴. D'une manière générale, la majeure partie des données hydrogéologiques spécifiques au site ou près du site présentées dans le Référentiel Géologique et le Dossier 2001 Argile ont été obtenues à partir des forages de l'ANDRA : HTM 102, à environ 3 km au sud-est du site, et MSE 101, à 12 km au nord-ouest de Bure. Ces forages traversent le Callovo-Oxfordien et fournissent des informations sur les formations sous-jacentes. Les forages sur le site (par exemple EST 103/104) s'arrêtent au

⁷² ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001, chapitre III.1.3.4

⁷³ ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001, chapitre III.1.3.4

⁷⁴ voir Section 5.5

milieu du Callovo-Oxfordien. Il existe des forages plus profonds de l'industrie pétrolière mais ils sont à plus de 15 km du site. Etant donnée la situation tectonique près des systèmes de grabens et des autres structures importantes, il n'est pas évident que leurs situations hydrologiques par rapport au site de Bure puissent fournir des informations pertinentes⁷⁵.

Des campagnes sismiques dans la zone de Bure ont révélé l'existence de failles verticales avec un rejet mineur, mais cependant « visible » dans certains cas, à travers le Callovo-Oxfordien. L'ANDRA a interprété ces données sismiques comme un indicateur de l'absence de failles qui joueraient un rôle important dans l'écoulement vertical des eaux souterraines et le transport par convection des solutés à travers le Callovo-Oxfordien.

Le programme scientifique de l'ANDRA jusqu'à 2001 et 2002 pour améliorer les connaissances et la base de données hydrogéologiques, en particulier celles nécessaires pour la modélisation de l'écoulement des eaux souterraines et le transport des solutés, est décrit dans le Dossier 2001 Argile et de façon plus approfondie et détaillée dans ANDRA (2002b). Il vise à améliorer la compréhension des relations entre les paramètres stratigraphiques, pétrographiques, géomécaniques et hydrauliques essentiels à l'évaluation des propriétés de confinement du Callovo-Oxfordien, ainsi que la base de données servant à la modélisation des eaux souterraines⁷⁶.

Conformément à ce programme des forages profonds supplémentaires ont été réalisés, ou sont en cours de réalisation, à des endroits sélectionnés dans le secteur de Bure. Les emplacements ont été choisis en fonction des besoins de la modélisation hydrogéologique et de l'amélioration de la corrélation des profils sismiques avec le détail de la séquence stratigraphique identifiée dans les forages.

Le programme a été modifié à la suite des résultats apportés par ces forages⁷⁷. De plus, à la suite de l'accident mortel de 2002, la CNE⁷⁸ a suggéré un changement dans le programme des forages. Depuis, des forages déviés profonds ont été effectués en 2003/2004 sur le site lui-même. Un des objectifs est d'étudier des phénomènes de structure qui devaient être étudiés dans le laboratoire⁷⁹.

Les informations détaillées sur le programme de forage et les résultats hydrogéologiques de la campagne de forage, en particulier les données sur la perméabilité et les pressions hydrauliques à l'intérieur des éléments hydrogéologiques concernés, ne sont pas encore disponibles. Selon l'ANDRA elles n'apportent aucune surprise.⁸⁰

Les objectifs des forages déviés sur le site de Bure comportent une recherche sur une linéation "secondaire" et les diaclases dans le Dogger et probablement dans le Callovo-Oxfordien, ainsi qu'une zone de fracture potentielle dans le Callovo-Oxfordien. La

⁷⁵ ANDRA Référentiel Géologique Tome 2, 2001, figure 2.1-01

⁷⁶ ANDRA 2002a

⁷⁷ ANDRA 2003e

⁷⁸ CNE 2003, p. 31

⁷⁹ ANDRA 2003a, 2003d

⁸⁰ ANDRA 2003c

détermination du champ de contrainte est aussi un objectif⁸¹. Les mesures in situ de la perméabilité hydraulique et de la pression hydraulique dans les forages, ainsi que la diagraphe géophysique ne sont pas mentionnées explicitement mais ont été/ou seront réalisées avec les moyens perfectionnés adéquats.

5.6.5.3 Évaluation du programme

La campagne de forage actuellement en cours permettra d'améliorer considérablement les données hydrogéologiques. Les forages déviés offriront en particulier la possibilité d'obtenir des informations sur les éléments structuraux de tailles différentes et à des distances différentes entre elles. Mais, malgré l'utilité de ces données, on peut se demander, à partir des objectifs connus pour les forages et des emplacements des forages, si les problèmes ou les questions suivantes reçoivent une réponse suffisante :

- La représentativité spatiale des données à partir d'un petit nombre de forages, même in situ, est très limitée et exige une transposition au moyen d'indicateurs appropriés (Section 5.6.5.1). L'ANDRA utilisera (ou utilise) des paramètres pétrographiques et géomécaniques pour l'interpolation et l'extrapolation des propriétés de rétention de la séquence verticale des sections individuelles du Callovo-Oxfordien à la zone équivalente de transposition. Cependant, le Référentiel Géologique, ne contient pas de données in situ ou de laboratoire sur la perméabilité qui peuvent être corrélées avec les propriétés de différentes zones géomécaniques et de pétrofaciès, parce que les intervalles des essais in situ ne se rapportaient pas à ces zones. Les informations relatives aux forages profonds récents ou prévus ne permettent pas de déterminer l'importance qui est accordée à l'acquisition de données in situ à partir de ces éléments et de ces éléments spécifiques pour permettre une corrélation avec les données de géomécanique et de pétrofaciès issues des recherches sur échantillons. Si une utilisation des résultats des recherches sur échantillons est envisagée, la compréhension quantitative de la relation entre les mesures in situ et sur échantillons doit être établie.

Autrement, l'ANDRA devra démontrer que la variabilité verticale des valeurs in situ de la perméabilité dans un forage donné et la distribution latérale dans différents forages est aléatoire ou a pour cause des processus non hydrauliques.

