

# **Synthèse du rapport de l'IEER 2011**

## **Chapitre 1 : Champ d'application du travail et méthodes**

Ce document répond à la demande du CLIS d'une évaluation consistant à déterminer si les travaux de recherche menés par l'ANDRA dans le laboratoire souterrain (LS) et la zone de transposition (ZT) sont suffisamment avancés et concluants pour définir la zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie (ZIRA) pour l'implantation du futur stockage.

Les critères de choix de la ZIRA par l'ANDRA sont :

1. Une épaisseur de la formation hôte de plus de 140m
2. Un gradient de charge hydraulique inférieur à 0,2 m/m
3. Une profondeur du milieu de la couche ne dépassant pas 600 m
4. La possibilité d'implanter les infrastructures souterraines perpendiculairement au pendage de la couche hôte
5. Une épaisseur réduite de couches karstiques (barrois) à traverser pour établir les liaisons jour – fond (puits ou descenderie).

Ces critères sont considérés comme pertinents par l'IEER. D'autres critères, ne concernant pas la géologie, ne sont pas étudiés par l'IEER.

Du fait du temps imparti, l'IEER n'a pas forcément eu accès à tous les documents ANDRA pouvant expliquer ses réserves. Certaines lacunes relevées pourraient trouver des réponses dans des documents non transmis par l'ANDRA.

Conclusions générales :

Points forts :

- L'ANDRA est à l'avant garde dans ses recherches dans de nombreux domaines. Excellent travail, efforts de recherche remarquables, l'IEER a été impressionné par le travail réalisé au LS lors de sa visite à Bure
- Utilisation à bon escient des critères géologiques pour choisir la ZIRA dans les meilleurs 100 km<sup>2</sup> de la ZT.
- Les campagnes sismiques 2D et 3D sont convaincantes et les failles majeures hors de la ZIRA sont favorables au contexte hydrogéologique.
- La conception modulaire du stockage est un concept solide.
- Les méthodes de mesures thermiques sont crédibles même en roche anisotrope.

## Points faibles :

- L'évaluation de performance du stockage est optimiste dans l'interprétation de phénomènes complexes.
- Le calendrier du projet de site de stockage est beaucoup trop tendu, il y aurait besoin de quelques années supplémentaires (sans estimation plus précise).
- Le terme source (la nature et les caractéristiques des déchets) n'est pas clairement défini, tout en supposant le retraitement de tous les déchets.
- L'ANDRA suppose l'homogénéité et l'isotropie de la couche hôte alors que les propriétés varient dans le Callovo-Oxfordien (Cox) et même au sein de la ZIRA. Bien que l'impact de ces hétérogénéités sur la performance puisse être faible, il convient que l'ANDRA les caractérise.
- L'ANDRA estime que le transport diffusif est dominant mais l'IEER pense que le transport convectif n'est pas négligeable, d'où un transport mixte (plus rapide).
- L'ANDRA n'a pas fait d'analyses probabilistes complètes pour la performance, entraînant de possibles variations des estimations des doses de radiation.
- Le potentiel de séisme sur cette zone semble faible mais nous n'avons pas trouvé d'analyse comparative, à partir des catalogues des séismes utilisés par l'Andra, indiquant de quelle façon la secousse maximale a été déterminée, à la fois pour la période d'exploitation et la période post-fermeture. Les microfissures que l'Andra a détectées dans le laboratoire souterrain étaient colmatées. Il reste à déterminer si cela sera aussi le cas pour la ZIRA, puisque la caractérisation de son sous-sol est nécessaire pour arriver à cette conclusion. Cette conclusion doit être validée à partir de données spécifiques à la ZIRA.
- L'IEER estime que dans l'analyse de performance, l'ANDRA ne tient pas compte de toute la gamme des valeurs possibles de la perméabilité de la roche et, en particulier, se fonde trop sur le retour à la situation initiale dans l'EDZ.
- Le découpage de saignées dans la roche pour la pose de scellement pourrait endommager les revêtements déjà posés.
- Selon l'IEER, la méthode Flash utilisée par l'ANDRA n'est pas valable pour les mesures de conductivité thermique en milieu anisotrope ; l'IEER a par ailleurs noté des valeurs incohérentes même si les différences sont faibles et négligeables.
- L'IEER note qu'il manque des tests in situ et/ou grandeur nature dans le LS, en particulier en ce qui concerne le dégagement de chaleur des colis ou pour l'endommagement au creusement.
- Bien que non mandatée à cette fin, l'ANDRA devrait étudier l'hypothèse de la mise en stockage des combustibles usés (CU) non retraités.

