

**Comité Français de Mécanique des Roches
Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain**



CFMR

Le secrétaire général
Siavash Ghabezloo
Email : secretaire-general@cfmr-roches.org



**Séance technique CFMR-AFTES :
Ouvrages souterrains à grande profondeur**

Organisée par Gilles ARMAND (ANDRA) et Didier SUBRIN (CETU)

Jeudi 13 juin 2019, à 14h00

CNAM, 2, rue Conté, 75003 Paris

Amphi Gaston Planté (accès 35)

Entrée libre

14 : 00 Accueil des participants et informations CFMR-AFTES

Jean SULEM, Président du CFMR, et Michel DEFFAYET, Président de l'AFTES.

14 : 10 Introduction à la séance

Gilles ARMAND (ANDRA) et Didier SUBRIN (CETU).

14 : 15 Principaux enjeux des tunnels profonds

Michel DEFFAYET (CETU) et Jean SULEM (ENPC).

14 : 45 Retour d'expérience sur la conception et la réalisation des ouvrages souterrains du site de St-Martin-la-Porte

Adrien SAITTA, Jacques TRICLOT (EGIS) et Eric MATHIEU (EIFFAGE).

15 : 15 Retour d'expérience sur la conception et la réalisation de la galerie de reconnaissance de La Maddalena au tunnelier en roche dure

Enrico FORNARI (GEODATA).

Pause

16 : 00 Applications d'éléments compressibles HiDCon® dans le soutènement d'ouvrages souterrains à fortes convergences

Patrick STEINER et Aurélien NOIRET (SOL EXPERTS).

16 : 30 La faisabilité technologique et le comportement mécanique de différents types de soutènement/revêtement testés au Laboratoire souterrain de recherche de Meuse/Haute-Marne pour le projet Cigéo

Jad ZGHONDI, Gilles ARMAND, Frédéric PLAS et Jean-Michel BOSGIRAUD (ANDRA).

17 : 00 Discussion

17 : 30 Fin de la séance

Principaux enjeux des tunnels profonds

Michel Deffayet, Centre d'Etudes des Tunnels

Jean Sulem, Laboratoire Navier-CERMES, Ecole des Ponts ParisTech, IFSTTAR, CNRS, Univ. Paris-Est

Le développement des réseaux de communication rapide impose des axes de transport performants à haut niveau de service qui s'affranchissent des obstacles topographiques. Les tunnels longs et profonds sont un des principaux éléments de réponse, d'autant plus que les solutions de creusement mécanisé les rendent aujourd'hui réalisables en des durées acceptables. Les ouvrages profonds répondent aussi à d'autres enjeux comme le stockage et le confinement à long terme.

La réalisation de ces ouvrages présente des spécificités techniques, organisationnelles, contractuelles multiples que le retour d'expérience permet progressivement de cerner. Pour mieux appréhender les projets à venir, la communauté professionnelle nationale et internationale s'est saisie de ces questions et avance à la fois sur les aspects opérationnels, et en liaison avec les centres de recherche, sur les travaux de recherche et de mise au point d'outils pour la conception et le dimensionnement des ouvrages.

Dans le domaine des tunnels à grande profondeur, les principales avancées récentes des travaux de recherche ont porté sur le développement de lois de comportement adaptées à la complexité des terrains rencontrés et leur implémentation dans les codes de calcul numériques. La prise en compte du comportement non linéaire, anisotrope et différé du massif, de la fracturation pré-existante et/ou induite, des couplages hydromécaniques, de la méthode d'excavation (traditionnelle ou mécanisée) et de soutènement constituent des enjeux majeurs de la modélisation numérique afin de réaliser des prédictions fiables de la réponse des ouvrages excavés dans des situations complexes (terrains poussants ou gonflants, zones de failles...).

Le développement de ces modèles numériques permet de prendre en compte les mécanismes physiques complexes mis en jeu et d'en évaluer l'importance relative dans le but de proposer des modèles simplifiés basés sur des solutions semi-analytiques et des relations empiriques pour améliorer les méthodes de dimensionnement existantes. Ils permettent aussi la constitution de bases de données de simulations qui pourront être associées à des bases de données d'auscultation des ouvrages pour la construction d'outils de dimensionnement et d'aide à la décision basés sur la science des données et l'intelligence artificielle.

