

ANALYSE ET COMPARAISON DES AUSCULTATIONS DU TUNNEL ROUTIER DU FREJUS ET DE SA GALERIE DE SECURITE

ANALYSIS AND COMPARISON OF THE MEASUREMENTS OF FREJUS ROAD TUNNEL AND OF ITS SAFETY GALLERY

Manuel DE LA FUENTE^{1,2}, Jean SULEM¹, Reza TAHERZADEH², Didier SUBRIN⁴

¹ Laboratoire Navier/CERMES, Ecole des Ponts ParisTech, IFSTTAR, CNRS, Université Paris-Est, 77455 Marne la Vallée, France

² Tractebel Engie, 5 Rue du 19 Mars 1962, 92622 Gennevilliers, France

³ Centre d'Etudes des Tunnels (CETU), 25 Avenue François Mitterrand, 69674 Bron Cedex 1, France

RÉSUMÉ – Le tunnel du Fréjus et sa galerie de sécurité constituent un exemple intéressant de deux tunnels parallèles creusés en terrain poussant avec des techniques d'excavation et de soutènement différentes. Cet article montre le calage des mesures de convergence du tunnel routier du Fréjus par rétro-analyse numérique avec un modèle viscoplastique anisotrope. Les résultats du calage peuvent être utilisés dans la simulation numérique de la galerie de sécurité.

ABSTRACT – Fréjus road tunnel and its safety gallery exhibit an interesting configuration of two parallel tunnels excavated in squeezing ground with different excavation methods. The focus of the paper is on the calibration of a visco-plastic anisotropic constitutive model thanks to a numerical back-analysis based on the convergence measurements of Fréjus road tunnel. The information obtained from the study of the road tunnel can be used in the numerical simulation of the safety gallery.

1. Introduction

Un comportement « poussant » est caractérisé par de larges déformations différées, souvent anisotropes, durant et bien après l'excavation d'un tunnel (Barla, 1995).

Le type de soutènement mis en place ainsi que la méthode de creusement employée ont une influence importante sur le comportement poussant. Dans les tunnels creusés en méthode conventionnelle, un soutènement souple mis en place avant le revêtement définitif peut être adapté pour accompagner les convergences du terrain et chercher à minimiser les efforts à long terme dans le revêtement pour en assurer la pérennité. Dans le cas des tunnels creusés au tunnelier, la géométrie de la section est fixée au démarrage des travaux et en conséquence, les déformations du terrain sont plus difficilement maîtrisées en cours d'excavation. En effet, le blocage rapide du terrain par des voussoirs rigides peut générer des contraintes plus importantes par rapport aux revêtements classiques placés quelques mois après le creusement en méthode conventionnelle.

Le tunnel routier du Fréjus a été creusé dans les années soixante-dix en méthode conventionnelle dans un terrain poussant. La galerie de sécurité, parallèle au tunnel routier, a été creusée au tunnelier entre 2009 et 2016. Le comportement du terrain poussant a été étudié par l'analyse des données de convergences obtenues lors du creusement du tunnel routier pendant quelques mois avant la mise en place du revêtement définitif. Ces auscultations nous montrent les effets de l'avancement du front d'excavation ainsi que du comportement différé du terrain.

Les mesures de convergence du tunnel routier sont calées à l'aide d'une loi de comportement de type visco-élasto-plastique anisotrope.

2. Le tunnel routier du Fréjus et sa galerie de sécurité

Le tunnel routier du Fréjus a été excavé sur une longueur de 12.87 km avec une section type en fer à cheval et une distance entre piédroits de 11,6 m. Le tunnel relie Modane en France à Bardonnèche en Italie et il suit une orientation Nord-Sud. Il a été creusé à l'explosif sous le pic du Fréjus (3.019 m) et il présente une couverture moyenne de 1000 m et une couverture maximale de 1800 m. Le tunnel a été soutenu avec des boulons radiaux à ancrage ponctuel avant l'installation à environ 600 m du revêtement définitif. La vitesse d'avancement moyenne a été de 5,6 m/jour (Levy et al., 1981, Sulem, 2013).