## Recommandations :

- L'ANDRA a fait un excellent travail scientifique mais ses modélisations de performances sont systématiquement optimistes. Des évaluations extérieures doivent donc se poursuivre, même pendant la phase d'exploitation du stockage, par l'IRSN par exemple avec le personnel qualifié et les financements suffisants.
- Les évaluations de l'ANDRA, bien qu'optimistes, reposent uniquement sur les propriétés de la couche géologique. D'autres analyses sont nécessaires pour réduire les incertitudes. D'autres modèles seraient nécessaires, par exemple en

tenant compte de la barrière des conteneurs, des propriétés des barrières ouvragées .

- Le terme source doit être défini et le stockage direct des CU devraient être envisagé.
- L'Andra devrait fournir une analyse probabiliste, facile à consulter, de l'accélération et de la charge choisies qu'elle a l'intention d'utiliser dans la conception des installations de surface, notamment les installations de manutention des déchets. Pour faciliter l'examen il serait judicieux d'inclure cette analyse probabiliste dans le catalogue des séismes.
- L'évaluation des performances devrait mieux prendre en compte l'hétérogénéité.
- L'hypothèse raisonnablement prudente serait que l'EDZ ne revienne pas à l'état d'avant creusement par cicatrisation.
- Le fluage de l'argilite dans le stockage est fonction en partie de la contrainte déviatorique, la saturation et la température. Ces facteurs et leur influence sur les performances ne semblent avoir été traités que de façon qualitative par l'ANDRA.
- L'ANDRA devrait envisager un prototype de stockage en se basant sur le modèle suédois pour des études à grande échelle et sur de nombreuses années.
- L'IEER recommande d'évaluer la possibilité d'un stockage en alvéole verticale et pas seulement horizontale, en particulier pour les CU si cela devenait nécessaire.

## Chapitre 2 : les données sismiques et la caractérisation sismique

Points forts :

Les recherches menées sont tout à fait convaincantes, les travaux sont de bonne qualité mais l'analyse présente des lacunes.

Points faibles :

Bien que la présence de failles verticales avec un rejet de plus de quelques mètres soit écartée, il est clair qu'il existe des chemins d'écoulement verticaux qui peuvent même être observés dans les carrières locales. Les calcites trouvées à proximité de la surface en sont la preuve. Une analyse comparative, à partir des catalogues des séismes utilisés par l'Andra, indiquant de quelle façon la secousse maximale a été déterminée, à la fois pour la période d'exploitation et la période post-fermeture n'a pas été trouvée. Dans certains rapports, des erreurs d'unités devraient être corrigées. Dans certains cas, des unités de vitesse sont données alors qu'il s'agit de déplacements, dans d'autres c'est la fréquence au lieu de la période, etc.

Recommandations :

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

## Chapitre 3 : les paramètres hydrogéologiques

### Points forts :

L'ANDRA a mené des recherches approfondies au LS et sur la ZT, utilisant des techniques d'avant-garde vu les spécificités de l'argilite (faible perméabilité, forte capacité de sorption, exclusion anionique ... ). L'utilisation de données acquises sur d'autres sites complète ou corrobore les données de Bure. L'ensemble des données au final est exceptionnel.

### Points faibles :

Les problèmes identifiés sont généralement plus liés aux analyses des données qu'aux données elles-mêmes. L'ANDRA n'a pas fait une analyse probabiliste de sûreté tenant compte de la variabilité des propriétés de l'argilite. L'hétérogénéité du COx est verticale tout autant qu'horizontale, dans la composition minéralogique et dans la composition de l'eau interstitielle, entraînant des variations dans les propriétés de transport, dans la porosité totale, dans la porosité cinématique, dans la porosité accessible aux anions et les coefficients de diffusion effective des ions et dans la perméabilité des argilites. La ZIRA présente elle-même une hétérogénéité : on distingue le NE du SO de la ZT et la ZIRA est située entre ces deux zones. Les variabilités des paramètres ne sont pas totalement prises en compte dans les analyses, et l'impact potentiel de la variabilité n'a pas été étudié. Les paramètres de transport moyen dans la ZT pourraient être différents sur la ZIRA seule (plus élevés ?). Le transport convectif pourrait être sous-estimé. L'incertitude sur la dose maximale totale pourrait varier de cinq ordres de grandeur (soit d'un facteur 100 000).

