



Châtenay-Malabry, le 28 février 2011

Monsieur Jean-Louis CANOVA
Président du Comité Local d'Information et de Suivi
du Laboratoire de Recherche de Bure - CLIS
Rue des Ormes - Le Lavoir
55290 BURE

DIRECTION DE LA RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT
1-7, rue Jean-Monnet
92298 Châtenay-Malabry Cedex
Tél. : +33 (0)1 46 11 81 39
Fax : +33 (0)1 46 11 84 10

N/ref : DRD/DIR/11-0032 (PL/jo)

V/ref :

Objet : Rencontre du 16 février 2011 : Réponses Andra aux questions IEER


Monsieur le Président,

A toutes fins utiles, vous trouverez ci-joint les réponses Andra aux questions qui ont été transmises à l'Andra par l'IEER le 15 février 2011 et reprises oralement lors de la réunion du 16 février 2011.

Les réponses ne constituent pas un verbatim, mais sont pleinement représentatives de l'argumentaire développé par l'Andra en séance.

Je reste à votre disposition pour tout complément d'information.

Je vous prie de croire, Monsieur le Président, en l'expression de ma considération distinguée.



Patrick LEBON
Directeur adjoint R&D

P.J. : 1

Copie :

- Monsieur Jean-Louis CANOVA
Président du Comité Local d'Information et de Suivi du Laboratoire de Recherche de Bure - CLIS
Mairie d'Ancerville - Place Municipale - 55170 ANCERVILLE
- Monsieur Benoit JAQUET
Secrétaire général du Comité Local d'Information et de Suivi du Laboratoire de Recherche de Bure
CLIS - 18 avenue Gambetta - 55000 BAR LE DUC

Rencontre IEER/ANDRA du 16 février 2011

Les questions traitées dans le présent document sont celles qui ont été transmises à l'Andra par l'IEER le 15 février 2011 et reprises oralement lors de la réunion du 16 février 2011. Les réponses ne constituent pas un verbatim, mais sont pleinement représentatives de l'argumentaire développé par l'Andra en séance.

Questions relatives au chapitre 1

- Pourquoi un tel écart systématique entre les nombreuses données obtenues et celles finalement retenues pour la modélisation et l'analyse de sûreté ?

Exemples :

Valeur maximum de la conductivité hydraulique dans les données brutes : $2 \cdot 10^{-12}$ m/s
Valeur maximum retenue pour l'analyse de sûreté : $5 \cdot 10^{-13}$ m/s

Dans le cadre du Dossier 2005, le Tome Evaluation de Sûreté (TES) présente de manière détaillée et argumentée la méthodologie pour la construction puis la mise en œuvre des scénarios, ainsi que le processus ayant conduit au choix des modèles et des valeurs de paramètres pour l'évaluation des impacts associés à ces scénarios.

La gestion des incertitudes de toute nature a été une composante majeure de l'analyse de sûreté qui a été mise en œuvre. Les incertitudes ont fait l'objet d'une analyse systématique (voir TES, § 6) ; elle a notamment porté (voir TES, § 6.2, p387-479) sur les données d'entrée du stockage (ex. inventaire), les caractéristiques intrinsèques des composants du stockage (ex. performances des matériaux de barrières ouvragées), les processus phénoménologiques (en termes de nature, de modèle de représentation, et de valeurs des paramètres), la technologie/ingénierie, et les évolutions externes (ex. variations climatiques). L'identification des incertitudes, en particulier sur les modèles et les valeurs des paramètres, a été prise en compte dans la définition des scénarios et/ou dans la définition des études de sensibilité réalisées dans le cadre des scénarios.

