



Invitation à la

Séance Technique du 17 mars 2016

La mécanique des roches dans les laboratoires de recherche souterrains (URL)

CNAM, 292 rue St-Martin, 75003 Paris (métro : Réaumur-Sébastopol)

(Entrée libre et gratuite)

- 14 : 00** **Accueil des participants** : *Présidents de l'AFTES et du CFMR*
- 14 : 10** **Introduction à la thématique** : *Gilles Armand (Andra)*
- 14 : 20** **Exploration du comportement hydromécanique des fractures et des failles dans les laboratoires souterrains**
Yves Guglielmi, Lawrence Berkeley National Laboratory (USA)
- 15 : 50** **Pourquoi et comment évolue la recherche en site souterrain ?**
Michel Zampalo, Laboratoire Souterrain de Modane, CRNS
- 15 :20** **Pause**
- 15: 40** **Le comportement géotechnique de l'Argile à Opalinus – Retour sur 20 ans d'expérience au laboratoire souterrain du Mont Terri**
David Jaeggi, Paul Bossart, Christophe Nussbaum, Swisstopo
- 16 : 10** **Les essais de scellement (SEALEX) en cours au laboratoire souterrain de Tournemire**
Jean-Dominique Barnichon, IRSN
- 16 : 40** **Apport du Laboratoire souterrain de Meuse Haute Marne pour la compréhension du comportement hydromécanique des ouvrages souterrains dans les argilites**
Gilles Armand, Jad Zghondi, Hipolyte Djizanne, Nathalie Conil, Rémi de La Vaissière, Frédéric Bumbieler, Laurence Richard-Panot, Jean-Michel Bosgiraud, Andra
- 17 : 10** **Discussions**
- 17 : 30** **Fin de la séance**



Exploration du comportement hydromécanique des fractures et des failles dans les laboratoires souterrains

Yves Guglielmi , *Lawrence Berkeley National Laboratory (USA)*

Depuis une décennie, les observations, les expériences et les développements d'instruments conduits dans les environnements souterrains dans le monde entier (mines et laboratoires de recherches souterrains) ont permis d'étudier la physique des zones de failles et de fractures à une échelle intermédiaire entre celle du laboratoire (cm) et l'échelle crustale (> km). Une nouvelle technologie permet de monitorer le tenseur de déplacement des parois d'un forage, la pression et le débit d'injection pendant un test hydraulique réalisé dans un intervalle centré sur une fracture. Nous montrons comment les signaux de déplacement peuvent être inversés pour évaluer les propriétés hydromécaniques et les variations de friction in situ des fractures associées aux variations d'états de contraintes effectives. A l'échelle décimétrique de ces tests, la perméabilité des fractures apparaît autant sensible au déplacement tangentiel qu'à l'ouverture normale des épontes. Les variations dynamiques de friction avec la vitesse de déplacement semblent pouvoir être décrites avec une précision raisonnable selon les concepts de « *rate and state* » développés à l'échelle centimétrique en laboratoire. La technologie est ensuite appliquée à suivre les mouvements d'une faille lors d'une expérience de stimulation hydraulique. La zone de faille (*Main Fault*) qui affecte les formations argileuses du laboratoire de recherche souterrain du Mont Terri (Suisse) est prise pour exemple. Dans les conditions actuelles de contraintes statiques du laboratoire souterrain, la faille est considérée comme très peu perméable. Les variations du tenseur de déplacement produites par des augmentations de pressions dans différents intervalles de forage situés à travers la zone de faille ont permis d'évaluer la potentielle réactivation de la perméabilité de la zone de faille. Deux comportements hydromécaniques contrastés sont observés: pas de variation de perméabilité dans les faciès broyés du cœur de faille (faciès « *scaly clay* ») et augmentation d'un facteur 10-à-1000 de perméabilité dans les zones fracturées (zones endommagées de la faille). Ces variations transitoires de perméabilité sous contrainte correspondent à une réponse mécanique principalement élastique, pour de faibles déformations (micro à milli-déformations). Le retour à la perméabilité initiale se produit en quelques dizaines de secondes.