### Recommandations :

Revoir la possibilité de convection, déterminer l'hétérogénéité de la ZIRA. Faire une analyse probabiliste du risque en tenant compte de la variabilité des paramètres. Définir un terme source précis, en tenant compte de l'éventuel stockage des CU.

Des microfractures ont été observées dans les forages et sont considérées comme des fentes de tension. L'IEER indique que la formation hôte n'est pas homogène, et se découpe verticalement en 3 couches différentes mais aussi horizontalement (la variabilité est reconnue dans le référentiel du site 2010 mais est qualifiée de réduite). Les carbonates augmentent latéralement, l'argile est plus importante au milieu de la partie NE de la ZT. La composition de l'eau interstitielle varie et se différencie aussi NE / SO. L'IEER indique que l'ANDRA sous-estime la variabilité des propriétés du COx (porosité, perméabilité, gradient hydraulique ...) et ses conséquences dans les analyses de sûreté en ce qui concerne les incertitudes en particulier.

## Chapitre 4 : mécanique des roches

### Points forts :

La recherche est remarquable et impressionnante, de pointe, approfondie, et les résultats sont fiables. C'est un travail qui apporte une contribution majeure à la mécanique des roches et à l'étude des matériaux argileux et schisteux particulièrement difficiles. Le choix de la ZIRA est fondé sur des considérations scientifiques et techniques. La conception modulaire est bonne. La réversibilité/récupérabilité est planifiée.

### Points faibles :

L'interprétation des résultats pour la performance du stockage est optimiste et insuffisamment prudente. Il y a peu de discussion sur les conséquences de la construction sur les performances de confinement de la roche hôte (EDZ). L'IEER estime que la réversibilité devrait être limitée dans le temps pour minimiser les risques de détérioration. L'IEER a observé une nette déformation sur certains creusements, tendant vers une forme de carré. La durée de vie estimée du béton par l'ANDRA est très optimiste. Les analyses de performances de l'ANDRA sont basées sur l'hypothèse que la roche est un continuum, en omettant la présence de fracture ou discontinuité pour simplifier la modélisation.

### Recommandations :

Prendre comme hypothèse que l'EDZ ne se cicatrise pas entièrement d'elle-même, quitte à prendre l'hypothèse la plus pénalisante qu'elle reste endommagée toute la vie du stockage. Continuer les investigations sur la présence d'hétérogénéités même peu probables pour limiter les incertitudes. Etudier la quadrature des forages horizontaux et le déplacement des cisaillements le long des fractures. Prévoir des analyses à long terme du béton de revêtement et envisager un revêtement plus important. Réaliser une étude quantitative sur l'influence des facteurs environnementaux (saturation, température ...) sur le fluage.

La ZIRA a été sélectionnée pour permettre l'implantation du stockage dans la zone C car elle offre la plus grande probabilité de la meilleure performance en terme de confinement (réduction du risque d'hétérogénéités, des dommages EDZ et meilleur confinement). La présence de failles secondaires modestes avec des déplacements mineurs a été prise en compte par l'ANDRA. Mais l'IEER n'a pas trouvé dans quelle mesure l'ANDRA a traité l'influence des plans de stratification en particulier dans la stabilité des creusements. Même si elle n'est pas un facteur décisif pour le choix de la ZIRA, l'ANDRA pourrait ne pas avoir suffisamment pris en compte l'éventuelle

anisotropie mécanique. Si l'anisotropie est mineure au LS, elle pourrait mériter plus de considération à l'échelle de la masse rocheuse. L'IEER suggère que l'ANDRA s'engage à faire un suivi des revêtements béton et des supports en acier (la longévité estimée du béton paraît optimiste). L'IEER reconnaît que le choix de la ZIRA dans une zone où la profondeur du stockage ne dépasse pas 600 m est très prudent et limite l'EDZ et le besoin de soutènement. L'IEER estime que l'état de contrainte a été suffisamment caractérisé y compris dans la ZIRA. Même si le problème de la pression interstitielle est complexe, sa compréhension acquise à ce jour est transférable à la ZIRA. De même, les recherches sur les propriétés mécaniques sont transférables. Globalement il y a une transférabilité des résultats (sismique, sédimentologie, géotechnique) à la ZIRA et les différences sont identifiées. Les résultats de la sismique 3D sur la ZIRA n'étaient pas encore disponibles. L'ANDRA a fait des efforts considérables sur l'étude des gaz, leurs effets étant importants sur les dispositifs de scellements. L'hypothèse de comportement comme un fluide idéal est optimiste, il faudrait plutôt considérer que l'EDZ ne se répare pas totalement. L'IEER reconnaît que la sélection de 100 km<sup>2</sup> où se trouve la ZIRA est un choix justifié sur la base de critères scientifiques et techniques solides : forte teneur en argile, proche de la profondeur optimale, emplacement central dans le COx, d'où un confinement maximal. L'IEER approuve le choix de conception modulaire et le concept de réversibilité tout en émettant une réserve sur la durée de cette dernière.

