

**EXAMEN CRITIQUE DU PROGRAMME DE L'ANDRA SUR LES
RECHERCHES EFFECTUEES DANS LE LABORATOIRE
SOUTERRAIN DE BURE ET SUR LA ZONE DE TRANSPOSITION
POUR DEFINIR UNE ZIRA**

Présentation du rapport au CLIS

Arjun Makhijani, Ph.D.

Directeur du Projet

14 février 2011

La démarche de l'évaluation d'IEER

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

L'équipe de l'IEER

- Chapitre 1: Conclusions et recommandations - Arjun Makhijani avec la participation de l'équipe.
- Chapitre 2: Données sismiques et caractérisation sismologique de la zone de transposition - Gerhard Jentzsch
- Chapitre 3: Caractéristiques et propriétés de la formation hôte et des formations encaissantes dans la Zone de transposition influençant le transport des contaminants dans les milieux géologiques et les performances à long terme du stockage – Elena Kalinina
- Chapitre 4: Mécanique des roches - Jaak Daemen avec la participation de Krishan Wahi
- Chapitre 5: Aspects thermiques – George Danko
- Chapitre 6: Comparaison avec d'autres programmes qui ont réalisé des recherches souterraines en vue de sélectionner une ZIRA - Arjun Makhijani et Krishan Wahi
- Traduction et relecture de traduction: Annie Makhijani
- Traduction et relecture de traduction: Jean-Luc Thierry
- Appui scientifique: Annie Makhijani
- Documentaliste: Lois Chalmers
- Quelques remerciements

Points forts

- **L'Andra et la recherche du site de stockage:** dans un certain nombre de domaines, l'Andra est à l'avant-garde en ce qui concerne la recherche en laboratoire souterrain.
- **Critères pour la ZIRA :** Les critères des données d'entrées basés principalement sur la sédimentologie, l'épaisseur et la profondeur ont été respectés dans la sélection de la ZIRA de 30 km².
- **La conception modulaire:** La méthode de la conception modulaire pour le plan du site de stockage est un principe solide. L'importante distance entre les modules de différents types de déchets améliore considérablement la crédibilité des arguments à l'appui des performances de confinement et d'isolement et de la mise en œuvre de la réversibilité.

Conclusions principales

- Une vision optimiste des performances.
- Un calendrier officiel pour le projet de site de stockage beaucoup trop tendu.
- Les quantités et les types de déchets (terme source ou modèle d'inventaire et de dimensionnement, MID) pas encore clairement définis.
- L'Andra ne tient pas suffisamment compte des propriétés de la roche hôte.

Recommandations

- **Evaluation externe:** Les évaluations des performances ont tendance à être systématiquement optimistes et ne reflètent pas pleinement les détails des données disponibles. Un niveau important d'évaluations supplémentaires indépendantes externes, allant bien au-delà des évaluations externes actuelles doit se poursuivre.
- **Redondance:** Actuellement, l'Andra suppose que les caractéristiques géologiques de la roche hôte seront suffisantes à elles seules pour garantir des performances satisfaisantes sur des périodes très longues. Une approche dans laquelle les barrières ouvragées fourniraient une capacité redondante d'isolement pour la performance permettrait également de réduire les incertitudes.
- **Terme source ou MID:** Les quantités et les types de déchets qui seront mis en stockage doivent être définitivement précisés le plus rapidement possible. Par exemple, l'Andra ne se prépare pas activement pour la mise en stockage du combustible usé, qui nécessite des conditions beaucoup plus complexes et difficiles du point de vue minier et de la stabilité.

Ch. 2: Données Sismiques

- Points Forts
 - Les études sismiques couvrent toute la zone de transposition, et elles traversent aussi les failles aux limites
 - Les travaux de recherche sont de bonne qualité
 - Les campagnes sismiques 2D et 3D ont été faites et interprétées correctement

Ch. 2: Données Sismiques

- Conclusions
 - Résultats favorables, mais: documentation?
 - Microfissures: colmatées ou non?: les recherches montrent que les microfissures sont colmatées dans le laboratoire. Le sous-sol de la ZIRA devra être caractérisé pour arriver à la même conclusion.
 - Pas de failles verticales avec un rejet de plus de quelques mètres: des chemins d'écoulement d'eau verticaux? Calcites à proximité de la surface?

Ch. 2: Les séismes – analyse des risques sismiques

- Pour l'Andra, l'aléa sismique local est faible
- L'Andra a évalué l'éventail des périodes de retour pour des zones spécifiques. Cependant, nous n'avons pas trouvé d'analyse comparative, à partir des catalogues des séismes utilisés par l'Andra, indiquant de quelle façon la secousse maximale a été déterminée.