Ainsi, il a été défini un scénario dit d'évolution normale (SEN), répondant à la situation dite de référence de la RFS.III.2.f, décrite comme « correspondant à l'évolution prévisible du stockage au regard des événements certains ou très probable » (voir TES, § 5.1, p213-216), et des scénarios dits d'évolution altérée (SEA), correspondant à des évolutions peu probables et à des situations conventionnelles (voir TES, § 7.1, p495-498, puis § 7.2 à § 7.5 pour la définition détaillée des scénarios d'évolution altérée, p499-654). Il a même été défini un scénario dit de « fonctionnement très dégradé », consistant à réduire de manière systématique les performances des composants du stockage, notamment celles du milieu géologique (voir TES, § 7.5, p635-654).

L'analyse critique systématique des données a conduit à identifier des modèles et des valeurs de paramètres « phénoménologiques », « conservatifs », « pénalisants » et « alternatifs ». Le caractère phénoménologique repose sur la compréhension la plus complète du phénomène, et le caractère « pénalisant » sur un objectif visant à surestimer l'impact sans pour autant être représentatif de la phénoménologie (voir TES, § 5.2 des modèles conceptuels vers les modèles de calcul de sûreté, p217-221). Plus spécifiquement, pour les valeurs des paramètres, notamment celles relatives au milieu géologique, la stratégie de choix est explicitée dans le TES au § 5.2.2.3, p220-221. Toutes les données disponibles sans exclusive ont été analysées, en termes notamment de méthodes d'acquisition, d'indépendance des méthodes, d'incertitudes de mesure, d'erreur de mesure, de représentativité spatiale, et de variations naturelles. Toutes les données ont été prises en compte et sont considérées *in fine* dans le cadre des différents scénarios et des études de sensibilité associées (voir TES, § 5.2.2.3, p211).

Ainsi, sur l'exemple de la perméabilité du Callovo-Oxfordien, l'analyse critique de l'ensemble des données (comme représenté sur la figure du référentiel de site) a conduit à retenir un tenseur de

perméabilité de $[5.10^{-14} \text{ m/s}, 5 \cdot 10^{-13} \text{ m/s}]$ comme « valeur phénoménologique », c'est-à-dire la plus représentative de l'ensemble des mesures (voir TES, § 5.2.2.3, p 211, sur la notion de représentativité). Néanmoins, la valeur de 10^{-12} m/s , la seule et la plus haute valeur mesurée a été prise en compte, en particulier dans le scénario de « fonctionnement très dégradé » et dans l'analyse probabiliste (voir TES, décembre 2005, § 7.6, p655-686).

Pour la convection, les vitesses calculées par Mazurek sont ignorées par l'ANDRA qui ne retient que l'une de ses interprétations pour en déduire que le phénomène est négligeable.

Le calcul présenté par Mazurek peut être retrouvé dans le document Claytrac (CLAYTRAC project: Natural tracer profiles across argillaceous formations - review and synthesis, Editor : M. Mazurek, document OECD/NEA n°6253, 2009). Ces travaux menés dans le cadre d'une coopération internationale et auxquels l'Andra a participé, avaient pour objectif de comparer les processus de transfert dans des formations argileuses associées à différents contextes géologiques. Dans le cas du site de Meuse/Haute-Marne, l'analyse est plus complexe que pour les autres sites car elle doit prendre en compte différentes sources de chlorures au cours de l'histoire géologique (eau de mer initiale, sel venant des couches salifères sous-jacentes). Par ailleurs, contrairement à l'hypothèse posée par Mazurek, les concentrations en chlorures ne peuvent être considérées comme représentatives d'une situation en équilibre. En effet, les calculs montrent, quelle que soit l'hypothèse prise, un temps de traversée du Callovo-Oxfordien par les chlorures d'environ 20 millions d'années. En revanche, les circulations dans le Dogger - qui contrôlent les concentrations en chlorures à la base du Callovo-Oxfordien - n'ont débuté qu'il y a 6 millions d'années avec la mise à l'affleurement de cette formation. Depuis cette publication, les concentrations en chlorures ont été mesurés jusqu'au Trias par le CNRS d'une part, et l'IRSN d'autre part (thèses de R. Rebeix et F. Bensenouci soutenues en décembre 2010), pour pouvoir retracer la migration des chlorures à l'échelle de la pile sédimentaire. La modélisation de ces migrations en fonction de l'histoire géologique est en cours. Elle permettra de disposer d'un modèle de migration plus représentatif de l'histoire géologique.