La réglementation concernant la sécurité dans les tunnels a conduit à excaver une galerie de sécurité parallèle au tunnel routier existant. Elle a été creusée en grande partie au tunnelier et se trouve à 50 m (entre axes) du tunnel routier existant. Cette galerie sera également ouverte à la circulation. Il s'agit d'un tunnel avec une section circulaire d'un diamètre de 9,5 m. Le soutènement est constitué d'anneaux en béton de 40 cm d'épaisseur. La vitesse d'avancement moyenne est de 12,9 m/jour.

Les deux ouvrages traversent principalement des calcschistes qui présentent une schistosité orientée parallèlement à l'axe du tunnel avec un pendage moyen de 45° vers l'Ouest. Ces calcschistes sont le résultat d'un métamorphisme léger de marnes et de marnes limoneuses qui entraîne la formation de minéraux phylliteux (muscovite, chlorite) et de graphite (Panet, 1996).

3. Etude des auscultations réalisées pendant le creusement

3.1. Etude des auscultations réalisées dans le tunnel routier du Fréjus

Les données disponibles dans le tunnel routier proviennent notamment de la convergence mesurée sur 127 sections du tronçon français lors de son creusement.

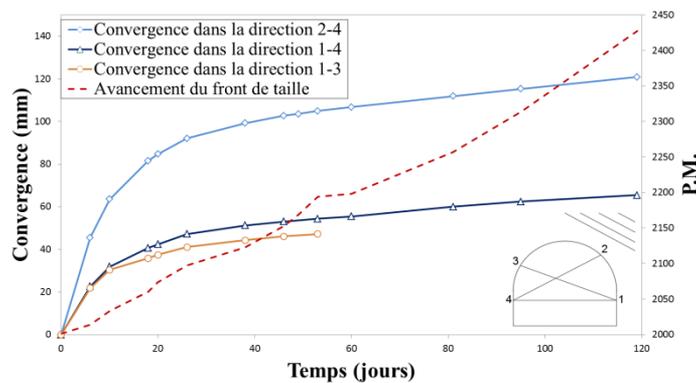


Figure 1. Courbe de convergence en fonction du temps et schéma de distribution des plots dans la section 13 (PM 1998)

Une étude très détaillée des auscultations effectuées dans le tunnel routier a été réalisée par De la Fuente et al. en 2017. La Figure 1, montre l'allure typique des courbes de convergence. La convergence de plus grande amplitude a lieu généralement dans la direction définie par les plots 2 et 4. Cette mesure est réalisée à peu près perpendiculairement à la schistosité. Le comportement du tunnel dans cette direction est marqué par la rupture par flambement des bancs de schistes qui sont tangents à la paroi en rein Ouest.

La loi semi-empirique proposée par Sulem et al. (1987), est employée dans l'analyse des données de convergence du tunnel routier.

$$C(x, t) = C_{\infty x} \left[1 - \left(\frac{X}{x + X} \right)^2 \right] \left\{ 1 + m \left[1 - \left(\frac{T}{t + T} \right)^n \right] \right\} \quad (1)$$

Les paramètres de la loi sont : $C_{\infty X}$ – convergence obtenue dans le cas d'une vitesse d'avancement infinie, X – paramètre lié à la distance d'influence du front d'excavation et à l'extension de la zone décomprimée autour du tunnel, T – paramètre relié aux propriétés différées du terrain, m – paramètre qui exprime la relation entre la convergence à court terme et la convergence à long terme, n – constante prise généralement égale à 0,3.

Par le calage des données de convergence avec cette loi, il est possible de connaître la convergence totale $C_{\infty X}(1 + m)$ et la convergence instantanée $C_{\infty X}$ en chaque section. Quatre zones « homogènes » ont été identifiées en fonction de la convergence instantanée dans la direction 2-4 (Fig. 2).