- Des indicateurs supplémentaires de la prédominance de la migration diffuse des solutés dans le Callovo-Oxfordien doivent être identifiés et leur capacité à révéler l'existence d'une zone importante de faible perméabilité doit être vérifiée. Ces indicateurs peuvent être la zone de surpression et la distribution spatiale des constituants des eaux souterraines Callovo-Oxfordien et des formations hydrogéologiques sus- et sous-jacentes, en particulier du chlore ou des isotopes environnementaux. Certains de ces indicateurs ont, dans une certaine mesure, déjà été étudiés. Ils ont fourni quelques informations sur l'évolution diagénétique du

⁸¹ ANDRA 2003a et ANDRA 2003b

Callovo-Oxfordien et des temps de séjour probables des eaux souterraines, mais sans mettre en évidence une tendance claire.⁸²

- Il y a un manque de données in situ sur la perméabilité des différentes zones géomécaniques du Callovo-Oxfordien qui présentent une teneur plus élevée en carbonates (par exemple la zone géomécanique D). Ces zones, ou des sections particulières de celles-ci, peuvent être plus fragiles et peuvent donc présenter une perméabilité plus élevée par rapport aux zones plus faibles en carbonates. Cela pourrait être vrai également pour les plans de stratification. Si cela est le cas et si elles sont reliées aux fractures hydrauliquement actives, ces hétérogénéités pourraient faire partie d'une voie composite ouverte au transport local par convection des solutés.
- La distance "normale" entre les fractures qui traversent verticalement le Callovo-Oxfordien (et les formations voisines) est de quelques mètres⁸³, ce qui rend difficile leur identification dans les forages verticaux. Le petit nombre de fractures identifiées jusqu'ici, n'exclut pas l'existence de fractures hydrauliquement significatives. Celles-ci peuvent être présentes et doivent être hydrauliquement étudiées par des forages déviés. Ces mesures devraient être faites dans la mesure des possibilités techniques.
- La formation des fractures et les variations pétrographiques et géomécaniques des argilites du Callovo-Oxfordien sont indépendantes les unes des autres. De plus les données hydrauliques in situ ayant une faible représentativité spatiale, il ne sera, par conséquent, pas possible d'exclure l'existence de fractures dans la zone de transposition équivalente par une simple transposition des propriétés pétrographiques et mécaniques indicatives. Il faut en revanche admettre qu'il puisse exister des fractures de petites tailles et/ou d'orientation défavorable difficiles à étudier. Il faut évaluer leur importance pour l'écoulement des eaux souterraines. Leur structure et leur perméabilité/transmissivité, ainsi que leur intégration dans la modélisation des eaux souterraines doivent être déterminées correctement.
- A partir des pressions hydrauliques très proches mesurées dans les calcaires du Dogger des forages HTM 102 et MSE 101⁸⁴, il semble difficile de décrire exactement les directions de l'écoulement des eaux souterraines dans les parties nord, nord-ouest de la zone équivalente de transposition. L'ANDRA ne semble pas envisager de faire des forages supplémentaires dans cette zone. Un forage profond, au minimum, dans cette zone ou à l'extérieur de la zone équivalente de transposition pourrait améliorer la compréhension de l'écoulement des eaux souterraines. On obtiendrait également, en plus des données acquises par des méthodes "indirectes" (campagnes sismiques), des données directes sur les

⁸² voir Section 5.6.4

⁸³ ANDRA 2002-2002, page 36

⁸⁴ voir Tableau 5-1 et Figure 5-3

propriétés hydrauliques du Callovo-Oxfordien extrapolables à la zone équivalente de transposition.

- A ce jour, peu d'informations sur les forages profonds à proximité du site de Bure semblent être disponibles sur la variabilité spatiale des propriétés des roches importantes pour le transport potentiel par convection des radionucléides dans les calcaires du Dogger et les formations au-dessus du Callovo-Oxfordien. Il semble que cela soit également vrai pour la situation hydraulique dans les formations situées entre le site et les exutoires potentiels des eaux souterraines. L'ANDRA devrait améliorer la base de données pour les paramètres indispensables à la modélisation du transport des solutés relatifs à la représentativité spatiale de la zone en question.

Les campagnes sismiques qui ont été effectuées dans la zone de Bure par l'ANDRA ou pour le compte de l'ANDRA ont jusqu'ici amélioré significativement la compréhension générale des variations verticales et horizontales des unités hydrogéologiques concernées et ont donné des éléments de compréhension sur l'existence ou l'absence de fractures importantes. Appliqués conjointement avec une diagraphie et une recherche sur échantillons elles représentent un outil puissant pour la subdivision de la séquence stratigraphique concernée et de la continuation de ses différentes sous-sections à l'intérieur de la zone de recherche. Dans ce domaine l'ANDRA a visiblement atteint un niveau de recherche très avancé.⁸⁵

Toutefois les campagnes sismiques ne constituent pas un outil puissant pour l'identification des structures verticales, en particulier des fractures/failles avec un petit rejet vertical. Par conséquent, les données sismiques existantes ne fournissent pas une base de données suffisante pour la description définitive et l'évaluation de la répartition des fractures de tailles différentes, leur orientation et leur éventuelle importance hydraulique⁸⁶ et ne permettent pas l'évaluation définitive de la situation hydraulique et hydrochimique et la modélisation définitive de l'écoulement des eaux souterraines. Selon l'état des recherches géophysiques de l'ANDRA telles que documentées dans le Référentiel Géologique et le Dossier 2001 Argile, d'autres techniques géophysiques qui peuvent présenter un meilleur potentiel pour la détection des structures verticales n'ont pas été utilisées ; de telles recherches ne sont en tout cas pas mentionnées dans les documents de l'ANDRA sur les recherches prévues qui sont évaluées ici⁸⁷.