- La localisation des puits dans l'analyse de sûreté est faite aux deux exutoires de l'Ornain (NE) et de la Saulx (SO), donc éloignée, au moins pour celui du NE, de la zone où la contamination est la plus forte. Pourquoi ce choix, et pas un choix plus pénalisant ?

Dans le dossier 2005, conformément à la Règle Fondamentale de Sûreté III.2.f édictée par l'Autorité de Sûreté Nucléaire (« les exutoires seront constitués par les cours d'eau et des pompages peu profonds d'alimentation en eau »), l'Andra a positionné les puits sur la base des ressources en eau potentielles sur le secteur : les sites potentiels les plus proches du stockage ont été retenus pour la simulation du captage, à l'endroit où le panache atteint une zone présentant un débit d'eau suffisant pour permettre un pompage. A cette fin, l'Andra a fait réaliser un inventaire des ressources en eau sur le secteur. Pour le modèle hydrogéologique à un million d'années, ceci conduit à retenir comme exutoires pénalisants pour l'analyse de sûreté les deux exutoires cités dans la question (un exutoire dans la vallée de l'Ornain (source ou pompage), un exutoire par pompage approximativement à la vallée de la Saulx), ainsi qu'un exutoire par pompage dans les calcaires du Barrois au droit du stockage. (voir Tome Evaluation de Sûreté, § 5.3.2.5, p263-270).

Questions relatives au chapitre 2

- L'ANDRA dispose-t-elle d'un catalogue complet des séismes dans la région ? Si oui, où peut-il être trouvé ? Si non, compte-t-elle le faire ? Ceci pose la question du calcul de l'intensité maximale pour la conception des installations de surface et la réponse des structures (notamment celles liées à la manipulation des colis) à un séisme.

Le catalogue des séismes utilisés par l'Andra correspond aux bases de données issues des deux réseaux nationaux gérés d'une part par le CNRS (REseau National de Surveillance Sismique, Institut de Physique du Globe de Strasbourg) et d'autre part par le CEA/LDG. Ces bases de données sont en accès libre (<http://renass.u-strasbg.fr/> et <http://www-dase.cea.fr/>), les capteurs installés à proximité du laboratoire sont d'ailleurs intégrés dans ces réseaux. (cf. Référentiel de site version 2009, Tome 3,

chapitre 26 p.22 et suivantes). Ces réseaux permettent la surveillance de la sismicité sur la France mais également sur les régions limitrophes, largement au-delà de ses frontières (Espagne, Italie, Suisse, Allemagne, BENELUX).

Concernant le risque sismique, la pratique réglementaire française prévoit que le maintien des fonctions importantes de sûreté d'une installation nucléaire puisse être assuré pendant et/ou à la suite d'un séisme plausible pouvant affecter l'installation considérée. Pour satisfaire cet objectif, la règle fondamentale de sûreté relative à la détermination du risque sismique (RFS n° 2001-01), édictée par l'autorité de sûreté nucléaire, se base sur une démarche déterministe dans laquelle les mouvements de référence sont associés à des séismes de référence.

Où peut-on trouver l'analyse probabiliste ?

Cette approche est exposée pour l'estimation de l'aléa sismique à long terme dans le Référentiel de Site (version 2009, Tome 3, chapitre 26, page 86/298) et fait l'objet du rapport d'étude cité ci-dessous.

Martin C., Combes P., Sécanell R., Caron D ; (2004) Aléa sismique. Consolidation de l'approche déterministe, essais préliminaire d'une approche probabiliste. Site Meuse/Haute-Marne. Rapport Andra n° C.RP.OGTR.04.0013, 3 volumes.

- Comment l'ANDRA peut-elle justifier, à partir des seules investigations sismiques, la conclusion selon laquelle les microfissures de la roche sont colmatées ?