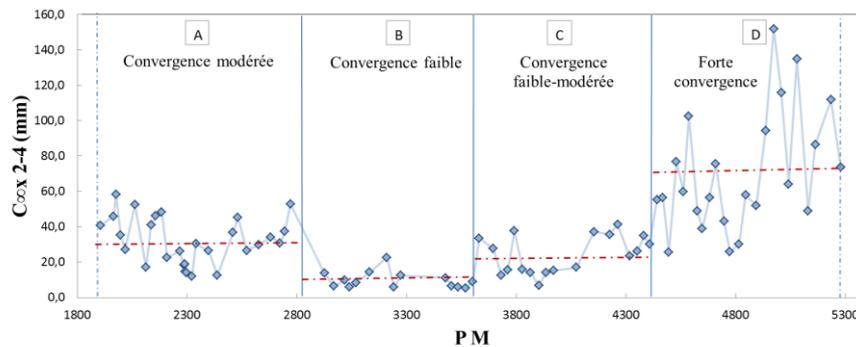


Figure 2. Evolution du paramètre $C_{\infty X}$ en fonction du P.M. La valeur moyenne dans chaque zone « homogène » est indiquée en pointillées ($X = 10,5$ m, $m = 4.5$ et $n = 0.3$ pour toutes les sections avec T variant entre 0,5 et 5 jours) (De la Fuente et al., 2017)

3.2. Etude des auscultations réalisées dans la galerie de sécurité

Pendant le creusement de la galerie de sécurité, une importante campagne de surveillance a été réalisée et les mesures suivantes ont été effectuées : des mesures de convergence à l'intrados des anneaux en béton, des mesures de convergence du terrain le long de la jupe du tunnelier réalisées avec des tiges télescopiques radiales qui mesurent la distance entre le terrain et la jupe, des mesures provenant des jauges extensométriques noyées dans le béton des voussoirs de 49 sections, des mesures de fissuration dans les voussoirs et d'autres mesures liées à l'avancement du tunnelier comme l'effort de poussée et le couple sur la roue de coupe. Par exemple, la Figure 3 montre la position des jauges extensométriques dans l'anneau 1821 ainsi que l'évolution des déformations avec la distance au front.

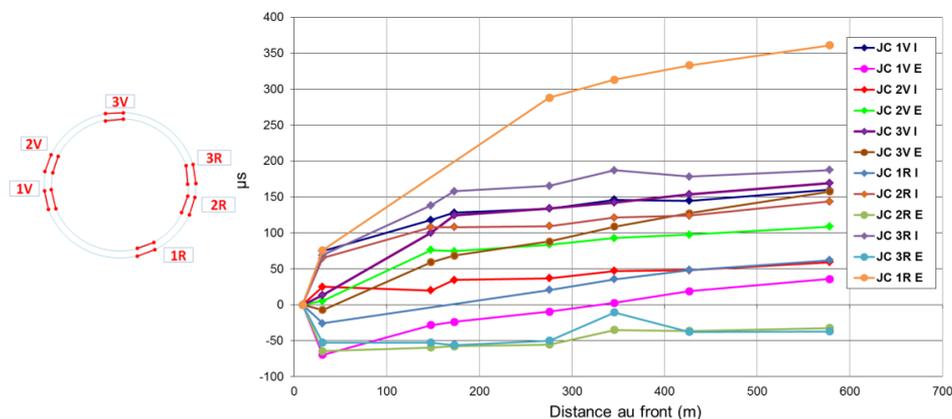


Figure 3. Distribution des jauges extensométriques dans l'anneau et données brutes recueillies au PM 1821 de la galerie de sécurité

Dans la Figure 4, on montre quelques résultats du traitement des données réalisé par De la Fuente et al. (2017). On peut observer que dans les zones où le frottement latéral exercé par le terrain sur le tunnelier est plus élevé, les valeurs du paramètre RQD (déterminé approximativement pendant le creusement à partir des lumières à travers la jupe) sont plus faibles que la moyenne. Ceci peut être notamment observé autour du P.M. 1550 qui correspond à une roche très fracturée. Cependant, la valeur du paramètre RQD est simplement représentative du degré de fracturation et ne peut pas décrire entièrement la qualité du milieu rocheux.