Retour d'expérience sur la conception et la réalisation des ouvrages souterrains du site de St-Martin-la-Porte

Eric MATHIEU, EIFFAGE

Jacques TRICLOT, Adrien SAITTA, EGIS

Dans le cadre de la construction de la section transfrontalière du Lyon-Turin, plusieurs chantiers de reconnaissances ont été réalisés. Le site de Saint-Martin-La-Porte a connu plusieurs phases depuis 2003 avec la construction d'une première descenderie de 2350 mètres de longueur qui a rejoint l'axe du futur tunnel de base après avoir reconnu les terrains fortement convergents de la zone houillère briançonnaise.

Une deuxième phase de reconnaissances complémentaires a été lancée depuis 2016 afin de mieux connaître les conditions de creusement dans ce secteur au niveau du futur tunnel de base. Elle est globalement décomposée en deux parties :

- une première partie permettant de reconnaître les conditions géologiques rencontrées (et les difficultés d'exécution associées) dans l'axe du tunnel de base entre les descenderies de Saint-Martin-La-Porte et la Praz. Un tunnelier creuse actuellement ce linéaire d'environ 9km sous une couverture

variant de 600 à 1200m dans l'axe du tunnel sud. Ce chantier a nécessité la réalisation d'une chambre de montage à Saint-Martin-La-Porte et une chambre de démontage à La Praz

- une deuxième partie a pour objet de reconnaître la zone du houiller fortement convergente au niveau du tunnel de base sur environ 1000m. L'excavation du tunnel sud est actuellement réalisée dans ces terrains en méthode conventionnelle en utilisant les retours d'expérience du creusement de la descenderie de Saint-Martin-La-Porte. Dans le cadre de cette partie du chantier, une galerie complémentaire d'environ 1800m a été préalablement creusée depuis la descenderie vers l'Ouest.

Cette présentation se concentre principalement sur la deuxième partie du chantier réalisée en méthode conventionnelle. Après avoir présenté la géologie rencontrée, le bilan des reconnaissances effectuées, il est proposé de décrire les méthodes d'exécution et le phasage retenus dans ces terrains fortement convergents du houiller excavés au niveau du tunnel de base. La présentation met l'accent sur la démarche observationnelle mise en œuvre à cette occasion, principalement issue du retour d'expériences du creusement de la descenderie, en soulignant les difficultés rencontrées pour maîtriser et accompagner les déformations conséquentes du massif rocheux dans ces conditions.

Retour d'expérience sur la conception et la réalisation de la galerie de reconnaissance de La Maddalena au tunnelier en roche dure (Lessons learned from design and excavation through hard rock of the "La Maddalena" exploratory adit)

Enrico Fornari – Geodata Engineering S.p.A.

The Turin-Lyon high-speed rail project includes a 57.5km-long twin-tube tunnel crossing at base level the Alp mountains between Italy and France. Base tunnel design uses data collected from four exploratory adits, of which three in France, completed in 2010, and one in Italy named "La Maddalena" in the Susa Valley, completed in 2017. Apart from investigation purposes for base tunnel design, these four adits will also be used during base tunnel construction and operation. La Maddalena, so far dedicated to data collection on rock and tunnelling behaviour, will next serve for construction of the Clarea safety cavern and, finally, for safety and maintenance access to the main tunnel.

Except for the initial 200 m excavated by conventional tunnelling methods, the 7.02 km-long adit was excavated using a 6.3 m-diameter main beam TBM, reaching a maximum overburden of over 2,000 m under the Ambin mountain slopes where rock mass temperatures reached 50°C and air cooling was necessary to create an acceptable working environment. The experience well met the original target of investigating rock mass geomechanical parameters and behavior, including determination of rockburst hazard in the Ambin complex and definition of suitable tunnel profile supports to optimize production while assuring safety for workers near the tunnel face.

The tunnel was excavated through gneiss and mica schists, for almost the whole length equally divided between Bieniawski classes II and III (good to fair rock). Stress release effects started at relatively low overburden (less than 400m), when the excavated unsupported rock cavity's stand-up time began to be systematically shorter than that usually experienced (Bieniawski 1989). These stress release effects often brought excavation to proceed with relatively low TBM thrust on the face and with brittle failure causing break-off of rock blocks from the face and formation of broken rock at tunnel crown and invert. Even with exceptionally high overburden (2,000+ m), highly dilatant brittle rock fracturing continued to accompany excavation until tunnel completion, on one occasion recording an explosion with loud bang which caused large deformations of the steel rib supports. However, the failure mechanism, at La Maddalena, was always associated with low kinetic energy (bulking without rock ejection).