Cette conclusion est le résultat des investigations et observations en laboratoire souterrain (suivi géologique de l'ensemble des volées) et en forages déviés réalisés depuis la surface. La phrase citée p.26 du rapport de l'IEER ne correspond pas à celle de la synthèse du Dossier 2005 (page 73). Cette dernière indique bien sans ambiguïté que ce sont les forages déviés qui ont montré qu'il n'existait pas de fractures et très peu de microfissures dans le Callovo-Oxfordien à cette échelle (moins de 40 microfissures sur près de 1400 m de carottes de Callovo-Oxfordien).

Par ailleurs, comme le souligne l'IEER, la résolution de la sismique 3D n'est pas adaptée à la caractérisation de la micro-fracturation, ce qui apparaît clairement dans différentes discussions autour du pouvoir de résolution de la méthode présentées dans le Référentiel (Volume 1, chapitre 9).

Questions relatives au chapitre 3

- Où peut-on trouver des informations sur les failles mises en évidence par la sismique 2D et qui se trouvent en partie dans la ZIRA ?

Le rapport de l'interprétation de la sismique 2D acquise en 2008 est le suivant :

Cuilhe L., Jacquemin-Guillaume E, Jeancler D. (2008) Site Meuse/Haute-Marne - Lot M18 : Campagne sismique 2D et activités connexes - LOT 3 : interprétation et inversion des données sismiques 2D. Rapport Andra n° C.RP.OBEL.08.001.

Il est à noter que d'après cette interprétation ces failles n'affectent pas le Callovo-Oxfordien et qu'une seule de celles-ci se trouve sur la ZIRA. La confirmation de ces observations et la réduction des incertitudes à ce sujet est l'objet de la campagne sismique 3D réalisée durant l'été 2010 sur la ZIRA et en cours de traitement.

- L'ANDRA observe des micro-fractures dans l'argilite et estime que leur espacement est suffisamment important pour qu'il n'y ait pas d'impact sur les propriétés de la roche. Comment peut-elle justifier cela ?

Comme indiqué précédemment, toutes les microfissures observées sont colmatées. Les résultats de la campagne de forages déviés FRF de 2004 ont montré que celles-ci sont présentes uniquement au toit de la couche. A ce jour, l'ensemble des observations réalisées au niveau principal du laboratoire souterrain n'a pas mis en évidence de fracture d'origine naturelle, confirmant ainsi les résultats des

forages déviés. Des tests hydrauliques ont été réalisés dans le forage dévié EST211. 3 d'entre eux ont été positionnés au droit de microfissures et ne montrent aucune différence avec ceux positionnés dans de l'argillite exempte de microfissure (Référentiel de site 2009, Tome 1, chapitre 15, p542/582 et p553/582). Ceci met en évidence l'absence de rôle hydraulique de tels objets (voir également rapport final 2005 de la CNE p 18).

- D'après les mesures faites dans les forages en limite de la ZIRA (NE/SO), tous les paramètres (perméabilité, porosité) sont différents. Comment justifier l'homogénéité de la couche au sein de la ZIRA ?

Cf. la réponse à la dernière question relative au chapitre 3 et concernant l'homogénéité du COX.

- Une surpression a été observée dans le Callovo-Oxfordien. Malgré les recherches, elle n'est pas expliquée. Cela permet-il de l'ignorer (cf rapport p. 66) ?

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

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

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

- Pourquoi avoir utilisé le nombre de Peclet pour conclure que la diffusion était le phénomène prépondérant, au lieu d'utiliser les données disponibles ?

L'Andra a utilisé dans ses analyses tant phénoménologiques que de sûreté l'ensemble des données de transfert disponibles dans la barrière géologique et les matériaux du stockage afin de caractériser et de modéliser les différents modes de transfert. Le nombre de Peclet est classiquement utilisé en hydrogéologie pour évaluer la prédominance des mécanismes de transfert par convection, diffusion et dispersion à partir de résultats de calcul. Plus spécifiquement, l'Andra a utilisé cet indicateur aux différentes échelles d'espace pertinentes afin de comparer les modes de transfert des radionucléides par les différentes voies de transfert (barrière géologique, ouvrages souterrains).