5.6.5.4. Aspects supplémentaires

Validation des modèles

La base de données améliorée par les recherches de l'ANDRA selon le programme modifié⁸⁸ (section 5.6.5.1) sera probablement suffisante pour confirmer le modèle

⁸⁵ ANDRA BET 2002, p. 30

⁸⁶ voir Chapitre 7

⁸⁷ ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.A, ANDRA 2002-2005

⁸⁸ voir Section 5.6.5.1

conceptuel sur la pertinence des mécanismes de transport dans la couche hôte et les calcaires du Dogger et de l'Oxfordien. Les connaissances sur les paramètres pertinents pour l'écoulement des eaux souterraines et sa modélisation seront améliorées.

Cependant, même si les insuffisances mentionnées dans la section 5.6.5.1 sont réduites, les incertitudes dans la base de données et les connaissances sur la direction et la vitesse d'un transport potentiel des radionucléides du site de stockage aux exutoires potentiels des eaux souterraines demeureront. Il est donc est inévitable de valider les modèles, les évaluations et les calculs. Les paramètres utilisés pour cette validation doivent être indépendants des paramètres utilisés dans les modèles. Il faudra faire des recherches spécifiques pour acquérir des données nécessaires.

Incertitudes et caractère majorant des paramètres choisis

Pour ce qui concerne la modélisation, le Référentiel Géologique (Tome 1 et Tome 5) traite du problème des incertitudes en établissant systématiquement une distinction entre différents types d'incertitude.

Nous ne traiterons ici que des incertitudes se rapportant au modèle conceptuel de l'ANDRA et à la transposition des paramètres à la zone équivalente de transposition. Ces incertitudes découlent d'un manque de compréhension ou de connaissances et surtout d'un manque de données de base. Le manque d'information est dû à la faible résolution spatiale des données in situ sur la perméabilité et à des facteurs comme les discontinuités verticales (fractures) et des zones pétrographiques enrichies en carbonates. Il n'est pas possible de surmonter totalement ces incertitudes en augmentant le nombre de forages pour obtenir des données et/ou des informations hydrauliques supplémentaires sur l'existence des fractures et de leurs effets hydrauliques.

La faible résolution spatiale des données de perméabilité des roches de faible perméabilité ne peut être surmontée qu'en employant des indicateurs pour la perméabilité. Quel que soit l'indicateur choisi, il faudra démontrer que le paramètre correspondant indique réellement une faible perméabilité et possède une résolution spatiale plus fine que les valeurs de la conductivité hydraulique in situ. Les propriétés pétrographiques et géomécaniques utilisées par l'ANDRA sont probablement des indicateurs valables, à condition que la dépendance de la perméabilité in situ par rapport aux indicateurs soit suffisamment démontrée⁸⁹ et que la corrélation entre les paramètres soit démontrée par des approches géostatistiques, notamment en ce qui concerne la pertinence spatiale de ces corrélations. Cet aspect porte principalement sur la perméabilité de la matrice rocheuse.

L'existence d'hétérogénéités qui pourraient augmenter localement la perméabilité in situ de la matrice rocheuse et, par ailleurs, réduire l'extension de la(les) zone(s) de faible perméabilité « homogène » relative à la zone équivalente de transposition (Section 5.6.4.2) constitue une source d'incertitude essentielle. Il faut identifier la configuration des fractures de différentes tailles. Tout d'abord, il faut étudier l'efficacité hydraulique d'un nombre suffisant de fractures de différentes tailles du point de vue de leur efficacité

⁸⁹ voir Section 5.6.1

hydraulique. Comme l'existence de telles hétérogénéités ne peuvent être exclues a priori, cette incertitude doit être abordée avec une approche prudente. Puisqu'il ne sera pas possible de déterminer l'efficacité individuelle de toutes les fractures, un modèle conceptuel doit être développé. Dans celui-ci l'existence de fractures de différentes tailles est postulée sur la base de cette recherche et leur pertinence est évaluée en faisant varier les paramètres utilisés.

Les données qui sont employées dans la modélisation devront être aussi réalistes et appropriées que possible. Sinon les modèles et leurs résultats n'auront aucune chance d'être correctement évalués. L'utilisation d'hypothèses et d'évaluations pénalisantes doit être réservée aux cas où les données et les informations ne peuvent pas être obtenues comme il faut, en particulier pour la période au delà de 10 000 ans, comme le permet la Règle fondamentale.

A ce jour, on ne voit pas très bien comment l'ANDRA traitera les incertitudes et le choix de paramètres majorants liés à la question de la diffusion ou du transport par convection à travers le Callovo-Oxfordien le long d'hétérogénéités locales. Pour la modélisation de l'écoulement et du transport des solutés d'eaux souterraines dans les calcaires sus-jacents et sous-jacents du Dogger et de l'Oxfordien l'ANDRA identifie des incertitudes. La modélisation de l'écoulement des eaux souterraines et l'acquisition de données pour réduire les incertitudes se poursuit ; elles ne peuvent pas être évaluées du fait du manque d'informations sur les résultats des forages profonds récents et de leurs conséquences éventuelles pour des recherches supplémentaires.

Transposition des résultats de la recherche à la zone équivalente de transposition

Le Dossier 2001 Argile⁹⁰ décrit les caractéristiques les plus importantes du Callovo-Oxfordien à considérer pour extrapoler les données obtenues par des recherches dans le laboratoire souterrain (ou à d'autres endroits) à la zone équivalente de transposition, où serait éventuellement situé un site de stockage. Pour l'hydrogéologie, l'épaisseur minimum, les propriétés de confinement et l'absence de fractures hydrauliquement pertinentes, en particulier de failles, sont de la plus grande importance⁹¹.

Épaisseur du Callovo-Oxfordien

La variation de l'épaisseur du Callovo-Oxfordien autour du site de Bure a été identifiée par des investigations sismiques qui ont été calibrées avec les données des forages profonds sur le site et aux alentours. Les résultats des récents forages profonds⁹² tiendront probablement compte de l'amélioration du calibrage de l'interprétation sismique et par conséquent amélioreront les connaissances sur la variation de l'épaisseur.

En ce qui concerne l'épaisseur de la formation de confinement l'ANDRA prévoit d'inclure les formations encaissantes du Dogger et de l'Oxfordien, en raison de sa faible perméabilité⁹³. Dans ces conditions les règles d'extrapolation des données à la zone

⁹⁰ ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt. A chapitre VI.1.2.9.