Ch. 3: Propriétés de la roche hôte

L'Andra s'appuie sur les propriétés suivantes de la formation Callovo-Oxfordienne:

- Homogénéité (y compris l'absence des fractures importantes et de failles)
- Faible perméabilité
- Gradient hydraulique faible
- Flux des contaminants diffusif
- Absorption forte des radionuclides dans la roche hôte

L'évaluation de l'IEER indique que:

- Les propriétés de la formation Callovo-Oxfordienne varient dans la direction verticale et dans la direction horizontale.
- Les propriétés sont anisotropes. C'est à dire, à un point précis, les propriétés sont différentes dans les directions verticale et horizontale
- L'incertitude concernant certaines propriétés fait que leur valeur peut varier d'un facteur 10 à un facteur 1000

Les failles sont importantes parce qu'elles peuvent avoir un impact sur les propriétés de la roche hôte et jouer un rôle dans le transport des contaminants.

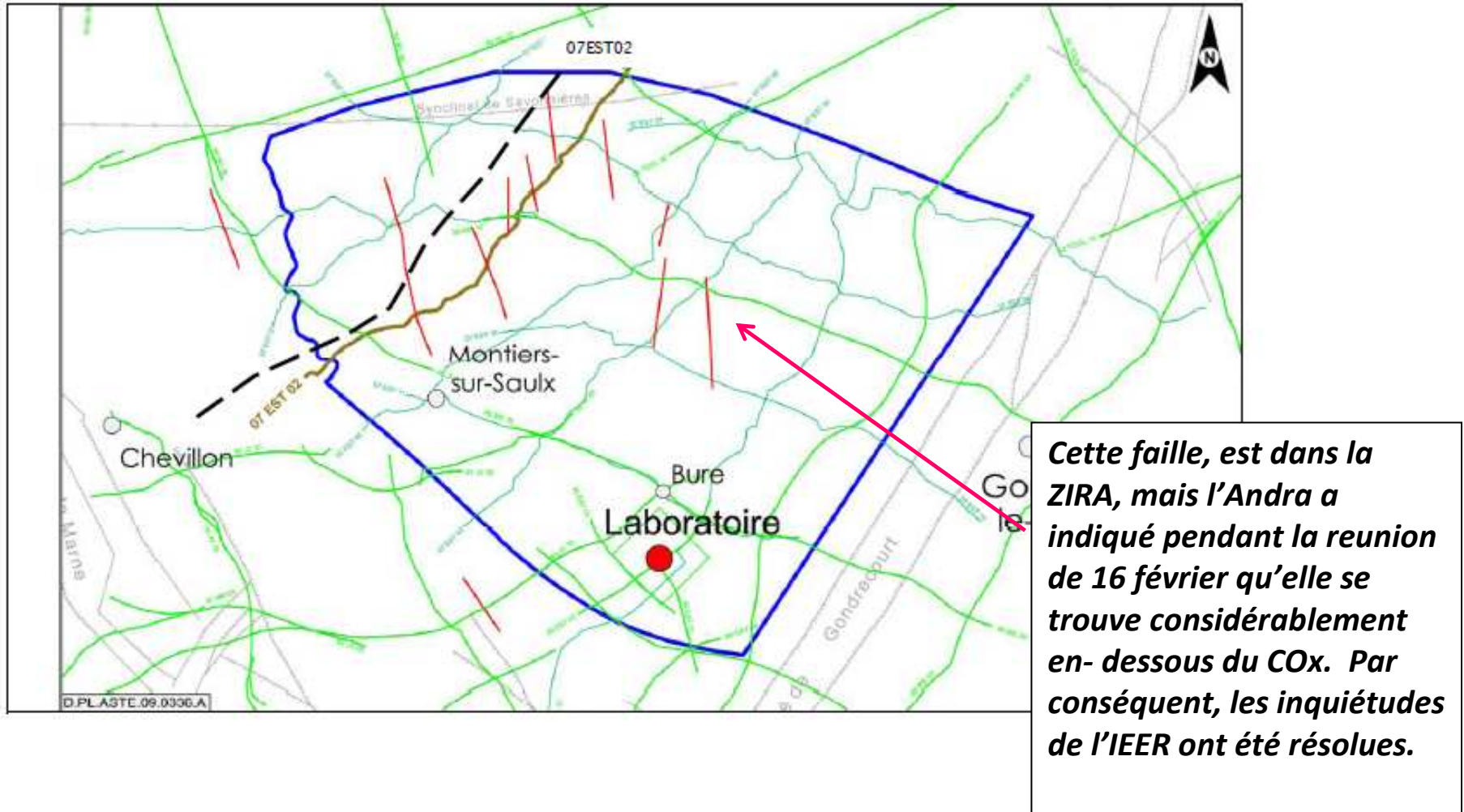
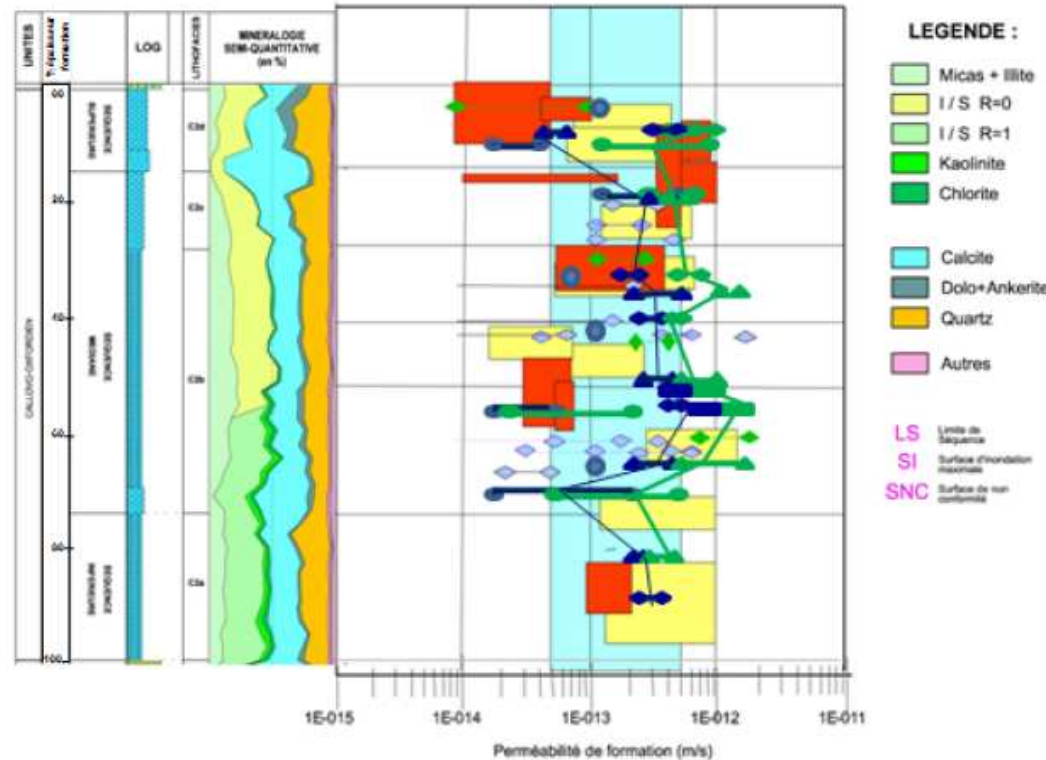