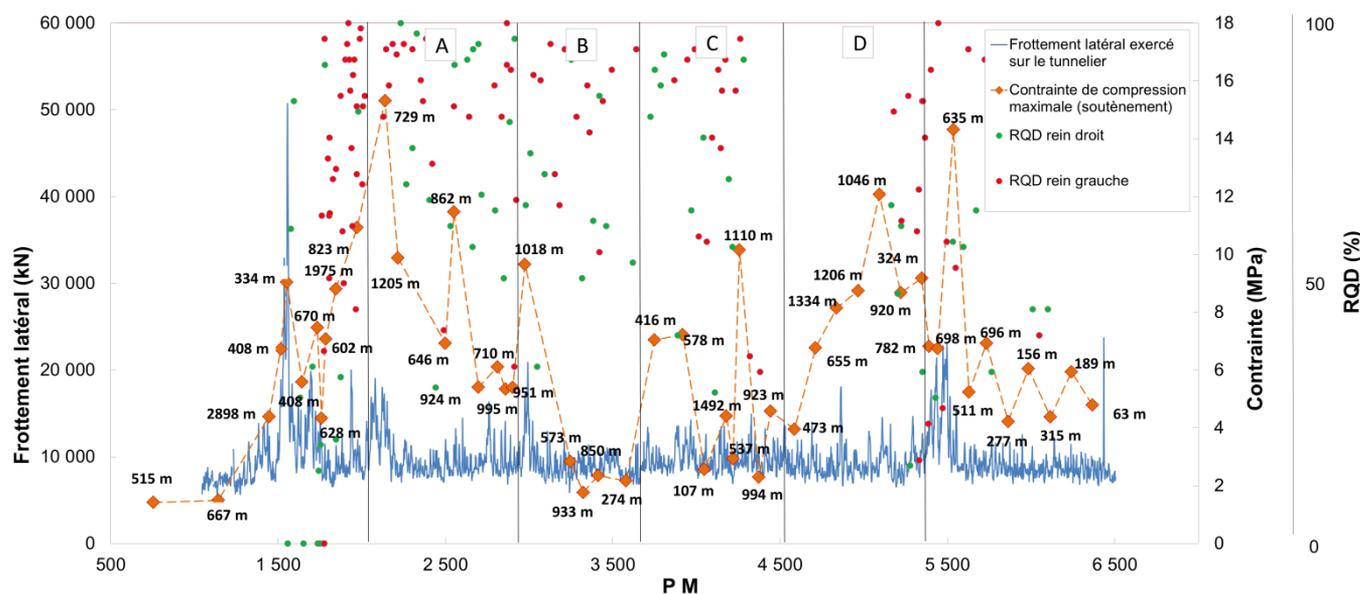


Figure 4. Frottement latéral exercé par le terrain sur la jupe du tunnelier, contrainte de compression maximale mesurée dans les voussoirs en béton (à la distance au front d'excavation indiquée en indice) et paramètre RQD en rein droit et gauche pendant l'excavation, en fonction du P.M. de la galerie (De la Fuente et al., 2017)

