

Compte-rendu de la visite à la Station Expérimentale de l'IRSN à Tournemire, 7 juin 2016

1. Organisation :

Le déplacement s'est déroulé du 6 au 8 juin 2016 et nous avons été une vingtaine de membres du CLIS à visiter la Station Expérimentale de Tournemire (SET).

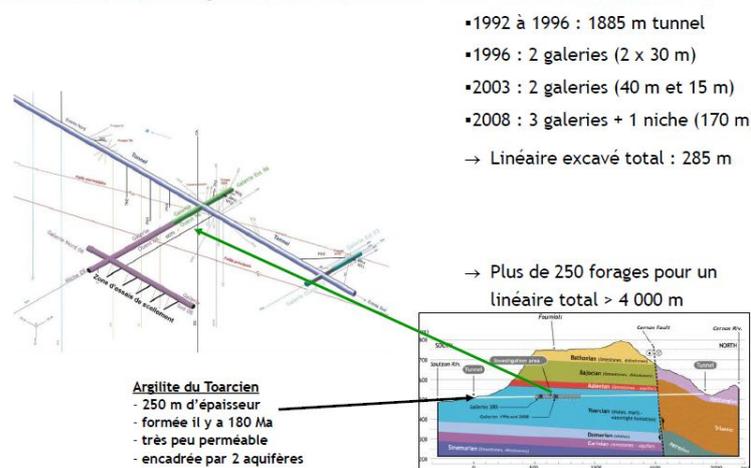
Nous avons commencé la visite par une présentation en salle par des membres de l'IRSN sur leurs travaux. Puis nous nous sommes allés visiter le tunnel et 4 stations d'expérimentations différentes. Nous avons fini par des discussions avec les membres de l'IRSN autour d'un repas.

2. Présentation de l'IRSN et de la SET :

Les objectifs de l'IRSN sont principalement de développer les connaissances et compétences nécessaires à une expertise technique crédible et indépendante, à la disposition des pouvoirs publics et de la société. Au niveau expérimental, cela implique de connaître les mécanismes fondamentaux qui pourraient avoir une incidence sur la sûreté et d'explorer les difficultés techniques de réalisation des barrières afin de porter une appréciation sur le niveau de garantie de leur efficacité. Au niveau méthodologique, l'IRSN doit être en mesure de porter un avis sur la qualité des données acquises. L'IRSN dispose aussi d'outils de simulation numérique à long terme.

Même si les recherches de l'IRSN sont thématiquement similaires à celles de l'ANDRA, elles s'en distinguent par leurs angles (par exemple elles interrogent d'autres hypothèses que celles investiguées par l'ANDRA). Leurs moyens sont limités. Elles restent calées sur le même calendrier (dépôt de DAC en 2018). L'IRSN représente environ 1 700 personnes dont une vingtaine sont mobilisées sur le projet CIGEO, la moitié travaillant à la SET : géologues, géochimistes, géomécaniciens, hydrogéologues, sismologues, modélisateurs, techniciens en métrologie ... La SET, acquise en 1992, permet les expériences in situ dans une argilite (Toarcien supérieur) analogue à celle du COX, et son coût annuel de fonctionnement est de l'ordre de 160 k€.

La station expérimentale de Tournemire



4 grandes thématiques ont été présentées : surveillance et réversibilité ; perturbations physico-chimiques ; performance de la barrière argileuse saine ou fracturée ; performance des dispositifs de scellement.

L'IRSN dispose aussi du laboratoire de Fontenay-aux-Roses permettant d'autres expériences (caractérisation des solides, de la chimie des eaux...). L'IRSN a par ailleurs développé l'outil de modélisation MELODIE pour simuler le transport de radionucléides dans les ouvrages d'un stockage et les formations géologiques (jusqu'à 1 M d'années).

L'IRSN collabore à de nombreux partenariats scientifiques : CNRS, Bel-V en Belgique, Mont Terri en Suisse, CCSN au Canada... La valorisation des recherches se fait par près de 300 publications depuis 1991, 10 à 15 publications par an, et 20 à 40 participations par an à des congrès.