Ainsi, pour le Dossier 2009, les valeurs de nombre de Peclet déterminées dans le cadre des études de performance du Callovo-Oxfordien sur la Zone de Transposition (voir rapport Andra C.NT.AEAP.09.0064A), ont bénéficié de la consolidation de l'ensemble des connaissances acquises sur l'épaisseur de la couche, et sur ses paramètres de perméabilité, de diffusion et de porosité, en vertical et en latéral. En particulier, il a été tenu compte explicitement des variations verticale et latérale de l'ensemble de ces paramètres dans les évaluations de performance. Les résultats montrent pour certaines situations, comme en 2005 (voir TES pp 332, 516, 540, 588, 599, 605), une codominance entre la diffusion et la convection dans le Callovo-Oxfordien. Mais dans tous les cas, les indicateurs de performances du Callovo-Oxfordien sur la Zone de Transposition restent proches (écarts inférieurs à un facteur 2).

- Des analyses probabilistes (Monte Carlo) sont-elles prévues pour l'analyse de performance de sûreté qui intégrerait tous les paramètres ?

L'Andra dans le dossier 2005 analyse les performances du stockage à long terme en suivant la démarche de la règle fondamentale de sûreté RFS III.2.f édictée par l'Autorité de Sûreté Nucléaire.

L'analyse de sûreté repose sur une sélection d'événements considérés comme raisonnablement envisageables et représentatifs des risques. Elle conduit à retenir une situation de référence, qui représente l'évolution probable du stockage, et des situations altérées correspondant à l'occurrence d'événements incertains, mais plausibles. Dans ce cadre, il est précisé que les incertitudes doivent être déterminées et prises en compte.

Dans le cadre de la gestion des incertitudes (cf. réponse à la 1^{ère} question relative au chapitre 1), une analyse probabiliste de type Monte-Carlo a été menée pour le Dossier 2005, sur les paramètres de transfert et géochimiques du Callovo-Oxfordien, de l'EDZ, et des matériaux du stockage (voir Tome Evaluation de Sûreté, version de décembre 2005, § 7.6, p655-686).

L'analyse probabiliste avait ainsi pour objectifs : (i) évaluer la distribution des différents indicateurs de performance (en sortie du Callovo-Oxfordien) vis-à-vis de l'incertitude (incluant les variations naturelles) des valeurs des paramètres, et (ii) identifier et hiérarchiser les paramètres dont l'incertitude influe le plus sur les indicateurs de performance.

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

Par exemple pour la perméabilité du Callovo-Oxfordien, l'ensemble des mesures (plusieurs dizaines issues des essais en forage et des essais sur échantillons) a conduit à définir une distribution de probabilité de type Log-normale de la perméabilité verticale (valeur allant de 10^{-15} m/s à 10^{-12} m/s), et une distribution de probabilité de type Log-normale de l'anisotropie entre la perméabilité verticale et la perméabilité horizontale (valeur de 1 à 10).

- Dans l'analyse de sûreté, l'ANDRA représente le Callovo-Oxfordien comme une couche homogène et d'un seul tenant. Pourquoi ne pas avoir modélisé les trois zones A, B et C, définies par l'ANDRA elle-même ?

Dans le cadre des évaluations de sûreté menées pour le Dossier 2005, les paramètres du Callovo-Oxfordien (épaisseur, diffusion, perméabilité, porosité et gradient de charge) ont effectivement été considérés comme uniformes. De fait, des sensibilités aux valeurs des paramètres ont été menées afin de couvrir les variations naturelles verticale et latérale du Callovo-Oxfordien sur la Zone de Transposition, à partir des données disponibles.