Figure 3-1 du rapport. Disposition des failles mises en évidence avec la nouvelle (2007-2008) campagne de sismique réflexion (Source : Référentiel du site 2010, Tome 1, Figure 9-14 (page 212))

La conductivité hydraulique est importante parce qu'elle influence directement le transport des contaminants dans la roche hôte



La valeur maximum de conductivité hydraulique utilisée par l'Andra dans son analyse de sûreté est 4 fois inférieure à celle indiquée par les données. Par conséquent, l'Andra sous-estime la vitesse de transport des contaminants et surestime le temps de transport

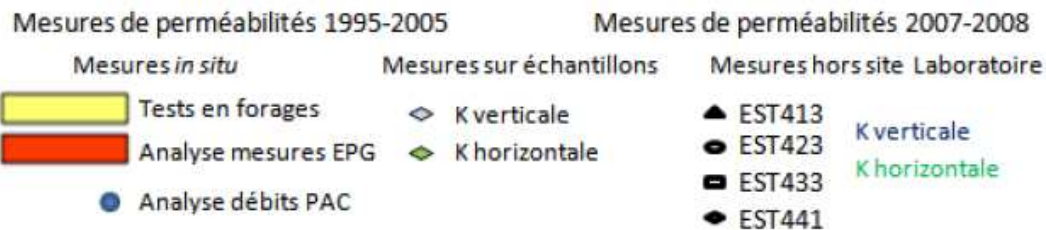


Figure 3-11 du rapport. Synthèse des données de perméabilités fiables mesurées dans la formation du Callovo-Oxfordien (Source : Référentiel du Site 2010, Tome 1 Figure 15-28 (p. 551))

Le coefficient de diffusion influence directement la vitesse de transport des contaminants dans la roche hôte.