3. Le site de Tournemire et les travaux menés par l'IRSN :

Dans les galeries, l'eau n'est pas visible, elle est incluse dans la roche. L'argilite de Tournemire est de composition minéralogique comparable à celle de Bure, mais de porosité plus faible (10 %, soit 2 fois

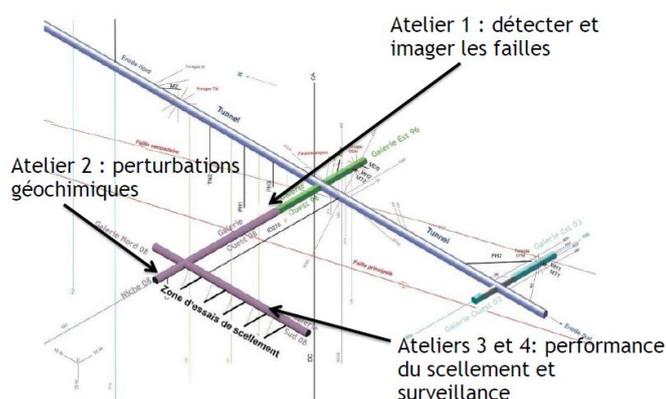
moins) et de perméabilité plus faible (10^{-14} m/s) ; eau porale très peu salée 1,7 g/L (3 fois moins qu'à Bure). Les coefficients de diffusion sont comparables et permettent la transposabilité des techniques.

Les analogies : couche argileuse, encadrée de 2 aquifères (50 m au-dessus et 250 m plus bas), stratification subhorizontale, minéralogie et chimie proches.

Les différences : moins poreuse, moins perméable, failles identifiées.

Tournemire et Bure sont de la même famille de roche en terme mécanique, même si la roche de Tournemire nécessite moins de soutènement que celle de Bure (il y a aussi seulement 250 m de roches au-dessus).

Les 2 premières galeries circulaires sont à 500 m de l'ouverture et permettent l'étude d'interactions entre la roche et les bétons. Les 2 suivantes sont à 700 m de l'entrée sud, elles font 30 m de long et datent de 1996. On y observe des fissures dont l'une date de la séparation Amérique / Europe, l'autre de la formation des Pyrénées, soit plus de 100 M d'années entre les 2. Au niveau des fractures, la datation de l'eau porale indique un âge de 15 000 ans. L'eau est passée de 35 à 1,7 g/L en plusieurs M d'années ce qui démontre la lenteur des échanges. Cette roche est 1 000 à 10 000 fois plus imperméable qu'un béton, une molécule d'eau ne peut parcourir que quelques cm par M d'années (sous le gradient de charge actuel estimé à 0.5 m/m ascendant pour le site de Tournemire). La galerie suivante a été creusée en 2008, elle contient le dispositif de détection et caractérisations des failles.



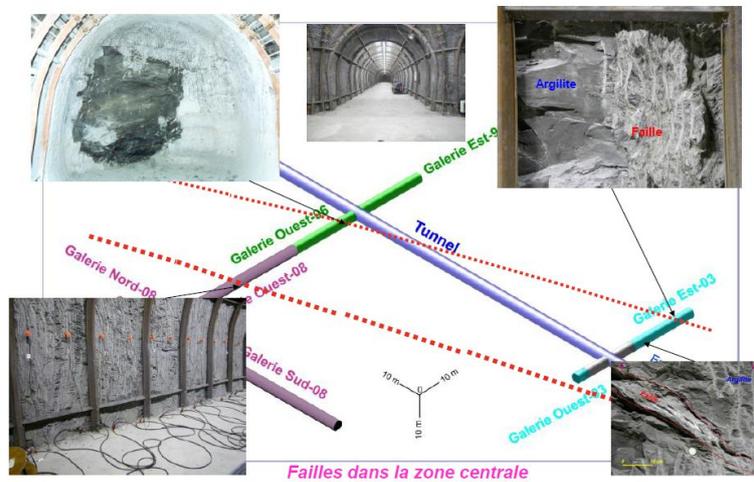
a) Utilisation des méthodes géophysiques pour la détection d'anomalies au sein des couches géologiques.

A Tournemire, il y a des failles d'environ 100 m de long, 10 m d'épaisseur, décrochantes, de faible rejet vertical (2 m) qui peuvent être observées in situ. Les méthodes géophysiques utilisent des ondes sismiques, ou la propagation de courants électriques.

Avec les ondes sismiques, la faille sera visualisée comme une discontinuité avec ou sans décalage vertical. En 2001, une campagne a été menée depuis la surface, avec de la sismique réflexion HR 3D. Cette étude a permis de conclure sur la technique de sismique 3D HR : les failles dans l'argilite ayant moins de 2 m de rejets ne sont pas détectées.

Les études ont donc été complétées par des analyses de tomographie électrique, de tomographie sismique surface / ouvrage souterrain, de tomographie sismique entre ouvrages souterrains et d'une tomographie par analyse de flux de muons. La tomographie sismique permet de tester et comparer les résultats de l'étude sismique 3D. Elle est basée sur la vitesse de propagation des ondes. Les failles deviennent alors visibles car elles entraînent des contrastes de vitesse, plus faibles. C'est une méthode rapide et stable.