4. Retro-analyse numérique du tunnel routier

La réponse du tunnel routier est reproduite par une modélisation numérique réalisée avec le logiciel FLAC^{3D}. Le comportement du terrain est représenté par un modèle visco-élasto-plastique anisotrope. Le modèle CVISC est utilisé pour décrire le comportement de la matrice rocheuse. Ce modèle considère un comportement volumique élastique et un comportement déviatorique visco-elasto-plastique. C'est par l'introduction d'un modèle de joints omniprésents (ubiquitous joint model), représentant la direction des plans de faiblesse, que l'anisotropie liée à la schistosité est introduite dans le modèle. Ces joints s'activent et glissent lorsqu'un seuil de contrainte de cisaillement est atteint. Ce modèle de comportement a été déjà utilisé par Tran Manh et al. (2015) pour la simulation de la galerie de Saint-Martin-la-Porte dans le cadre de la liaison ferroviaire Lyon-Turin.

La Figure 5 montre la géométrie du modèle. La direction et l'inclinaison du plan de faiblesse sont fixées parallèlement à l'axe du tunnel et à 45° par rapport à l'horizontale. Le soutènement est composé de 20 boulons/ml qui sont simulés par des éléments structuraux de type câble ponctuellement ancrés à la paroi du tunnel et au terrain en fond de forage. Ces câbles peuvent plastifier en traction mais sont sans résistance en flexion. Les boulons font 4,6 m de longueur avec un diamètre de 20 mm, une limite élastique de 450 MPa et un module de 210 GPa pour l'acier. Le pas d'excavation est de 4,5 m et le taux d'avancement de 5,6 m/jour est imposé dans les simulations en concordance avec les valeurs moyennes obtenues pendant l'excavation du tunnel.

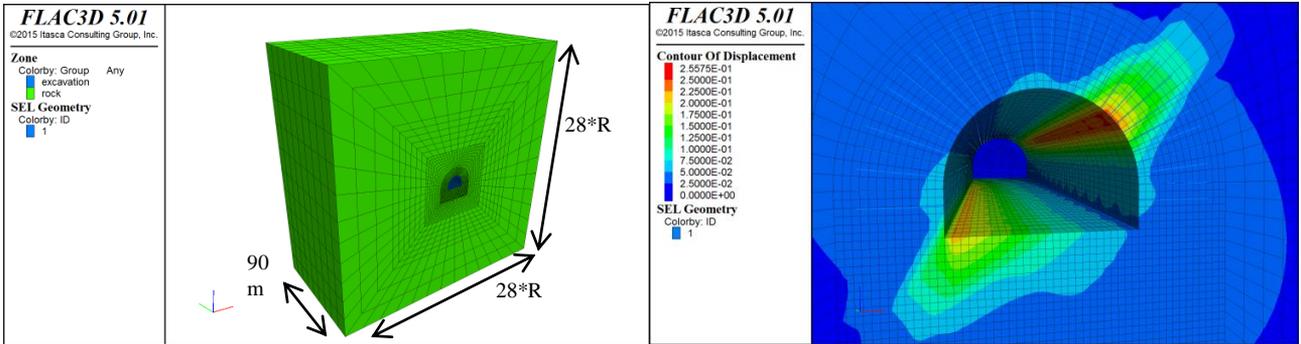


Figure 5. Géométrie du modèle (gauche) où $R = 5,8\text{m}$ représente le rayon excavé de la voûte du tunnel. Détail des déplacements autour du tunnel pendant le creusement (droite).

On considère une vitesse de creusement constante de $5,6\text{ m/jour}$ pour tracer les courbes de convergence. Ceci permet une meilleure comparaison des convergences dans les différentes sections du tunnel, étant donné que les effets des arrêts du tunnel sont ainsi supprimés. Néanmoins, en considérant un taux d'avancement constant, on suppose que les paramètres de la loi de convergence ne dépendent pas de la vitesse de creusement. Toutes les courbes sont tracées en considérant que la première mesure est réalisée à une distance de $4,5\text{ m}$ du front de taille, ce qui correspond à la longueur d'un pas d'excavation. Ceci correspond à une installation des plots de mesure $0,8\text{ jour}$ après l'ouverture de la section.