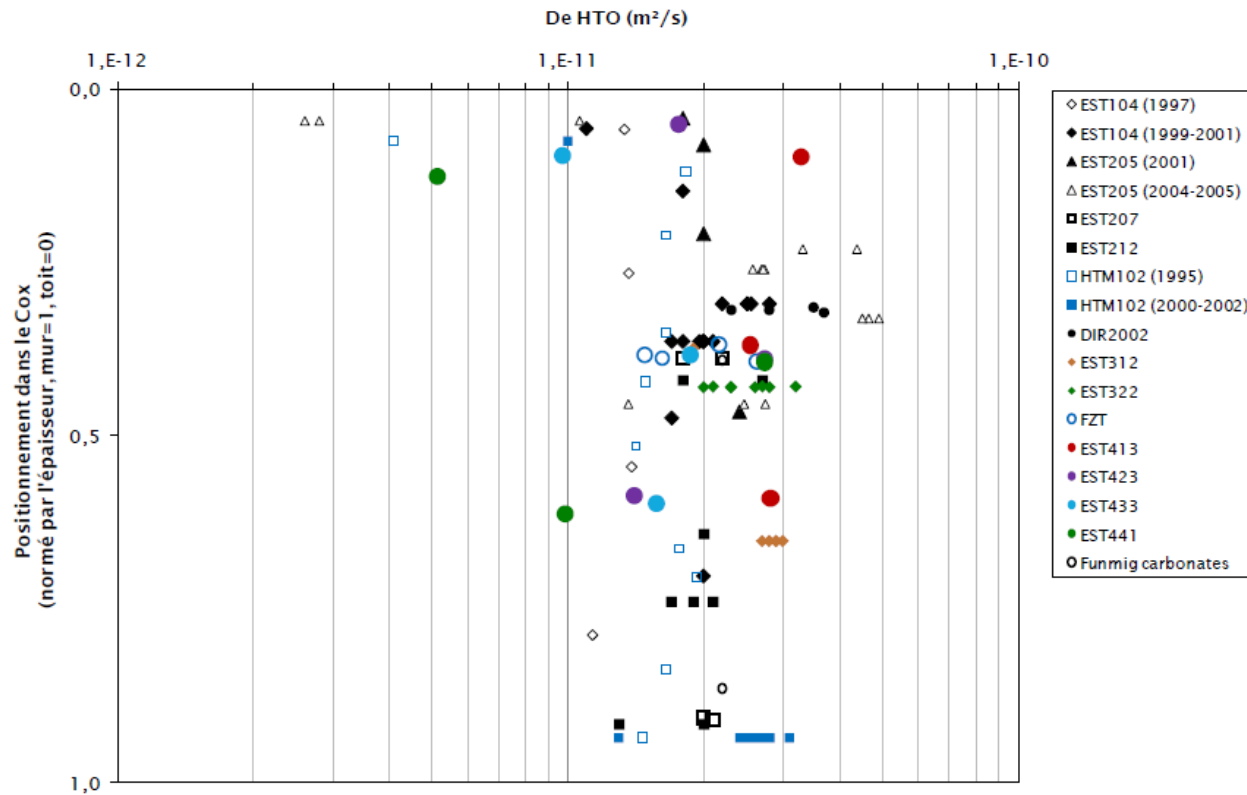


Figure 3-15 du rapport. Coefficients de diffusion effectifs de l'eau tritiée dans le Callovo-Oxfordien, en fonction de la position des échantillons dans la couche du Callovo-Oxfordien (Source : Référentiel du Site 2010, Tome 1 Figure 14-7 (p. 497))

Les données indiquent que ce coefficient varie dans un seul forage et aussi entre les forages. La conclusion de l'Andra selon laquelle les coefficients de diffusion sont indépendants de la profondeur contredit les données. L'utilisation par l'Andra dans le cadre de son analyse de sûreté de cette conclusion pour justifier l'hypothèse d'homogénéité de la roche hôte n'est pas justifiée.

Ch. 3: Les inquiétudes principales concernant l'analyse de sûreté de l'Andra

- ❑ L'analyse de l'Andra suppose que la roche hôte est homogène et isotrope, mais la formation du Callovo-Oxfordien est inhomogène et anisotrope
- ❑ La gamme des paramètres utilisés par l'Andra est trop réduite par rapport à ce qu'indique les données. Par conséquent, les doses de radiation calculées par l'Andra sont peut-être sous-estimées.
- ❑ Le choix fait par l'Andra des sites de pompage de l'eau pour l'agriculture et les usages domestiques sous-estime les doses de radiation potentielle.
- ❑ L'Andra n'a pas procédé à une évaluation probabiliste du risque en utilisant la gamme complète des valeurs des paramètres indiqués par les données; elle a seulement fait une analyse de sensibilité limitée qui sous-estime significativement la fourchette des doses totales