La propagation de courants électriques est utilisée dans les méthodes de résistivité. La résistivité est sensible à la teneur en eau et en argile. Les failles sont détectables car elles donnent un contraste de résistivité électrique, plus faible. C'est aussi une méthode de tomographie, car on obtient une carte de distribution de la résistivité dans le milieu. Les calcaires sont très résistifs, les argilites sont très faiblement résistives. Les zones de résistance plus faible observées dans les calcaires sont les zones fracturées, karstifiées.



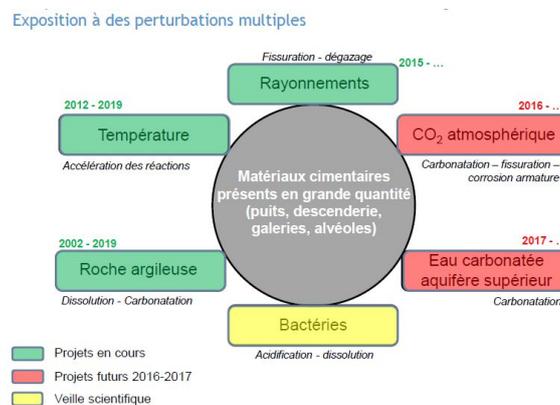
La conclusion générale était que la sismique 3D permettait de détecter des failles de 4 à 6 m de rejet vertical mais pas des failles de 2 m de rejet en argilite. A l'inverse, la tomographie sismique surface/ouvrage, et la tomographie ouvrages souterrains les détectent. La tomographie électrique met bien en évidence des zones plus ou moins résistives, et la tomographie par atténuation du flux de muons met en évidence des zones plus ou moins denses, c'est donc une méthode prometteuse.

En ce qui concerne Bure, l'IRSN avait alors demandé des compléments d'analyses en plus de la sismique 3D. Avec la 3D, des anomalies sismiques pouvant correspondre à des failles avaient été trouvées dans le Dogger (en dessous) mais pas dans le COX. Pour autant, on ne pouvait en conclure avec la seule sismique 3D qu'il n'y avait pas de failles dans le COX. L'ANDRA avait alors réalisé des forages obliques qui n'ont pas permis l'observation de failles.

Quant à l'analyse de la transmissivité des différentes failles de Tournemire, la grande faille transmet moins que la plus petite, mais il n'y a pas de façon évidente de généralisation possible.

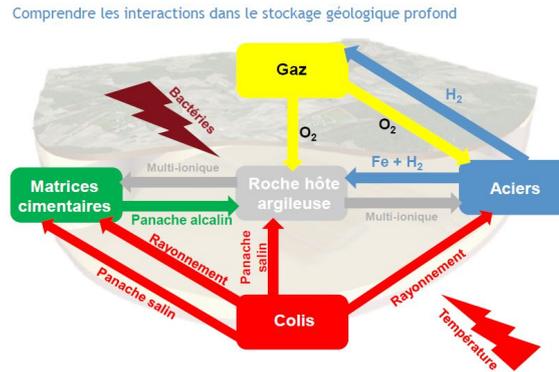
b) Interactions entre les roches argileuses et les matériaux de construction d'une installation de stockage géologique

Les alvéoles HA contiendraient de l'acier (chemisage et surconteneurs notamment) et un bouchon composé d'argile gonflante. Les alvéoles MAVL contiendraient du béton (génie civil et surconteneurs), puis un scellement en argile gonflante entre 2 massifs d'appui en béton. Le béton est une pâte poreuse, mélange de ciment / eau / granulat, le ciment lui-même est un mélange cuit à 1 200°C de calcaire / argile, contenant de la potasse et de la soude. Le béton a un pH de 13 alors que la roche est à 7. Les interactions avec la roche sont rapides, l'argile est altérée sur 2 cm après une dizaine d'années puis est altérée moins rapidement. L'interaction entre l'acier et l'eau porale conduit à la dissolution de fer et à un dégagement de l'hydrogène. L'oxygène présent lors de l'ouverture sera consommé et ensuite il y aura émission d'hydrogène (corrosion anoxique, radiolyse). Certains colis vont relâcher des sulfates et des nitrates, plus des rayonnements et de la chaleur. Il faut aussi tenir compte de la présence de bactéries. Le programme d'études de l'IRSN 2002-2019 comprend l'influence de la température et des rayonnements (à l'étude depuis 2015), l'interaction avec les ciments (avec le CO2 atmosphérique en 2016, avec l'eau carbonatée en 2017).



Le projet CEMTEX étudie plus particulièrement l'évolution des bétons au contact de l'argilite selon la température (70°C). Il a mis en évidence des différences entre les bétons : le Portland est très alcalin du fait

de la potasse, les bétons bas pH (11 seulement) entraînent une dégradation très largement plus faible mais ils ont potentiellement moins de tenue dans le temps. Étonnamment, le béton Portland est moins altéré à 70° qu'à température ambiante.