Production safely proceeded to the end with installation of circumferential steel ribs connected with 120° arch of longitudinal steel re-bars, a solution which, as soon as adopted, abruptly increased efficiency of tunnel excavation by drastically reducing TBM stops for clean-up and removal of rock fragments from brittle failure.

Applications d'éléments compressibles HiDCon® dans le soutènement d'ouvrages souterrains à fortes convergences

Patrick Steiner et Aurélien Noiret (SOLS EXPERTS)

Cette présentation porte sur l'historique du développement de la technique de soutènement souple depuis le premier projet en 2004 pour le tunnel de base du Lötschberg. Les possibilités d'ajustement des seuils de contraintes et des formes seront présentées au travers de différentes applications : la reprise du soutènement dans des anhydrites gonflantes au tunnel du Chienberg en Suisse, le creusement avec une technique de congélation de galeries de la mine d'uranium de Cigar Lake au Canada et pour la conception de bouchons de galeries souples pour l'expérience Praclay au laboratoire de Mol.

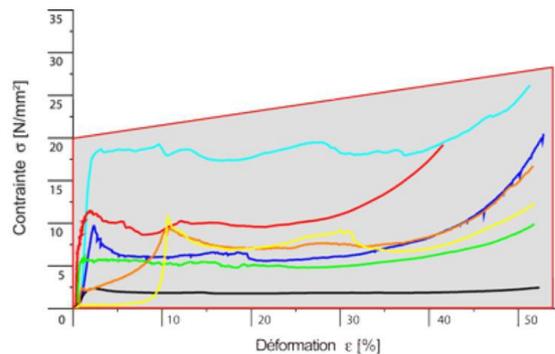


Figure 1 : Différents seuils de contraintes ajustables des cales compressibles hiDCon®

La présentation évoquera également les derniers développements en terme de soutènements par cintres acier à jonctions souples : hiDSte®. Ces soutènements permettent d'obtenir un soutènement souple directement au niveau des jonctions de cintres acier et de travailler ainsi en convergence contrôlée dès la pose des cintres et en lien avec les cales compressibles hiDCon®.

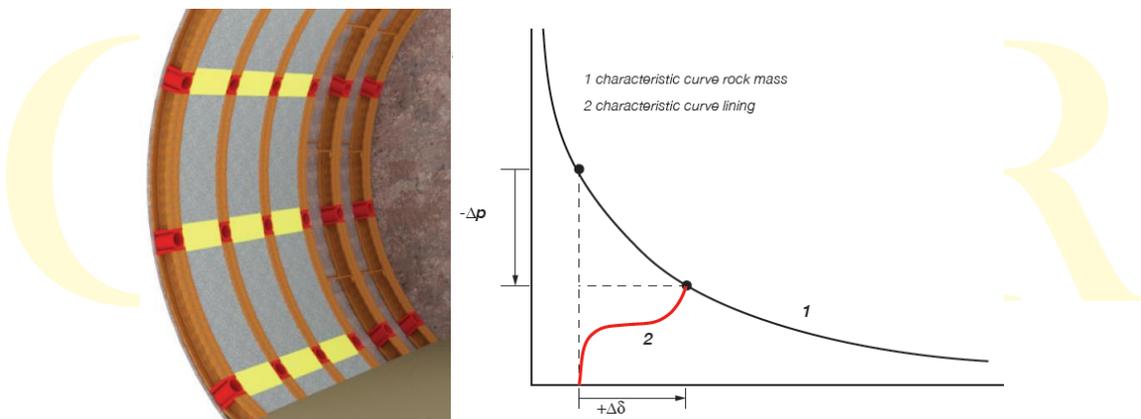


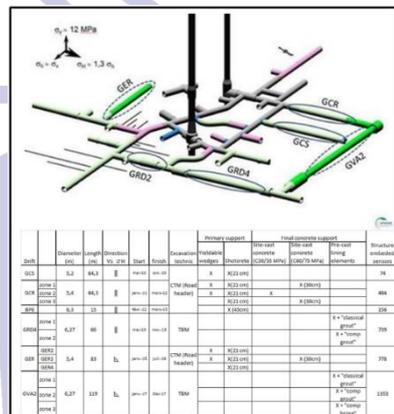
Figure 2 : Caractéristiques des systèmes hiDSte®