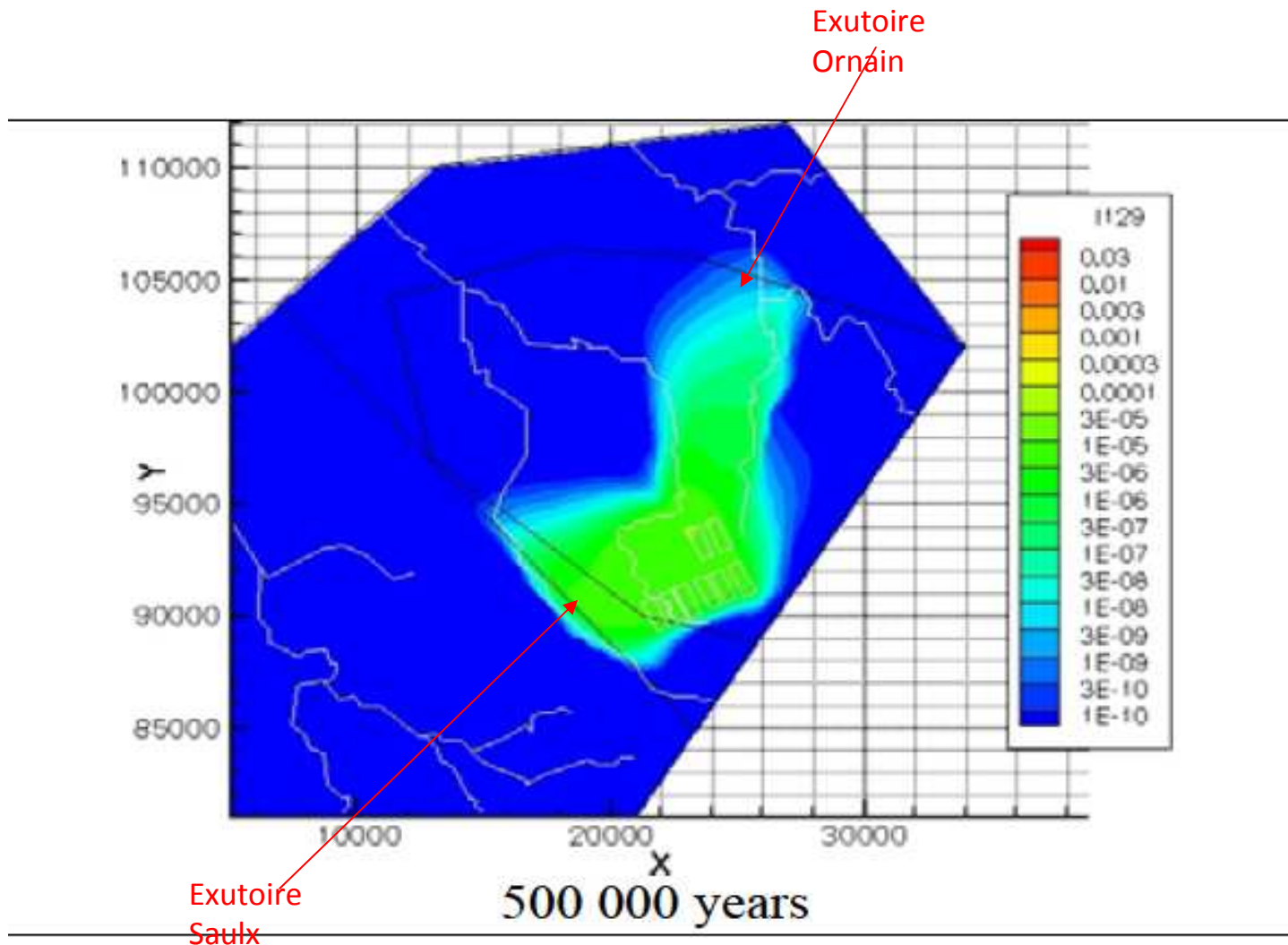


Figure 3-26. du rapport SEN Panache de concentration molaire de l'I 129 dans 500 000 ans. (Source: Dossier 2005 Argile Sûreté figure de gauche de la Figure 5.5-13 (p. 309)) Note: Les exutoires Ornain et Saulx ont été ajoutés à cette figure.

Les exutoires choisis par l'Andra représentent les puits qui pourront être utilisés par le groupe critique. Par conséquent, les doses de radiation seraient significativement supérieures si les puits étaient situés dans la zone contaminée, et non en limite.

Ch. 3: Les résultats de l'analyse simplifiée de l'IEER montre l'impact de la prise en compte de la convection pour le transport: la dose augmenterait d'un facteur 10