Quand une pressurisation poro-élastique se produit dans la zone endommagée, il est observé un glissement inélastique >1 millimètre selon le plan de faille principal situé à la limite entre la zone de cœur et la zone endommagée. Ce résultat tend à prouver que la migration des fluides dans une zone de faille peut être découplée du glissement, en particulier si la faille n'est pas favorablement orientée par rapport aux contraintes de Coulomb. Ces résultats prometteurs montrent l'intérêt de ces expériences d'activation de faille menées dans les laboratoires souterrains pour mieux comprendre les processus d'activation des failles dans la croûte superficielle. Les expériences montrent que le glissement sur une faille peut induire aussi bien une augmentation qu'une diminution de sa perméabilité à cause des interactions complexes entre les différentes unités structurales de la zone de faille. Les prédictions demeurent donc difficiles. Cependant, il apparaît qu'une



faille coupant un ouvrage souterrain n'a pas besoin d'être activée (c'est-à-dire qu'elle n'a pas besoin de glisser de façon instable en produisant ou non de la sismicité) pour que sa perméabilité varie de façon significative. Ceci souligne aussi une des applications potentiellement importante de ces études à l'amélioration de la connaissance de la perte d'intégrité hydrogéologique des ouvrages souterrains.

Pourquoi et comment évolue la recherche en site souterrain ?

Michel ZAMPAOLO, Directeur technique Laboratoire Souterrain Modane -CNRS

Depuis 30 ans, les chercheurs du monde entier se tournent de plus en plus vers des sites souterrains profonds pour conduire leurs travaux, d'abord en physique fondamentale et maintenant dans des domaines où les enjeux sociétaux sont plus concrets : sédimentologie, glaciologie, biologie, électronique... Dans ces domaines, on recherche un environnement très faiblement radioactif pour améliorer la sensibilité des appareils de mesures. L'avenir de ces recherches est peut-être sous terre.

Le comportement géotechnique de l'Argile à Opalinus – Retour sur 20 ans d'expérience au laboratoire souterrain du Mont Terri

David Jaeggi, Paul Bossart, Christophe Nussbaum, Swisstopo

Cette année, le laboratoire souterrain du Mont Terri et le projet Mont Terri fêtent leurs 20 ans d'existence. La connaissance des propriétés mécaniques des roches est très importante pour la construction des galeries et des niches du laboratoire du Mont Terri, mais également pour répondre aux exigences de sécurité élevées d'un futur stockage de déchets radioactifs à une profondeur de 400 à 900 m. Dès les débuts en 1996, des échantillons ont été recueillis afin de déterminer en laboratoire les propriétés mécaniques de la roche, en particulier ses paramètres d'élasticité, tels que le coefficient de Poisson, le module de Young et la résistance à la compression. Les propriétés de l'Argile à Opalinus, matériau transverse isotrope, dépendent fortement de l'orientation des contraintes. D'autre part, le dessèchement du matériel modifie ses propriétés géotechniques, en augmentant par exemple sa résistance à la compression. Parmi les autres propriétés importantes de l'Argile à Opalinus, citons encore la capacité de gonflement, une faible perméabilité hydraulique et un comportement non linéaire, variable en fonction du temps. Du fait de ces propriétés particulières, la prise d'échantillons, leur conditionnement et en définitive tout le protocole d'expérience doit être adapté et constamment amélioré. En plus des essais en laboratoire, des expériences in-situ ont été réalisées en utilisant des méthodes de décompression et de fracturation hydraulique. Ces expériences in-situ ont montré qu'il existe une claire dépendance non seulement aux méthodes utilisées, mais aussi au positionnement du site dans les galeries et à la rigidité de la roche. Des investigations sismiques et géoélectriques ont permis d'analyser les hétérogénéités sédimentaires et tectoniques, ainsi que l'étendue de l'EDZ. La visualisation de l'EDZ et de sa géométrie autour des galeries, mais également autour de forages, est obtenue par imprégnation de résine, une méthode dont swisstopo a poursuivi le développement. Cette méthode a également été appliquée avec succès sur le site de Bure, géré par l'Andra, partenaire du laboratoire souterrain du Mont Terri. Diverses campagnes ont permis d'étudier au Mont Terri des failles induites par les contraintes, mais aussi par l'anisotropie du matériau. Les recherches récentes par forages horizontaux ont montré que la



réorganisation des contraintes autour des cavités creusées dans l'Argile à Opalinus conduit en quelques heures à la formation de joints de cisaillement tangentiel orientés parallèlement à l'anisotropie de la roche. Ces derniers développent ensuite une zone de buckling. Outre ces expériences, d'intenses travaux de mensuration et de surveillance ont lieu dans le laboratoire souterrain. Ainsi des mesures périodiques de fils d'invar et de convergence tridimensionnelle sont menées. Le comportement à long terme des galeries est aussi documenté par de nombreuses stations de mesures des déformations, telles que des extensomètres et inclinomètres, implantées dans des forages et à la surface terrestre. La pression d'eau interstitielle et la température sont encore mesurées, principalement lors des expériences de chauffage et les tests de Mine-by, afin de mieux comprendre les processus de couplage thermo-hydro-mécanique. A l'aide de ces données quantitatives, les modèles numériques prévisionnels sont constamment améliorés. Des modèles constitutifs spécialement développés pour les roches argileuses, tels que le modèle SUBI (bilinear strain-hardening/softening ubiquitous-joint) d'Itasca ou le modèle APD (anisotropy-plasticity-damage) de l'EPFL, nouvellement implanté dans le Code_ASTER d'Edf, sont aujourd'hui des outils importants pour obtenir des prévisions numériques fiables.