L'étude montre que la dissolution s'oppose à la carbonatation, mais la carbonatation est plus importante à 70°C, d'où cette conclusion. L'étude de l'évolution de la corrosion des métaux montre que le fer se déplace dans l'argile avec des chemins préférentiels. La corrosion se fait surtout les 2 premières années puis chute lors du passage en anoxie. Après 6 ans, l'évolution est plus ténue.

Etude OXITRAN : Dans les conditions de l'essai, l'oxygène n'est jamais totalement consommé (retour par l'EDZ) et se stabilise à 16,5 % (contre 21% dans l'air). Également, la consommation de l'oxygène par corrosion de l'acier est négligeable par rapport à la réactivité de la roche (oxydation des pyrites), cette dernière étant très dépendante de l'humidité relative.

c) Dispositif de scellement d'une installation de stockage géologique

Il existe différents types de scellements dans le projet CIGEO (scellement d'alvéole HA, d'alvéole MAVL, de galerie...). 3 paramètres sont primordiaux :

- Le noyau d'argile gonflante (bentonite 70%, + éventuellement 30% de sable), le mélange est compacté en bloc ou en pellets (granulés).
- Les massifs d'appui (béton, acier) encadrent ces noyaux et assurent le confinement mécanique qui empêche le gonflement.
- L'eau porale qui arrive in situ : la saturation est progressive, le gonflement ferme les vides mais la contrainte limite le gonflement.

Les scellements contribuent au transfert majoritairement diffusif des RN.

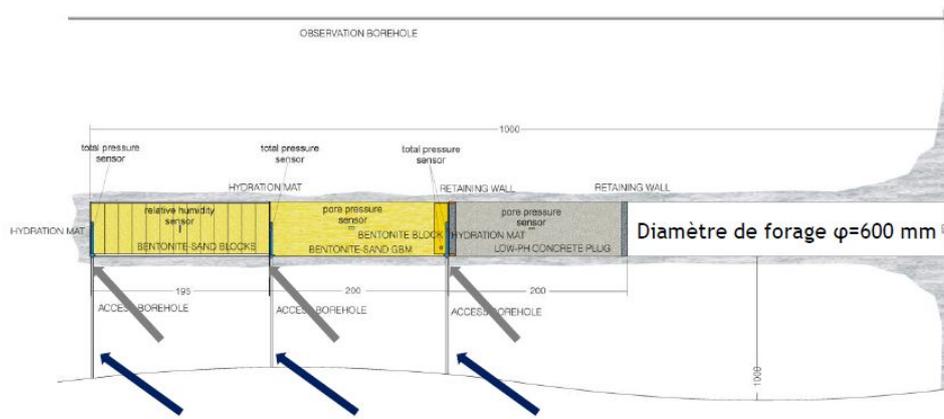
A Tournemire, il est prévu des essais in situ avec des noyaux argileux gonflants. Des maquettes de scellement ont été mises en place en 2011. Puis les essais se font en 2 à 4 phases :

- Saturation (plusieurs années)
- Essais hydrauliques (mesure de perméabilité)
- Scénario altéré, simulation de béton qui fissure et donc relâchement du confinement
- A nouveau essais hydrauliques

Des ajustements expérimentaux ont été nécessaires, les modélisations sont pertinentes. La réalisation des premiers tests hydrauliques de performance post saturation se fera courant 2016.

d) Surveillance d'une installation de stockage géologique.

En 2010, l'IRSN rappelait dans son instruction du Dossier 2009 que la sûreté est fondée sur le contrôle et la maintenance de l'installation et la réversibilité basée sur la surveillance. Le projet européen MODERN 2020 est le développement et la démonstration de stratégies et technologies de monitoring pour le stockage géologique. CIGEO est un projet particulier du fait de sa taille, son objet, sa durée d'exploitation. L'enjeu majeur est de s'assurer que le domaine de fonctionnement est correctement défini et que l'installation y demeurera. La surveillance des paramètres clés de l'installation devra permettre de s'assurer que celle-ci évolue favorablement vers l'état envisagé. La R&D porte sur les technologies de monitoring : technologie des capteurs (fiabilité, durabilité) ; énergie (stockage, production) ; transmission de l'information ; durcissement des capteurs (vieillessement).



Les premiers tests ont eu lieu en 2016 : tests avec scellements avec des noyaux de bentonite (bloc ou pellet) avec l'arrivée de 3 forages d'étude. Ces études mettent en évidence que le signal passe de moins en moins au fur et à mesure que la resaturation progresse.