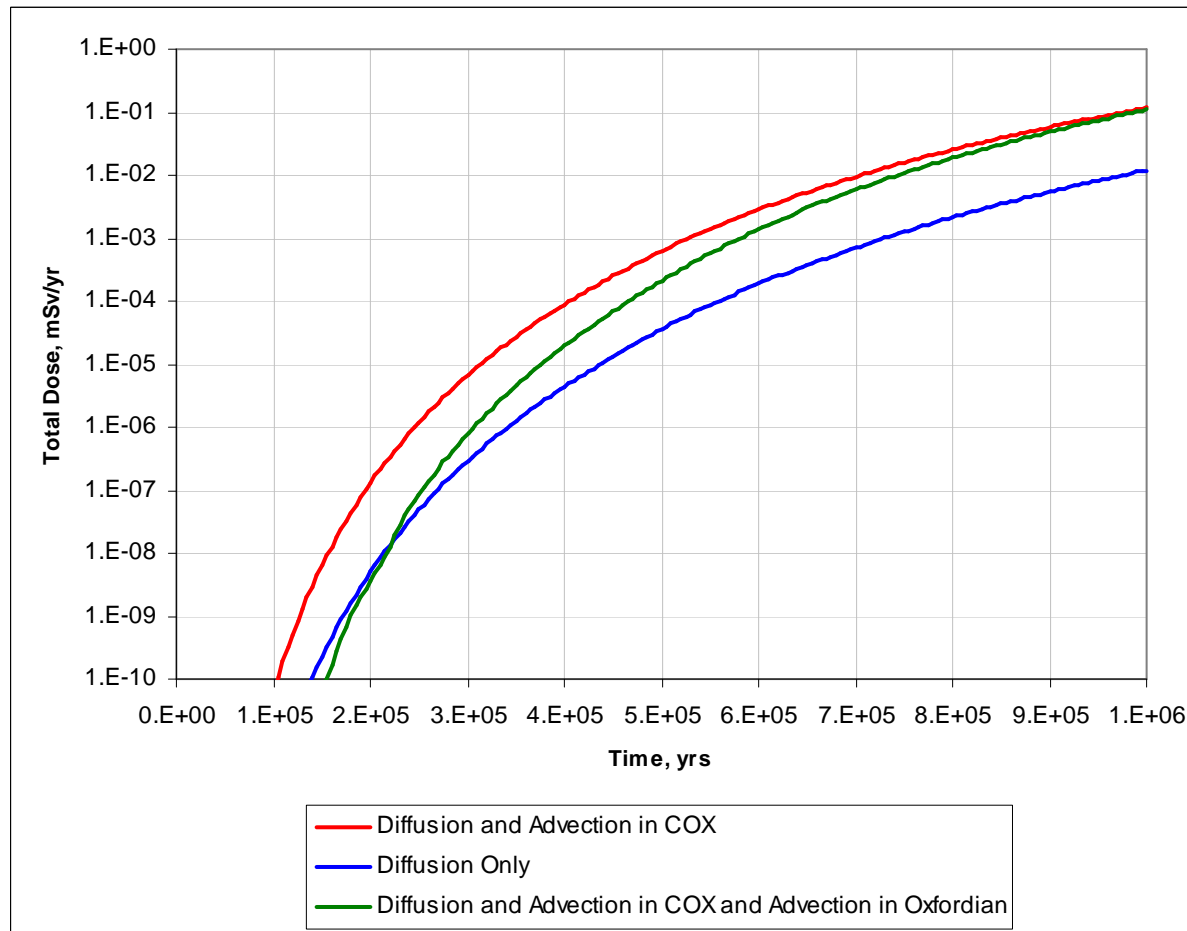


Figure 3-28 du rapport. Doses totales moyennes dans les différents modèles conceptuels (Source : E. Kalinina)