Les évaluations de performance menées pour le Dossier 2009 ont bénéficié de la campagne de reconnaissance FZT, menée entre 2007 et 2008. En couvrant l'ensemble de la Zone de Transposition, les travaux menés ont consolidé les données du Dossier 2005 et donné un éclairage plus précis des variations naturelles des propriétés du Callovo-Oxfordien en vertical et en latéral sur la Zone de Transposition. Ils ont néanmoins montré que ces variations étaient limitées et le plus souvent dans des contraintes à l'incertitude de mesure. Cependant, pour différentes localisations couvrant toute la Zone de Transposition, des profils verticaux non uniformes de la perméabilité, des valeurs spécifiques de la diffusion et de la porosité du Callovo-Oxfordien ainsi que l'épaisseur spécifique du Callovo-Oxfordien en ces localisations ont été définis, en particulier sur la base de l'analyse détaillée des faciès litho-stratigraphiques du Callovo-Oxfordien sur la Zone de Transposition (cf. réponse à la deuxième question relative au chapitre 4). Ces données sont indiquées dans le rapport Andra C.NT.AEAP.09.0064A (voir § 2 et 3, p10-33). Les résultats des évaluations montrent que les indicateurs de performance sont très peu sensibles (écart de quelques %) à la variation des propriétés du Callovo-Oxfordien (voir rapport Andra C.NT.AEAP.09.0064A, § 4, p34-42). Ceci consolide la pertinence de la représentation uniforme des propriétés du Callovo-Oxfordien dans les évaluations de sûreté menées pour le Dossier 2005.

Questions relatives au chapitre 4

- Est-ce que l'ANDRA envisage de poursuivre les recherches en géomécanique pour démontrer l'homogénéité ou au contraire tenir compte des inhomogénéités ?

Nous ne cherchons pas à démontrer l'homogénéité de la couche, l'approche développée est de comprendre les processus se produisant à l'échelle des minéraux pour expliquer le comportement thermo-hydromécanique de l'argilite. Cette approche prend en compte les variations minéralogiques de la roche. Elle montre que l'on peut utiliser les modèles de milieu poreux si on fait la distinction entre les plus gros pores où l'eau est libre de circuler et les petits pores où les molécules d'eau ont des liaisons avec les surfaces des minéraux argileux.

- Comment l'ANDRA peut-elle être sûre de l'épaisseur et de l'homogénéité (notamment la teneur en argile) de la zone C du Callovo-Oxfordien sur toute l'étendue de la ZIRA (cf. rapport p. 115) ?

La connaissance de l'épaisseur du Callovo-Oxfordien aux échelles de la Zone de Transposition et de la Zone d'Intérêt pour la Recherche Approfondie (ZIRA) repose sur les données sismiques et sur les forages : la précision est évaluée de 1 à 3 mètres, valeurs à mettre en perspective avec l'épaisseur du Callovo-Oxfordien de plus de 130 m sur la Zone de Transposition.

Comme indiqué pour la géomécanique, l'Andra ne cherche pas à démontrer une éventuelle homogénéité et ne préjuge pas de cette dernière. A ce stade, l'analyse des données des forages corrélées à la sismique indique une variation litho-stratigraphique verticale du Callovo-Oxfordien en unités plus argileuses et en unités plus carbonatées : ces unités sont parfaitement reconnues et continues toute sur la ZIRA, même si leurs épaisseurs varient. L'Andra analyse ensuite la traduction ou non de ces variations litho-stratigraphiques en terme de variations des propriétés physico-chimiques du Callovo-Oxfordien.

- Est-ce que l'ANDRA a évalué les avantages et inconvénients du concept d'alvéoles verticales avant de retenir le concept d'alvéoles horizontales ?

Cette évaluation a été menée dès le début du projet.

[hors réunion : on peut trouver les éléments de réponse dans le Tome Architecture et gestion du stockage géologique du dossier 2005, p 194. Les principaux avantages du concept horizontal sont un moindre impact sur la formation géologique, en termes de volume excavé et d'emprise du stockage, une épaisseur de garde d'argilite non perturbée maximale, la possibilité d'augmenter la longueur des alvéoles.]