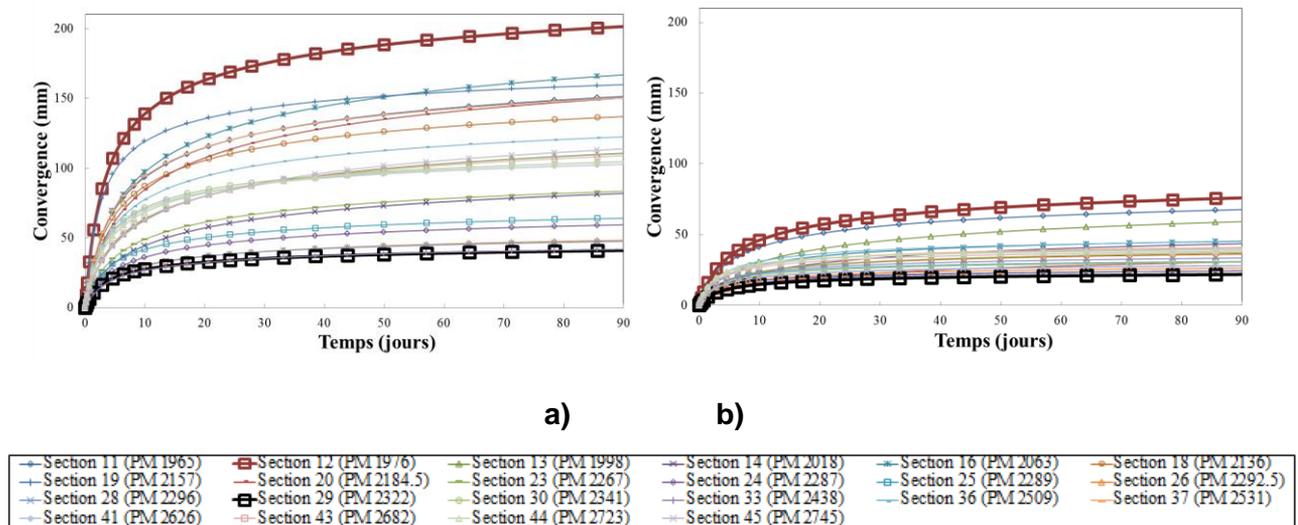


Figure 6. Courbes de convergence à l'intérieur de la zone « homogène » A dans la direction 2-4 a) et dans la direction 1-4 b)

A l'intérieur de la zone « homogène » A (cf. §.3.1 et Fig. 2), les paramètres ($T, X, C_{\infty x}, m$) ont été obtenus pour chaque section à partir du calage des données de convergence (Fig. 6). La section 12 montre les convergences les plus fortes tandis que la section 29 montre les convergences les plus faibles. La réponse de ces deux sections est rétro-analysée par simulation numérique avec le modèle constitutif décrit préalablement, Fig. 7. On considère une couverture moyenne de 1067 m . Le coefficient latéral de poussé K_o est pris égal à $1,4$. Les valeurs des paramètres mécaniques des joints sont pris égaux dans les deux sections ($c_j = 0,075\text{ MPa}$, $\Phi_j = 25^\circ$, $\Psi_j = 5^\circ$ and $\sigma_{tj} = 0,01\text{ MPa}$) et les valeurs de certains paramètres de la matrice rocheuse sont les mêmes dans les deux sections ($E = 40\text{ GPa}$, $\Phi = 30^\circ$, $\Psi = 15^\circ$ and $\sigma_t = \sigma_C / 10$). Quatre paramètres de la matrice diffèrent d'une section à l'autre, (Fig. 7). Le comportement observé *in situ* est reproduit de façon très satisfaisante avec ce modèle.