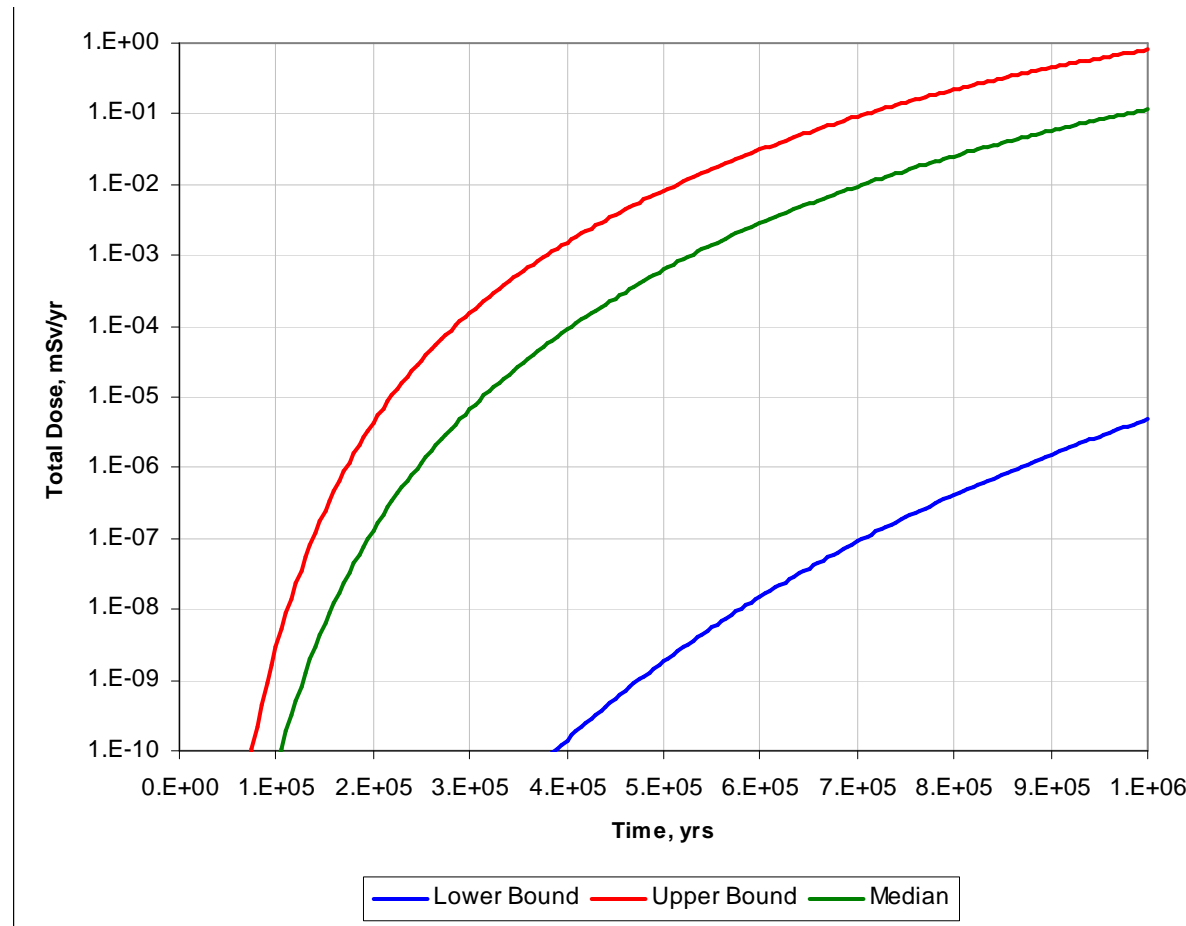


Figure 3-29 du rapport. Incertitudes des doses totales pour la diffusion et la convection dans le modèle conceptuel du Callovo-Oxfordien (Source : E. Kalinina). Les doses visent à indiquer la fourchette des incertitudes et non pas nécessairement les estimations des doses réelles.

L'incertitude estimée par l'Andra est d'un facteur 10. Une analyse probabiliste utilisant toute la gamme des paramètres montre une incertitude d'un facteur 100 000.

Ch. 4: Mécanique des roches

Points forts:

Qualité de la recherche: L'Andra a réalisé une impressionnante recherche de pointe en mécanique des roches et en ingénierie minière.

Réversibilité: Nous sommes d'accord sur l'importance que l'Andra donne à la planification pour le maintien de la réversibilité et de la récupérabilité et sa prise en compte dans la conception du stockage, la réversibilité étant exigée par la législation actuelle.

Ch. 4: Mécanique des Roches

Conclusions:

- Un optimisme omniprésent
- Influence de la construction: creation d'une EDZ
(Zone perturbée autour des excavations)
- Réversibilité: nécessité – désavantages
- Intégrité des alvéoles
- Revêtements en béton: durabilité?
- Performance des scellements

Recommandations:

- EDZ: la modélisation du comportement sur le long terme doit être plus réaliste. L'Andra prend pour acquis qu'il n'y aura pas d'hétérogénéités. Cela reste à démontrer
- Alvéoles: l'Andra devra prendre en compte le fait qu'il y aura des fractures autour des alvéoles
- Revêtements en béton: nécessité d'une surveillance continue
- Fluage de l'argilite : le développement d'un modèle réaliste et approfondi est essentiel

Qualité de la recherche: impressionnante

- Un type de roche complexe et difficile
- Bonne qualité des mesures de contrainte
- Comportement mécanique: fluage
 - Etudes in situ des fractures (dans le laboratoire)
 - Propriétés mécaniques
 - Essais en laboratoire
 - Essais sur le terrain

La réversibilité

- Requise par la loi et la confiance du public
- CNE: demande que la réversibilité n'interfère pas avec la sûreté du site de stockage (i.e. isolement et confinement des déchets).
- Il y a une tension entre les deux objectifs – réversibilité et isolement. Par exemple, l'éventuelle détérioration des revêtements et de la roche environnante qui interviendra sur des périodes très longues pose la question de savoir s'il ne serait pas préférable d'envisager de minimiser les dégâts, par exemple en ne laissant un creusement ouvert que le temps absolument nécessaire.

Ch. 4: Mécanique des roches: Conclusions

Un optimisme omniprésent

Par exemple, l'Andra suppose

- Fermeture/cicatrisation/auto-scellement des fractures
- Fermeture par fluage de tous les vides
- Rétablissement de la perméabilité de l'EDZ

Influence de la construction: zone perturbée autour des excavations

- Etudes de terrain: développement/formation des fractures
- Observations lors des visites de terrain: L'équipe de l'IEER a observé une nette déformation ainsi qu'un déplacement de cisaillement le long de certaines fractures sur certains creusements horizontaux forés récemment pour une cellule de stockage (alvéole).
- La perturbation de la zone a-t-elle été prise en compte de façon réaliste pour les évaluations de la performance?
- Il manque des informations sur les méthodes de creusement et sur le revêtement pour garantir une perturbation minimale.

Une déformation observée par équipe de l'IEER dans un forage du laboratoire souterrain



Figure 6-1 du rapport : Hors-profil par rapport à la forme circulaire d'un forage dans le laboratoire souterrain de Bure. Photo prise par Krishan Wahi, 18 août 2010.