⁹¹ voir également Chapitre 7

⁹² voir Section 5.6.1

⁹³ ANDRA 2002-2005, page 33

équivalente de transposition doivent inclure ces formations. Il est important de noter qu'un indicateur important des propriétés de confinement, la surpression de l'eau interstitielle, ne sera probablement pas valable pour la totalité ou une partie de ces formations calcaires⁹⁴.

Propriétés de confinement du Callovo-Oxfordien

Trois caractéristiques apparaissent clairement comme des facteurs conditionnant les propriétés de la formation⁹⁵:

- sa teneur en carbonates primaires et diagénétiques,
- la proportion de minéraux argileux en général et de smectite en particulier,
- la texture de la roche, et particulièrement la taille des pores.

A ce jour, il n'y a aucune information disponible sur la corrélation géostatistique entre paramètres pétrographiques/lithologiques/géomécaniques et perméabilité in situ. Si l'ANDRA considère le Callovo-Oxfordien comme une unité et la compare aux calcaires sus- et sous-jacents du Dogger et de l'Oxfordien, il y a le risque que d'éventuelles variations des propriétés hydrauliques ne soient pas détectées.

Le Callovo-Oxfordien montre une variation verticale évidente dans sa composition, en particulier dans les teneurs en argiles et en carbonates⁹⁶. A partir des valeurs moyennes des paramètres pétrographiques (par ex. la teneur en carbonates) et des paramètres géomécaniques (par ex. le module de déformation) pour les zones géomécaniques distinguées par l'ANDRA et présentées dans le Référentiel Géologique⁹⁷, on peut conclure que la teneur en carbonates, en particulier, peut affecter les propriétés géomécaniques. Cela peut influencer la perméabilité in situ. Par exemple l'épaisseur de la Zone géomécanique D n'est que de 5 m environ. Elle a été examinée dans le forage HTM 102 au sein d'un intervalle d'essai de 105 m de long (atteignant les calcaires du Dogger). Dans le forage MSE 101 elle a été incluse dans un intervalle de 35 m. Ces mesures n'ont pas fait apparaître une augmentation de la perméabilité. Cependant, ces longueurs des essais sont trop importantes pour détecter une perméabilité sensiblement plus élevée.

Influence des fractures

A partir des résultats de ses campagnes sismiques dans le secteur de Bure, l'ANDRA a exclu des fractures hydrauliques importantes, et même des failles, pour le transport (vertical) des solutés. Cette affirmation est étayée par les deux points suivants⁹⁸:

- la composante principale du mouvement le long des plans de faille est verticale, comme l'indiquent les failles identifiées par la campagne sismique 3D-dans les calcaires du Dogger et la partie plus inférieure du Callovo-Oxfordien.

⁹⁴ voir Figure 5-3

⁹⁵ ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.A chapitre VI.1.2.9

⁹⁶ voir Section 5.4.1 et Figure 5-1

⁹⁷ ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001, Tableaux 2.1-02 et 4.2-03

⁹⁸ ANDRA 2002-2005

- il n'existe aucune faille de rejet vertical principal (> 5 m) "visible" dans le Callovo-Oxfordien.

Toutefois, de telles campagnes ne peuvent détecter (toutes) les failles avec un rejet vertical faible ou inexistant. En outre, une configuration de fractures mineures, appelées « secondaires », peut ne pas être détectée par des forages verticaux. Il faut également tenir compte du fait que des failles avec un rejet mineur peuvent présenter une certaine importance hydraulique.

La position de l'ANDRA est discutée depuis longtemps par des habitants de la région sur la base de l'observation des failles et des fractures. Elle est aussi en partie en contradiction avec les résultats de Rocher et al.⁹⁹ Ils affirment que des fractures sans composante verticale principale mais potentiellement importantes hydrauliquement ont été identifiées dans les environs du site de Bure. Ces fractures sont liées au champ de contrainte actuel (de type principalement compressif). Ces résultats sont en conformité avec l'observation de la forte ovalisation dans les forages des recherches de l'ANDRA dans les environs du site.¹⁰⁰

En fait, il est difficile d'identifier par des forages verticaux des fractures presque verticales, quelles que soient leurs tailles, et espacées de plusieurs mètres. Même des failles présentant un rejet vertical mineur peuvent ne pas être détectées par des campagnes sismiques, même de haute résolution. Dans ce cas les informations pertinentes seront obtenues par les forages déviés actuellement effectués sur le site.¹⁰¹

Il n'apparaît pas clairement comment le programme scientifique de l'ANDRA, notamment ses forages déviés, traitera du problème de l'extrapolation des données à toute la zone équivalente de transposition.

Karst

Les calcaires du Dogger et de l'Oxfordien peuvent être affectés par une karstification (Section 5.4.2.3). Dans des zones de karst développé, l'écoulement des eaux souterraines, au moins localement, peut ne plus être conforme à la théorie « normale » de la filtration (selon la loi de Darcy), mais doit être décrit en termes de dynamique des fluides. Aussi, le processus karstique sur le site de Bure doit être étudié en détail et ses forces motrices particulières et les spécificités de son développement doivent être parfaitement comprises. Ces connaissances doivent ensuite être intégrées dans les modèles hydrogéologiques utilisés pour évaluer le transfert des radionucléides dans les formations situées au-dessous et au-dessus des argilites du Callovo-Oxfordien.

Des études pratiques de grottes karstiques ont été effectuées à travers un travail approfondi par Jaillet et ses collaborateurs.¹⁰² Cette recherche est à notre avis conforme

⁹⁹ Rocher et al. 2002, pages 2, 33

¹⁰⁰ ANDRA 1997

¹⁰¹ voir Section 5.6.4

¹⁰² Jaillet 2000.

aux normes les plus élevées. Elle a abouti à des enseignements importants, comme le développement du modèle phénoménologique relatif au développement de conduits karstiques dans les calcaires du Barrois et la saignée de la vallée de la Marne, et l'élucidation du rôle des dépôts de couverture dans le développement du karst.