- Est-ce que l'ANDRA tient compte de l'impact des plans de stratification sur la stabilité des creusements et, au-delà, sur la sûreté ?

Il est connu en effet que dans des ouvrages souterrains creusés dans des formations géologiques présentant des stratifications lithologiques très marquées peuvent se produire des chutes de voûte dues à une rupture d'un plan de stratification.

Dans le Laboratoire souterrain, toutes les galeries font l'objet d'un levé géologique systématique, notamment d'un relevé de fractures, lors de leur creusement. Les observations de terrain indiquent qu'il n'existe pas à proprement parler de plans de stratification, les variations lithologiques verticales se faisant progressivement. Par ailleurs, dans le cas des premières alvéoles HA non chemisées, présenté dans le rapport de l'IEER, la stratification est soulignée par un repère lithologique qui recoupe les alvéoles en biais, alors que les mesures géophysiques montrent des break-out (chutes d'écaillés de roche) continus sur toute la longueur de l'alvéole. Cela confirme qu'ils sont dus à une fracturation de la roche et non à une rupture d'un plan de stratification.

- Est-ce que la forme des galeries ou alvéoles creusées est mesurée dans le temps ? Est-il tenu compte du fait que les alvéoles ne seront pas parfaitement circulaires, dans le concept de construction et dans l'analyse de sûreté ?

Toutes les galeries et ouvrages d'essai font l'objet de mesures de déformation (convergences) réalisées régulièrement. Dans certaines galeries et alvéoles est effectué périodiquement un scan 3D, donnant une image complète, mais moins précise, de leur forme. La forme des parois des alvéoles ne sera pas tout à fait circulaire, alors que le chemisage de l'alvéole le sera. Compte tenu du fluage de la roche, le vide annulaire se fermera plus ou moins vite suivant son ouverture, mais au bout de quelques années il sera complètement fermé. Des expérimentations sont en cours pour suivre la redistribution des contraintes sur le chemisage au fur et à mesure qu'il entre en contact avec l'argilite.

- De nombreux tests sur de petits échantillons montrent une cicatrisation de la roche. Dans quelle mesure cela peut-il être extrapolé à l'échelle 1 ? Si cette cicatrisation a été observée à Tournemire, ces résultats sont-ils transposables au site de Bure ?

Une cicatrisation de la roche suppose qu'elle retrouve ses caractéristiques initiales (situation que l'on peut rencontrer dans le sel). Dans le cas de l'argilite, il est préférable de parler de colmatage des fractures. En effet, le recouvrement partiel des caractéristiques de la roche ne concerne que les propriétés de transfert. Un ouvrage international récent a compilé l'ensemble des données acquises sur les différentes formations argileuses (Self-Sealing of Fractures in Argillaceous Formations in Context with the Geological Disposal of Radioactive Waste, Editor : H. Bock, document OECD/NEA n° 6184, 2010). Il est mis en évidence que les processus d'auto-colmatage sont les mêmes dans les différentes formations analysées dans ce rapport.

Par ailleurs, l'Andra n'a pas eu à extrapoler les tests d'autocolmatage sur échantillon à l'échelle 1. En effet, des injections de résine depuis la paroi pour observer la fracturation et des mesures régulières de la perméabilité permettent de suivre le processus d'autocolmatage insitu, dans le laboratoire souterrain de Bure.

- D'une manière générale, comment peut-on expliquer la transposition à Bure des observations (déformation, fracture, cicatrisation...) faites dans d'autres sites ?

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

- Qu'est-ce que l'ANDRA envisage de faire pour mieux comprendre l'évolution de la pression interstitielle dans la ZIRA ?

Les données de pression interstitielle acquises en continu dans l'ensemble du Laboratoire souterrain permettent d'avoir une vue cohérente de son évolution avec le creusement des ouvrages. L'approche micromécanique développée pour comprendre le comportement mécanique permet de comprendre aussi cette évolution.