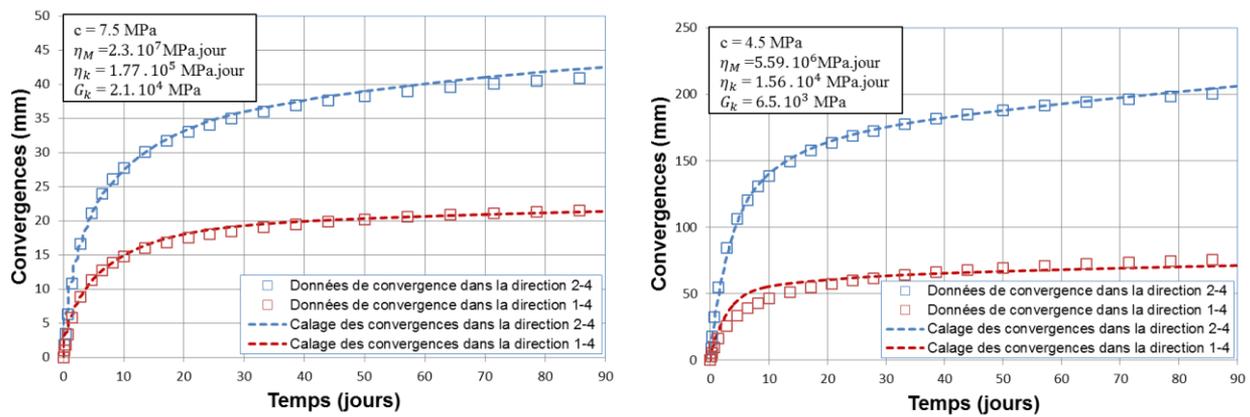


Figure 7. Calage des données de convergence dans la section 12 (P.M. 1965) qui montre les convergences les plus fortes (droite) et dans la section 29 (P.M. 2322) qui montre les convergences les plus faibles (gauche)

5. Conclusions

Une rétro-analyse numérique des mesures de convergence du tunnel routier du Fréjus a été réalisée pour caler les paramètres d'un modèle constitutif viscoplastique anisotrope qui est capable de reproduire le comportement instantané et différé du terrain dans l'une des zones les plus problématiques du tunnel routier lors de son creusement.

Par la suite, nous appliquerons ce modèle constitutif pour simuler le comportement du terrain dans la modélisation de la galerie de sécurité excavée au tunnelier, pour analyser l'interaction terrain/voussoir à court et long terme.

Remerciements : Les auteurs remercient la SFTRF pour la mise à disposition des données d'auscultations dans les deux ouvrages ainsi que la Société ITASCA pour son soutien à travers le programme de coopération doctorales IEP (Itasca Education Partnership).

6. Références bibliographiques

- Barla G. (1995). Squeezing rocks in tunnels. ISRM News journal, pp 44-49.
- De la Fuente M., Sulem J., Taherzadeh R., Subrin D. (2017). Traitement et rétro-analyse des auscultations réalisées dans le tunnel routier du Fréjus et sa galerie de sécurité lors de leurs constructions respectives. Congrès AFTES 2017.
- Levy, M., Matheron P., Demorieux J.M., Courtecuisse G. (1981). Les travaux de génie civil du tunnel du Fréjus. Annales de l'ITBTP, (400 (TRAV PUBLICS-19).
- Panet, M. (1996). Two case histories of tunnels through squeezing rocks. Rock mechanics and rock engineering, 29(3), pp 155-164.
- Sulem, J., Pant M., Guenot A. (1987). Closure analysis in deep tunnels. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr 24(3), pp 145–154.
- Sulem J. (2013) Tunnel du Fréjus: Mesures géotechniques et interprétation, Manuel de Mécanique des Roches Tome IV, chap. 7, Presse des Mines.
- Tran-Manh, H., Sulem J., Subrin D., Billaux D. (2015). Anisotropic time-dependent modeling of tunnel excavation in squeezing ground. Rock Mechanics and Rock Engineering, 48(6), pp 2301-2317.