La faisabilité technologique et le comportement mécanique de différents types de soutènement/revêtement testés au Laboratoire souterrain de recherche de Meuse/Haute-Marne pour le projet Cigéo

Jad ZGHONDI, Gilles ARMAND, Frédéric PLAS (ANDRA, Direction de la R&D)

Jean-Michel BOSGIRAUD (ANDRA, Direction de l'Ingénierie)

Depuis 2004, dans le cadre du développement progressif et incrémental du Laboratoire souterrain de recherche de Meuse/Haute-Marne situé à environ 500 m de profondeur dans la formation du Callovo-Oxfordien et réalisé en support au projet Cigéo de stockage de déchets radioactifs, l'Andra a mené un vaste programme d'essais de méthodes d'excavation (traditionnelle et mécanisée) et de soutènement/revêtement (béton projeté ou béton coulé en place avec et sans cales compressibles, voussoirs traditionnels, voussoirs compressibles). Ces essais ont été conduits suivant les directions des deux contraintes principales horizontales (majeure σ_H et mineure σ_h) et pour des diamètres de galerie de plus en plus importants (de 4 m initialement jusqu'à environ 9 m aujourd'hui).



Cette démarche expérimentale systématique et complète s'entend vis-à-vis de la démonstration de la robustesse et de l'optimisation des technologies de creusement et de soutènement/revêtement qui seront retenues pour les différents ouvrages de Cigéo (galeries et alvéoles de stockage de déchets MA-VL de moyenne activité à vie longue), afin de satisfaire leurs fonctions, plus particulièrement leur tenue mécanique sur la période d'exploitation séculaire de Cigéo et dans le cadre de la réversibilité.

Après 15 ans de travaux, 2 km de galerie creusées et 11 expérimentations dédiées aux soutènements/revêtements, l'Andra dispose aujourd'hui d'une exceptionnelle base de connaissances en termes de faisabilité technologique et de comportement mécanique des ouvrages vs différentes méthodes de creusement et de soutènement/revêtement, en support à la demande d'Autorisation de création de Cigéo à l'horizon 2020.

Les galeries du Laboratoire souterrain ont d'abord été creusées avec la méthode traditionnelle (CTM), par passe (découvert) métrique, avec la mise en place d'un soutènement comprenant à minima un boulonnage radial et du béton projeté, puis ultérieurement la mise en place d'un revêtement en béton coulé en place (béton dont différentes caractéristiques ont été testées).

A partir de 2014, la méthode mécanisée de creusement avec un tunnelier (TBM) et la pose de voussoirs en béton a été testée avec succès dans la direction de la contrainte principale horizontale majeure, avec des variantes du matériau de clavage revêtement/roche concernant son comportement mécanique (« rigide » et « souple »). Par ailleurs, afin de permettre au couple soutènement/ revêtement de satisfaire plus encore la tenue mécanique des galeries et alvéoles de stockage de déchets MA-VL sur une durée séculaire, l'Andra a testé et/ou développé des « éléments compressibles » intégrés aux structures béton du soutènement et/ou revêtement. Par leur grande déformation plastique quasi parfaite, ces éléments compressibles permettent de fortement « limiter » (différer) les chargements de la roche sur la structure en béton.

Les données d'une part de caractérisation de la roche en champ proche des ouvrages avant et après leur creusement, plus particulièrement la zone endommagée mécaniquement, et d'autre part des instrumentations hydromécaniques (contraintes, déformations, pression d'eau, état de saturation en eau) dans la roche et les soutènements/revêtements ont permis de bien comprendre le comportement de la roche et des structures dans le temps et, de valider/calibrer différents modèles de comportement mécanique de la roche et des couples soutènement/revêtement-roche. Les données acquises montrent ainsi une cohérence et une similitude du comportement mécanique de la roche et des structures quelles que soient les méthodes de creusement et de soutènement/revêtement, mais aussi les rôles importants du caractère plus ou moins souple/rigide du revêtement/soutènement et de l'orientation de l'ouvrage suivant les directions des contraintes principales horizontales.

Cet exposé présente la démarche incrémentale de test des différents soutènement/revêtement dans le Laboratoire souterrain de recherche de Meuse/Haute-Marne, les instrumentations, les principaux comportements observés et les enseignements tirés pour la demande d'autorisation de création du projet Cigéo.