Il reste à voir comment les informations concernant le développement des conduits karstiques et les orientations des écoulements d'eau karstique signalés par Jailliet seront intégrés dans les modèles hydrogéologiques relatifs à la sûreté ; les documents les plus récents que nous avons eu à notre disposition montrent que cela n'était pas encore le cas même s'il existe le projet de le faire.¹⁰³

Nous remarquons aussi que, bien que les études du groupe de Jailliet fournissent effectivement une grande quantité d'informations sur les structures des systèmes karstiques actuellement connus dans le Barrois, leurs bassins versants et beaucoup d'autres aspects de la karstification, il semble qu'il y ait un problème à relier ces résultats à la zone du site de Bure et à la zone équivalente de transposition. Même s'il est évident que les résultats des études du groupe de Jailliet sont directement pertinents pour la problématique du site de Bure, il n'est pas possible à ce stade de se prononcer sur la présence de karst à proximité immédiate, ou sur l'éventualité de son développement à cet endroit à l'avenir.

Démonstration du respect de la Règle fondamentale

Il n'existe actuellement pas suffisamment d'informations pour évaluer si la caractérisation hydrogéologique sur laquelle s'appuient les estimations de dose dans le Dossier 2001 Argile est scientifiquement défendable. Le Dossier 2001 Argile¹⁰⁴ présente des évaluations préliminaires de dose à trois exutoires supposés d'eaux souterraines du Dogger, de l'Oxfordien et du Tithonien¹⁰⁵ : Meuse (Dogger), Marne-Rognon (Oxfordien), et Tithonien. La raison de ces évaluations est de démontrer la méthodologie et non pas la conformité réglementaire en tant que telle. A ce jour, il n'y a aucune recherche hydrogéologique exhaustive sur les formations de transfert pour déterminer la validité des paramètres pertinents pour le transport de radionucléides, en particulier ceux que l'ANDRA utilise pour ses calculs de conformité. L'achèvement du programme de recherche est crucial pour démontrer la conformité réglementaire de façon scientifiquement fiable.

Les calculs de dose doivent être basés sur des données réalistes, et les calculs de sensibilité doivent prendre en compte la gamme entière des données réalistes ou - en cas d'absence de données - les données conservatrices appropriées. Les calculs de sensibilité présentés dans le Dossier 2001 Argile¹⁰⁶ ne sont pas l'équivalent des calculs d'incertitude requis par la Règle III.2.f pour la période inférieure à 10 000 ans. Ils ne sont pas non plus équivalents à une démonstration pessimiste des estimations de dose pour la période au

¹⁰³ ANDRA BET 2002, p. 224.

¹⁰⁴ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A, p. 132

¹⁰⁵ voir Tableau 5-1

¹⁰⁶ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A chapitre VI.4.3.5.

delà de 10 000 ans. Par exemple, le coefficient de diffusion pour l'iode 129 utilisé dans le scénario "d'évolution normale" dans le Dossier 2001 Argile est $(4 \times 10^{-12} \text{ m}^2 / \text{sec})$. L'ANDRA affirme que ce coefficient est majorant par un facteur de 40.¹⁰⁷ Mais l'existence du caractère prudent de ce coefficient doit être démontrée en utilisant des données et des analyses in situ.

5.7 Recommandations

Avec les forages profonds sur le site de Bure et dans ses environs depuis 2002, les recherches hydrogéologiques de l'ANDRA ont atteint une phase de consolidation des informations existantes et d'interprétation des données, et d'expansion de la base de données nécessaire à l'évaluation de la situation hydrogéologique et à la modélisation du mouvement des eaux souterraines et du transport des radionucléides. Toutefois, les informations sur le programme et les résultats ne sont pas suffisamment accessibles pour permettre une évaluation exacte. Il est donc possible que les recommandations qui suivent soient partiellement des descriptions du travail actuel de l'ANDRA plutôt que des suggestions pour de nouvelles orientations de travail.

- Le paramètre le plus pertinent pour décrire les propriétés du confinement du Callovo - Oxfordien est sa perméabilité **in situ**. La corrélation entre des paramètres pétrographiques/géomécaniques et de perméabilité (et d'autres données moins importantes du point de vue de la variabilité spatiale) doit être démontrée sur la base des mesures in situ des paramètres hydrauliques et en lien avec leur signification spatiale. D'un autre côté il faut démontrer que la variabilité verticale de la perméabilité dans un forage donné et la variation latérale entre différents forages est aléatoire ou le résultat de facteurs non-hydrauliques.
- Des indicateurs supplémentaires visant à démontrer que la migration des solutés dans le Callovo-Oxfordien est principalement diffusive devraient être identifiés et examinés en fonction de leur capacité à indiquer l'existence d'une zone étendue de faible perméabilité. La formation, l'évolution et la structure hydraulique de cette zone doivent faire l'objet de recherches si elles peuvent servir d'indicateur élargi pour une faible perméabilité à long terme. Les interdépendances entre pression et perméabilité à l'intérieur de cette zone, et les effets possibles des zones d'une perméabilité accrue sur la répartition de la pression, doivent être compris.

De tels indicateurs peuvent être utilisés pour la validation du modèle conceptuel. Les investigations associées doivent être faites à l'échelle spatiale de la zone équivalente de transposition. La résolution de surface des résultats doit permettre la détection ou l'exclusion au moins des principales zones d'écoulement vertical à travers le Callovo-Oxfordien. Selon la méthode de validation et les paramètres appliqués, les données requises doivent être obtenues par des investigations spécifiques qui doivent être incluses dans le programme de recherche.

¹⁰⁷ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A, p. 134

L'utilisation de méthodes géochimiques ou hydrochimiques basées sur les gaz ou de méthodes isotopiques pour estimer le flux vertical des indicateurs gazeux et/ou pour identifier n'importe quel modèle significatif de découlement à travers le plus Callovo-Oxfordien devrait être démontrée en ce qui concerne leur applicabilité dans la zone de Bure. Le choix des paramètres adéquats pour une telle évaluation préliminaire doit s'appuyer sur les résultats des recherches sur les paramètres et les isotopes environnementaux déjà effectuées par l'ANDRA et l'interprétation de leurs variations surfaciques et spatiale au moyen de techniques géostatistiques. Les indicateurs d'origine pré-Dogger sont d'un intérêt tout particulier (par ex. les isotopes de Sr).