## Chapitre 5 : aspects thermiques

### Points forts :

Les méthodes de mesure de l'ANDRA sont crédibles et aptes à évaluer les propriétés thermiques même dans une roche anisotrope. Les propriétés thermiques dans les différentes couches et selon différentes méthodes sont concordantes. Même si l'anisotropie est une propriété importante, des analyses de l'IEER avec une valeur isotrope permettent d'obtenir des résultats équivalents. Le modèle de l'ANDRA avec l'hypothèse de stockage de CU est corroboré par des modèles alternatifs avec des différences de 10 à 15%.

### Points faibles :

La documentation conséquente est dispersée et difficilement accessible. Pour la conductivité thermique de la bentonite l'Andra a utilisé une valeur plutôt élevée en supposant que sa saturation initiale serait élevée et qu'elle se resaturerait à 100 %). Le modèle de l'IEER aboutit à un objectif légèrement dépassé pour les propriétés thermiques de l'argile gonflante. La méthode Flash pour les résultats de conductivité thermiques n'est pas adaptée dans le cas d'une roche anisotrope. L'IEER trouve des valeurs incohérentes de conductivité thermique même si les différences sont négligeables.

### Recommandations :

Acquérir un terme source précis pour la conception. Prévoir la présence de CU dans le stockage même si cela n'est pas requis actuellement.

L'IEER a modélisé son propre scénario en modélisant la mise en stockage des CU, en tenant compte de l'uranium et du MOX (bien que cela ne soit pas prévu). Le modèle prévoit que le stockage de CU entraîne le dépassement de la température seuil de 90°C à l'interface argile/colis (le modèle étant simplifié, il nécessite d'être confirmé). Le stockage de CU demanderait un espacement plus grand et donc une surface de stockage plus importante. L'IEER reconnaît que les méthodes de l'ANDRA sont crédibles et aptes à évaluer les propriétés thermiques même d'une roche anisotrope. Les résultats sont concordants entre les méthodes et entre les différents lieux de mesure (pas d'effet d'échelle). L'ANDRA utilise des modèles thermiques crédibles et aptes à prévoir le concept de stockage et continue d'améliorer ses modèles numériques même si une modélisation plus simple serait suffisante. Cependant les documents restent peu accessibles.

## Chapitre 6 : comparaison avec d'autres programmes de recherche

Points forts :

L'ANDRA a fait de nombreuses collaborations et est un leader dans beaucoup de travaux. Les échanges ont été bénéfiques pour tous et ont fait progresser l'état de l'art par exemple dans le développement technique, le développement de l'équipement et des matériaux.

Points faibles :

Certaines études à l'étranger ne peuvent se substituer à des essais au LS lui-même. Le stockage des CU, bien que non prévu, devrait être pris en compte.

Recommandations :

Réaliser une zone d'expérimentation, comme le démonstrateur d'Aspö, de fonctionnement en pratique.

Les autres programmes qui ont servi pour la comparaison sont ceux de Belgique, Finlande, Allemagne, Suède et Suisse. L'ANDRA a particulièrement collaboré avec la Suisse et la Belgique. L'argile à Opalinus de Mont Terri est comparable à l'argilite de Bure. L'IEER recommande que l'ANDRA synthétise les comparaisons entre les deux

roches et justifie la transférabilité des résultats. L'IEER recommande le test de scellements et de rebouchage en grandeur nature (GN) dans le LS et leur comparaison aux résultats dans les autres laboratoires. Même si l'ANDRA a souvent fait plus de recherches dans son LS que les autres pays, elle reste en retard sur certaines études suédoises comme le forage d'alvéoles en grandeur nature, la mise en place de conteneurs GN, les essais thermiques avec des simulateurs de chauffage, lesquels ont été réalisées avant la sélection du site de stockage suédois. L'IEER est conscient que les recherches continueront au LS pendant encore de nombreuses années. L'institut recommande de prendre en compte un éventuel stockage des CU et d'évaluer si des forages verticaux seraient plus adaptés.