Les essais de scellement (SEALEX) en cours au laboratoire souterrain de Tournemire

Jean Dominique Barnichon, IRSN

Les ouvrages de fermeture (scellements) d'un stockage géologique de déchets radioactifs sont des composants importants pour la sûreté à long terme. Le projet SEALEX mené par l'IRSN, comprend une série d'essais in situ mis en œuvre dans le laboratoire souterrain de Tournemire. Ces essais de terrain ont par ailleurs été complétés par un programme d'essais en laboratoire de surface, ayant servi de base dimensionnement et d'interprétation. Les principaux résultats acquis à ce jour seront présentés, avec les modélisations et interprétations associées.

Apport du Laboratoire souterrain de Meuse Haute Marne pour la compréhension du comportement hydromécanique des ouvrages souterrains dans les argilites

G Armand, J Zghondi, H Djizanne, N Conil, R de La Vaissière, F Bumbieler, L Richard-Panot, J-M Bosgiraud, *Andra*

L'agence nationale de gestion des déchets radioactifs (Andra) est en charge des études sur le stockage géologique et s'est focalisé depuis 2000 sur le site de Meuse/Haute Marne, avec notamment la construction à 500 mètres de profondeur d'un Laboratoire de recherche souterrain sur la commune de Bure, au cœur de la formation argileuse du Callovo-Oxfordien envisagée comme roche hôte du stockage.

Après le rapport déposé en 2005 et à l'évaluation des résultats obtenus, le Parlement français a retenu dans la loi de 2006 la mise en œuvre du stockage géologique profond pour la gestion à long terme des déchets haute activité vie longue (HA) et moyenne activité vie

longue (MA-VL), ajoutant une exigence de réversibilité sur au moins 100 ans pour ce stockage.

Depuis, l'Andra a continué les études de faisabilité et de conception permettant la préparation d'une demande d'autorisation de création du stockage géologique Cigéo (centre industriel de stockage géologique) qui comprendra de nombreux ouvrages souterrains (puits, descenderies, galeries, alvéoles de stockage,...). Par comparaison avec des ouvrages souterrains classiques de génie civil (tunnel routier ou ferroviaire), ceux de Cigéo présentent des caractéristiques spécifiques, sur deux plans distincts :

- Sur le plan de la sûreté du stockage à long terme (après fermeture) : la construction, l'exploitation, et de manière générale l'évolution de ces ouvrages dans le temps, doivent préserver les propriétés favorables du Callovo-Oxfordien vis-à-vis du confinement des radionucléides : il s'agit notamment de limiter l'endommagement de la roche en champ proche des ouvrages ;
- Sur le plan opérationnel durant la période d'exploitation : la durée de vie des ouvrages sera longue, d'ordre séculaire, durée d'exploitation de Cigéo et la jouvence de certains ouvrages, en particulier des alvéoles de stockage, sera réduite durant cette période.

Afin de répondre aux besoins et spécificités présentées ci-dessus, dès la construction du Laboratoire souterrain en 2000, l'Andra a mis en œuvre un programme d'études sur le comportement (thermo-hydro)mécanique des argilites du Callovo-Oxfordien et de manière couplée les techniques de creusement et de soutènement/revêtement des ouvrages. L'objectif visé était en particulier de maîtriser les interactions roche/structure, ce qui supposait une bonne compréhension des comportements de la roche et de la structure, mais aussi de la méthode de mise en œuvre de la structure. Cela concerne tout particulièrement les conditions de mise en place et la qualité de l'interface entre la structure et la roche, en lien avec la méthode de creusement et le type de structure (béton projeté, voussoirs avec injection en extradados...).

Après plus de dix ans d'études, un point est fait sur les essais réalisés et les principaux résultats obtenus grâce au Laboratoire de Recherche souterrain de Meuse/Haute Marne, dans le domaine du comportement des ouvrages souterrains dans le Callovo-Oxfordien.