- Selon l'état des recherches documenté dans le Référentiel Géologique, il y a un manque de données in-situ de perméabilité pour différentes zones géomécaniques du Callovo-Oxfordien présentant une teneur accrue en carbonates, ainsi que pour des interfaces entre des sections avec différentes teneurs en carbonates, qui peuvent présenter une perméabilité plus importante. La perméabilité de telles zones devrait être étudiée en détails par des investigations in situ et de laboratoire de façon à ce que la présence de zones à perméabilité accrue, qui peuvent contribuer au transport par convection, puisse être exclue ou évaluée.
- La distance "normale" entre les fractures verticales dans le Callovo-Oxfordien gêne leur identification dans les forages verticaux. Le petit nombre de fractures identifiées jusqu'ici, n'exclut pas l'existence de fractures hydrauliquement significatives. Elles sont ou seront recherchées hydrauliquement dans les forages déviés sur le site.

Pour la recherche dans le laboratoire souterrain, il est en outre recommandé d'utiliser des forages horizontaux et continuer d'utiliser les forages inclinés pour les recherches in situ sur la perméabilité des différents types d'hétérogénéités au sein de la matrice rocheuse. L'orientation et l'inclinaison de ces forages peuvent être modifiées en fonction de l'objectif des recherches et du champ de contrainte, des informations sur les orientations des fractures ou des plans de stratification hydrauliquement importants, etc.

- En raison de la faible représentativité spatiale des données hydrauliques in-situ, il ne sera probablement pas possible d'exclure l'existence de fractures dans la transposition équivalente. Du fait des incertitudes qui persistent, il faut faire l'hypothèse prudente que des fractures d'une échelle indétectable peuvent exister. Des hypothèses devraient être formulées au sujet de leurs propriétés, dimension et distances hydrauliques pour évaluer leur importance pour le mouvement vertical d'eaux souterraines au moyen de modèles conceptuels.
- D'après les pressions hydrauliques très proches mesurées dans les calcaires du Dogger dans les forages HTM 102 et MSE 101 il semble être difficile de décrire exactement les directions de l'écoulement des eaux souterraines dans les parties du nord-ouest de la zone équivalente de transposition. Jusqu'à maintenant, aucun forage complémentaire n'est prévu dans cette zone.

Au moins un forage profond dans cette zone ou à l'extérieur de la zone équivalente de transposition pourrait confirmer et améliorer la compréhension de l'écoulement des eaux souterraines dans cette zone et fournir des informations complémentaires pour améliorer la transposition des informations (voir ci-dessous). Cependant, il est recommandé de démontrer la représentativité spatiale/surfacique des données hydrauliques existantes ou l'ampleur nécessaire des investigations supplémentaires au moyen d'une évaluation géostatistique.

- En ce qui concerne la répartition en surface des nouveaux forages, il reste une différence entre les parties ouest et nord de la zone équivalente de transposition et sa partie sud, du point de vue de sa transposition. Les forages supplémentaires (voir plus haut) dans cette zone fourniraient des informations directes sur les propriétés du Callovo-Oxfordien à transposer à la zone équivalente de transposition en plus de celle qui ont été acquises par des méthodes « indirectes » (campagnes sismiques). Le nombre et l'emplacement de ce(s) forage(s) devraient être déterminés par une interprétation géostatistique des données disponibles.
- La caractérisation hydrogéologique des zones situées entre le site de stockage et les éventuelles zones des exutoires des eaux souterraines pouvant être employées pour des calculs de dose, devrait être effectuée de façon suffisamment approfondie pour permettre l'identification des différentes voies éventuelles de transport des radionucléides, ainsi que la validation des modèles de transport et des estimations de dose faites dans le cadre de divers scénarios.

Il est important de déterminer la variabilité spatiale des propriétés hydrauliques des formations de transfert : les coefficients de diffusion et de sorption de ces formations, et les charges hydrauliques. La représentativité surfacique/spatiale des données existantes ou les besoins en données supplémentaires devraient être démontrés au moyen de techniques géostatistiques.

L'usage potentiel des aquifères, public ou privé, pour l'alimentation en eau doit faire partie des recherches

- L'influence potentielle du Karst dans les calcaires du Dogger et de l'Oxfordien sur la direction et la vitesse de l'écoulement des eaux souterraines et l'éventuel transport des radionucléides dans ces formations devraient être étudiées de façon approfondie en deux phases :

Une première étape logique visant à combler les lacunes entre les connaissances déjà acquises sur le développement du karst dans la zone et le besoin de connaissances supplémentaires, plus spécifiques au site, serait une évaluation globale et la régionalisation de la zone concernée (c'est-à-dire, à proximité du site de Bure et la zone équivalente de transposition) en termes de potentiel de développement de karst (risque karstique). Des approches méthodologiques pour la régionalisation de territoires karstifiés et le classement des unités territoriales en fonction du risque karstique ont été

développées par des karstologues russes au début des années 1990.¹⁰⁸ Nous recommandons l'utilisation de cette méthode ou d'une approche semblable.

Un développement actif du karst dans des calcaires comme les calcaires du Dogger et de l'Oxfordien est envisagé à la fois pour des états climatiques tempérés (similaires à l'état actuel) et les états boréaux futurs du climat en Meuse/Haute-Marne.¹⁰⁹ Nous recommandons que les scénarios potentiels d'évolution de l'hydrologie du site comprenne un examen approfondi et explicite de l'éventuel développement du karst dans différents scénarios de changements climatiques et géomorphologiques (notamment des scénarios associés à un réchauffement climatique induit par les activités humaines).