Détail de l'alvéole montrant les coins



Détail de la figure 6-1

Des fractures autour d'un forage effectué dans une paroi de galerie à Bure



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

Intégrité des alvéoles

Observations faites à l'issue de la visite du laboratoire par l'équipe de l'IEER:

- L'intégrité des alvéoles ne semble pas avoir été prise en compte dans les analyses de l'Andra
- D'une manière générale, l'Andra fait l'hypothèse d'ouvertures restant parfaitement circulaires dans une roche homogène et isotrope (par exemple, l'influence de la stratification n'est pas prise en compte)

Revêtements en béton

- La représentation par l'Andra de l'affaiblissement final des revêtements en béton dans les exercices de modélisation numérique est trop optimiste. Cette approche semble aboutir à donner une durée de vie excessivement longue au béton, même en tenant compte des conditions présumées exceptionnellement favorables dans lesquelles ce béton sera utilisé (c'est-à-dire en comparaison de tunnels routiers ou d'exploitations minières souterraines).
- En outre, cette modélisation de l'affaiblissement semble peu compatible avec les assertions de l'Andra prévoyant que d'ici quelques millénaires, le revêtement connaîtra une fracturation renouvelée ou réactivée.

Ch. 4: Analyse des performances des scellements

Optimisme de l'Andra dans l'analyse des performances des scellements

- Fluage de l'argilite: un continuum uniforme et isotrope?
(sans fracture, sans plan de stratification, sans hétérogénéité?)
- Fermeture parfaite de tous les vides
- Selon l'analyse de l'IEER, la perméabilité de la roche hôte pourrait augmenter d'un facteur 1000 à un facteur 100 000 dans la zone de stockage, plutôt que de revenir pratiquement à son niveau initial, comme présumé par l'Andra.

Ch. 5: Aspects thermiques

Point forts

- Les méthodes de mesures utilisées par l'Andra sont crédibles et jugées aptes à évaluer correctement les propriétés thermiques, même dans une roche anisotrope, comme de l'argilite sédimentaire.
- En règle générale, les mesures des propriétés thermiques à partir de méthodes différentes le long des couches sédimentaires donnent des résultats similaires.
- Le modèle thermique du Dossier 2005 Argile, pour la température de l'argilite en interface avec un colis de combustible usé, peut être raisonnablement corroboré par des modèles alternatifs.

Ch. 5: Aspects thermiques

- La documentation des modèles thermiques concernant les hypothèses, les conditions et les données d'entrée, est tellement dispersée qu'il est impossible pour nous de les retrouver et de les vérifier.

Ch. 5: Aspects thermiques

- 1. La conception thermique (et mécanique) du site de stockage nécessite la spécification d'un terme source. Surtout, il faudra aborder et lever la présente incertitude, à savoir si du combustible usé [non retraité] sera stocké.
- 2. Nous recommandons vivement que l'Andra développe un scénario plausible avec comme élément important la mise en stockage du combustible usé. Cela est nécessaire car le scénario S2, présenté dans le Dossier 2005 Argile, qui suppose un arrêt du retraitement en 2010, est actuellement obsolète. Nous sommes conscients du fait qu'aujourd'hui, ce genre de scénario n'est pas requis mais l'Andra doit tenir compte, pour le dimensionnement, du stockage direct du combustible usé non retraité, dont le combustible MOX.

Ch. 6: Comparaisons internationales

- 1. L'Andra a effectué de nombreux travaux en collaboration avec d'autres programmes, notamment ceux de Mol en Belgique et du Mont Terri en Suisse.
- 2. L'Andra a été un leader pour beaucoup de travaux de collaboration internationale. Par exemple, le programme Engineering Studies and Demonstration of Repository Designs (ESDRED).
- 3. Cette collaboration internationale a été bénéfique pour le programme français et celui d'autres pays.

Ch. 6: Comparaison internationales

- Dans certains domaines, comme les scellements et les essais thermiques dans les forages en vraie grandeur, les programmes internationaux en collaboration ne peuvent pas se substituer à des essais dans le laboratoire souterrain de Bure, même si le type de roche est similaire. Par exemple, les problèmes rencontrés avec des déformations de forages de 0,7 m de diamètre, ont dû être résolus d'une manière propre au site. Dans ce domaine, des travaux considérables restent à faire sur le site de Bure. L'Andra suit un protocole pour le transfert des données d'un site à un autre
- Des recherches sur le stockage du combustible usé seront nécessaires. Par exemple, les difficultés de la stabilisation de forages de 3,3 m de diamètre risquent d'être sérieuses et nécessiteront des recherches in situ.

Ch. 6: Comparaison internationales

Recommandation

- L'Andra pourrait considérer la construction d'une zone d'expérimentation dans le laboratoire souterrain comparable au Démonstrateur de concept de site suédois à Aspö, afin de démontrer, dans une expérience de quelques années, la façon dont un site de stockage pourrait fonctionner dans la pratique.