- Concernant les galeries, dans l'analyse de sûreté, il est supposé que le béton reste homogène. Est-ce que les discontinuités dans le revêtement des galeries sont prises en compte ?

Dans l'analyse de sûreté menée pour le Dossier 2005, il a été tenu compte d'une fissuration probable des bétons de revêtement/soutènement (+ radier) à long terme, de sorte que, par prudence, dans tous les scénarii, il a été systématiquement attribué aux bétons de galeries une perméabilité très élevée de 10^{-6} m/s (similaire à celle d'un sable).

- Quand l'ANDRA parle de « défaut de scellement », il s'agit plutôt de problèmes liés à l'EDZ, le scellement restant intact (en tout cas, la défaillance du scellement n'est pas décrite). Ne s'agit-il pas, alors que le scénario est qualifié de pessimiste, d'un scénario qui reste optimiste ?

Dans l'évaluation de sûreté menée pour le Dossier 2005, le scénario « défaut de scellement » est défini comme la défaillance des saignées, et par conséquent, l'existence d'une EDZ (zone fracturée à $5 \cdot 10^{-9}$ m/s et zone micro-fissurée à $5 \cdot 10^{-11}$ m/s) continue depuis les alvéoles de stockage jusqu'au toit du Callovo-Oxfordien au niveau des puits d'accès (voir TES, § 7.2, p499-548).

Cependant, au travers d'une sensibilité à la perméabilité du noyau à base d'argile gonflante naturelle (de 10^{-11} m/s à 10^{-9} m/s), l'Andra a tenu compte d'incertitudes/risques liés au noyau pouvant conduire à une évolution/dégradation de sa perméabilité, par exemple liée à la mise en place du noyau, au choix du matériau du noyau, ou aux évolutions des propriétés physico-chimiques du noyau (voir TES, § 7.2, p509-511). Le choix de la valeur de 10^{-9} m/s, qui est pessimiste, a notamment reposé sur les très nombreuses connaissances acquises depuis longtemps sur les matériaux à base d'argile gonflante naturelle dans des domaines variés (géologie, médecine, génie civil...), et plus spécifiquement dans le domaine des déchets radioactifs par l'Andra et ses homologues, sur les ouvrages à base de bentonite (cf. SKB, Nagra, AECL, en termes d'expérimentations à différentes échelles, avec différentes bentonites, avec différents modes de mise en forme etc.).

Questions relatives au chapitre 5

- Dans quelle mesure l'ANDRA tient-elle compte de l'éventuel stockage direct de combustible usé (y compris le MOX usé) ?

Dans la loi du 30 juin 2006, les combustibles usés ne sont pas considérés comme des déchets. A ce stade des études, et conformément au PNGMDR, les seuls combustibles usés que l'Andra doit prendre en compte pour le stockage par sont ceux issus des réacteurs expérimentaux et de la propulsion navale.

- Est-ce que les propriétés thermiques de l'argile gonflante ont été étudiées ? Si oui, où peut-on trouver les données ?

Les propriétés thermiques des matériaux à base d'argile gonflante ont fait l'objet de nombreux travaux de caractérisation tant à l'Andra que chez ses homologues étrangers. Elles ont été synthétisées et sont disponibles dans le référentiel des matériaux d'un stockage de déchets à haute activité et à vie longue dédié aux argiles gonflantes (tome 1, § 4.2.2, p241-247).

- Question relative au chapitre 6

Est-il prévu de construire, dans le laboratoire, une zone d'expérimentation pour étudier l'évolution d'un site de stockage en conditions réelles ?

Le Laboratoire permet de suivre des ouvrages à taille réelle sur de longues années, comme cela a été réalisé en Suède avec le Prototype Repository experiment à Aspö, qui se limitait à un tronçon de galerie avec quelques puits de stockage. Par exemple, une alvéole HA chauffée va être installée l'année prochaine dans le cadre d'un projet européen.