5.8 References

AKEND 2002	AKEND - Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (2002): Site Selection Procedure for Repository sites. Recommendations of the AkEnd - Committee on Site Selection Procedure for Repository Sites.
ANDRA 1995	ANDRA (1995 - B RP 1GSV 95-002): Rapport final. Tests hydrologiques sur le site de forage d'exploration HTM102 de Haute-Marne entre Circfontaines en Ornois et Gillaume.- Avril 1995.
ANDRA 1996	ANDRA (1996 - B RP 0CRE 96-003): Détermination de la paléotempérature du Callovo-Oxfordien de la Haute Marne.- 15.06.1996.
ANDRA 1997	ANDRA (1997 - B RP 0ANT 96-128/B): Expertise relative à l'ovalisation de forages de la zone d'étude de l'est de la France.- Date d'origine. Juillet 1997. Rév. B, 07/1997.
ANDRA 2000	ANDRA (2000 - D RP 0CRE 00-003): Thermicité du Callovo-Oxfordien du site de L'Est. Détermination d'un paléoenfouissement maximum. Etude complémentaire.- Octobre 2000.
ANDRA Cartographie 2001	ANDRA (2001 - D RP 0G2R 00-003): Site Meuse/Haute Marne. Cartographie géologique et structurale de l'environnement régional du site. Volume 1: Texte; Volume 2: Figures et planches hors texte; Volume 3: Fiches de sites micro tectoniques.- Avril 2001.
ANDRA 2002-2005	ANDRA (2002 - C PE ADS 02-039): Scientific programme HLLW Clay Repository Project 2002-2005.- 19/09/2002.
ANDRA 2002a	ANDRA (2002 - D NT ADS 02-021): Site Meuse/Haute-Marne - Evaluation de l'apport de forages vis-à-vis de la fiabilisation de la modélisation hydrogéologique du site Meuse/Haute-Marne.- 26/03/2002.
ANDRA 2003a	ANDRA (2003 - C SP ADS 03-024): Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne - Spécifications de besoin concernant les forages du programme FRF up1.- Date d'origine: 18/03/2003. Rév. B, 08/10/03. ANDRA Identification "C SP ADS 03-024."

¹⁰⁸ Dublyanskaya & Dublyansky 1992.

¹⁰⁹ BIOCLIM D2 2002, p. 55.

ANDRA 2003b	ANDRA (2003 - C SP ADS 03-063): Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne - Spécification de besoin concernant les forages du programme FRF up2. Date d'origine: 29/09/2003. Rév. B, 30/10/03. ANDRA Identification "C SP ADS 03-063."
ANDRA 2003c	ANDRA (2003): Mai 2003: Forage scientifique profond. On the Web at http://www.andra.fr/popup.php3?id_article=87&id_rubrique=91 [access: 15.4.2004]
ANDRA 2003d	ANDRA (2003): À la recherche de nouvelles données.- La vie du Labo, N° 23, page 2-3.- Automne 2003. On the Web at http://www.andra.fr/IMG/LVLabo23.pdf .
ANDRA 2003e	ANDRA (2003): Forages scientifiques profonds. Adaptation du programme.- La vie du Labo, N° 23, page 4.- Automne 2003. On the Web at http://www.andra.fr/IMG/LVLabo23.pdf .
ANDRA Recueil 2004	ANDRA (2004): Recueil des transparents Andra. Description et modélisation du comportement du stockage. Présentation des calculs 2004. Audition du 11 et 12 février 2004 de la Commission Nationale d'Evaluation. DOC TR ADS 04-0004/A.
ANDRA BET 2001	ANDRA BET (2001): Recherches pour le stockage des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue 2001.- Bilan des Études et Travaux et synthèse du bilan.- Available on CD.
ANDRA BET 2002	ANDRA BET (2002): Recherches pour le stockage des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue 2002.- Bilan des Études et Travaux et synthèse du bilan.- Available on CD.
ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A	Dossier 2001 Argile sur l'avancement des etudes & recherches relatives a la faisabilité d'un stockage de dechets a haute activité et a vie longue en formation géologique profonde - Rapport de synthèse. [Partie A]. On the Web at http://www.andra.fr/IMG/pdf/DOSSIER_2001.pdf . Part A in English on the Web at http://www.andra.fr/IMG/pdf/DOSSIER_2001_E.pdf .
ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.B	Dossier 2001 Argile sur l'avancement des etudes & recherches relatives a la faisabilité d'un stockage de dechets a haute activité et a vie longue en formation géologique profonde - Rapport de synthèse Partie B Compléments scientifiques et techniques.
ANDRA Référentiel Géologique Tome 1, 2001	ANDRA Référentiel Géologique Tome 1 (2001) Référentiel Géologique du site de Meuse/Haute-Marne, Tome 1, Contexte et objet. Identification: A RP ADS 99-005/B, Émetteur: Direction Scientifique, Date d'origine. Janvier 1999. Rév. B: 27/07/2001.
ANDRA Référentiel Géologique Tome 2, 2001	ANDRA Référentiel Géologique Tome 2 (2001) Référentiel Géologique du site de Meuse/Haute-Marne, Tome 2, La connaissances à l'échelle régionale. Identification: A RP ADS 99-005/B, Émetteur: Direction Scientifique, Date d'origine. Janvier 1999. Rév. B: 25/07/2001.
ANDRA Référentiel Géologique Tome 3, 2001	ANDRA Référentiel Géologique Tome 3 (2001) Référentiel Géologique du site de Meuse/Haute-Marne, Tome 3, La connaissances à l'échelle du secteur. Identification: A RP ADS 99-005/B, Émetteur: Direction Scientifique, Date d'origine. Janvier 1999. Rév. B: 18/07/2001.

ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001	ANDRA Référentiel Géologique Tome 4 (2001) Référentiel Géologique du site de Meuse/Haute-Marne, Tome 4, Le Callovo-Oxfordien, Identification: A RP ADS 99-005/B, Émetteur: Direction Scientifique, Date d'origine. Janvier 1999. Rév. B: 16/07/2001.
ANDRA Référentiel Géologique Tome 5, 2001	ANDRA Référentiel Géologique Tome 5 (2001) Référentiel Géologique du site de Meuse/Haute-Marne, Tome 5, Etat d'avancement de la modélisation, Identification: A RP ADS 99-005/B, Émetteur: Direction Scientifique, Date d'origine. Janvier 1999. Rév. B, 03/09/2001.
APPEL & HABLER 2002	APPEL, D. & HABLER, W. (2002): Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung. Phase 2: Auswertung der Datensätze für die Kriterienentwicklung.- Report to Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, AkEnd (German Committee on Site Selection Procedure for Repository Sites).
BIOCLIM D2 2002	BIOCLIM (2002): Deliverable D2: Consolidation of Needs of the European Waste Management Agencies and the Regulator of the Consortium. Work package 1: Site-specific and palaeo environmental data. Modeling Sequential Biosphere Systems under Climate Change for Radioactive Waste Disposal. Châtenay-Malabry: ANDRA, 2001. On the web at http://www.andra.fr/bioclim/pdf/d2.pdf .
BRÉGOIN 2003	BRÉGOIN, S. (2003): Variabilité spatiale et temporelle des caractéristiques du Callovo-Oxfordien de Meuse/Haute Marne. Thèse de doctorat de l'Université Paris XI, spécialité Sciences de la Terre,- Résumé sur le Web at http://www.lgs.jussieu.fr/~geologie/pages/ed/ed_etudiants.htm#bre (access: April 2004)
CLARET 2001	CLARET, F. (2001): Caractérisation structurale des transitions minéralogiques dans les formations argileuses: contrôles et implications géochimiques des processus d'illitisation. Cas particulier d'une perturbation alcaline dans le Callovo-Oxfordien Laboratoire souterrain Meuse / Haute Marne. Thèse présentée pour l'obtention du titre de Docteur de l'Université Joseph Fourier, Grenoble I. Collection les Rapports ANDRA. Summary on the Web at http://www.andra.fr/IMG/Claret.pdf (access: April 2004)
CLARET et al. 2002	CLARET, F., SAKHAROV, B.A., DRITS, V.A., GRIFFAULT, L., MEUNIER, A., BAUER, A., SCHAEFER, T. & LANSON, B. (2002): Clay mineralogy of the Callovo-Oxfordian formation using multi-specimen method.- In: ANDRA - Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs: Clays in natural and engineered barriers for the radioactive waste containment.- International Meeting, December 9-12, 2002, Reims, France, Abstracts, page 97-98.
CNE 2002	CNE - Commission Nationale d'Evaluation relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs. Instituée par l'article L 542 dur Code de l'environnement issu de la loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 (2002): Rapport d'Evaluation n° 8.- Septembre 2002
CNE 2003	CNE - Commission Nationale d'Evaluation relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs. Instituée par l'article L 542 dur Code de l'environnement issu de la loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 (2003): Rapport d'Evaluation n° 9.- Juin 2003.

DUBLYANSKAYA & DUBLYANSKY 1992	DUBLYANSKAYA, G.N. & DUBLYANSKY, V.N. (1992): Mapping, subdivision into regions, and geological engineering assessment of karstified territories. Publishing House of the Siberian Branch of the Academy of Sciences of USSR, Novosibirsk, 144 p. (<i>In Russian</i>)
JAILLET 2000	JAILLET, S. (2000): Un karst couvert de bas-plateau: le Barrois. Structure – Fonctionnement – Evolution. Thèse, Université Michel de Montaigne, Bordeaux 3, 543 p.
LAVASTRE et al. 2002	LAVASTRE, V., JAVOY, M., JENDRZEJEWSKI, D., ROUSSET, D. & CLAUER, N. (2002): Sedimentary history and diagenetic / post-diagenetic events in Callovo-Oxfordian clay-rock (Paris Basin, France): The stable isotopes record of minerals and the pore water. In: ANDRA - Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs: Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste containment.- International Meeting, December 9-12, 2002, Reims, France, Abstracts, page 457-458.
NAGRA 2002	NAGRA - National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste (2002): Project Opalinus Clay. Safety Report. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis).- Technical Report 02-05, December 2002. On the Web at http://www.nagra.ch/english/aktuell/e_nachweis/ntb02_05.htm .
OECD-NEA 2003	OECD-NEA – Nuclear Energy Agency of the Organisation for Economic Co-operation and Development (2003): The French R&D Programme on Deep Geological Disposal of Radioactive Waste. An International Peer Review of the “Dossier 2001 Argile”.- Paris, ISBN 92-64-18260-8. On the Web at http://www.nea.fr/html/rwm/reports/2003/nea4432-andraeng.pdf .
Règle N° III.2.f	Règle Fondamental - Règle Fondamental III.2.f - Règles fondamentales de Sûreté sûreté relatives aux installations nucléaires de Base base autres que Réacteursréacteurs, Règle No. III.2.f (10 juin 1991) – Stockage définitif de déchets radioactifs en Formation Géologique Profonde.
ROCHER et al. 2002	ROCHER, M., BAIZE, S., CUSHING, E. M., LEMEILLE, F. & LOZAC'H, Y. (2002): Fracturation et paléocontraintes autour du site de Bure.- IRSN/Département de Protection de l'environnement, Rapport DPRE/SERGD/02-12, Mars 2002.
ROUSSET et al. 2002	ROUSSET, D., MAES, P., VERDOUX, P., LANCELOT, J. & CLAUER, N. (2002): Open-system vs. closed-system evolution of the diagenesis in the Callovo-Oxfordian argillites of the eastern Paris Basin. In: ANDRA - Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs: Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste containment.- International Meeting, December 9-12, 2002, Reims, France, Abstracts, page 99-100.
WENDLING et al. 2002	WENDLING, J., BUSCHAERT, S. & BARTHELEMY, Y. (2002): Hydrogeological and transport models for the MHM site evaluation program: Current status and potential future developments. In: ANDRA - Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs: Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste containment.- International Meeting, December 9-12, 2002, Reims, France, Abstracts, page 161-162.

