

Optimisation du revêtement en voussoirs préfabriqués par rétro-analyse dans le cadre du tunnel de base Lyon - Turin

Optimisation of precast segment lining by back-analysis in Lyon – Turin base tunnel

Luigi PEANO, *Systra, Paris, France*

Gabriele GIORDANO, *Systra, Paris, France*

José GONZÁLEZ DEL TÁNAGO, *Systra, Paris, France*

Annick ETTIEN, *Systra, Paris, France*

Emmanuel HUMBERT, *TELT, Le Bourget du Lac, France*

Christophe SALOT, *TELT, Le Bourget du Lac, France*

Résumé

Le projet de la nouvelle ligne ferroviaire Lyon – Turin comporte la construction d'un tunnel bitube de 57 km entre France et Italie. Systra fait partie du groupement S2IP en charge de la Maitrise d'Œuvre du lot central de l'ouvrage, côté français, sous la Maitrise d'Ouvrage de TELT.

Le tube Sud du tunnel entre Saint-Martin-La-Porte et La Praz a été creusé par un tunnelier à bouclier de type « monojupe » dans un contexte géologique et géotechnique complexe, constitué d'alternances de schistes et grès avec des couches charbonneuses. Ce tube Sud est une galerie de reconnaissance, dont l'excavation a rencontré deux failles majeures qui ont induit le blocage du tunnelier associé à d'importantes surexcavations, des venues d'eau ainsi que des désordres dans les voussoirs préfabriqués déjà en place. Des traitements de terrain et des opérations de maintenance extraordinaire du TBM ont été nécessaires afin de permettre le redémarrage de l'excavation.

Le retour d'expérience, par analyse des paramètres de l'excavation, nous a permis de mener une rétro-analyse par modélisation numérique avec le but de recréer les ovalisations de l'anneau en voussoirs mesurées in-situ par le système d'auscultation. Les résultats ont permis une optimisation substantielle du revêtement du tube Nord initialement prévu en double anneau (voussoirs préfabriqués + béton coffré). Les conclusions de la rétro-analyse ont servi à envisager un revêtement en simple anneau en voussoirs préfabriqués, ce qui se traduit en une réduction du diamètre d'excavation, une simplification de la logistique de chantier et une optimisation du coût global de l'ouvrage.

Abstract

The new Lyon-Turin railway project involves the construction of 57 km twin-tube tunnel between France and Italy. SYSTRA is part of the design joint venture S2iP of the central package in the French side, on behalf of the Employer TELT.

The south tunnel (exploratory tunnel) between Saint-Martin-La-Porte and La Praz has been excavated by single-shield Tunnel Boring Machine (TBM) in complex geological and geotechnical context consisting of schists and sandstone alteration with carbonaceous layers. The excavation has crossed two major faults leading to the TBM jamming, significant over-excavation, heavy water inflow and cracking in the precast segments. Ground treatment and extraordinary maintenance of the TBM were essential to restart excavation.

The excavation feedback led to develop a back-analysis study, using numerical modeling in order to recreate the measured segmental lining ovalization. The results led to significant optimization of the north tube lining initially designed as double lining configuration (precast segments + cast-in-place concrete). According to this study, the design has been optimized to the single ring segmental lining, which results in reduction of the excavation diameter, simplification of the site logistics and optimization of the overall cost of the project.

Optimisation du revêtement en voussoirs préfabriqués par retro-analyse dans le cadre du tunnel de base Lyon - Turin

Optimisation of precast segment lining by back-analysis in Lyon – Turin base tunnel

Luigi PEANO, *Systra, Paris, France*

Gabriele GIORDANO, *Systra, Paris, France*

José GONZÁLEZ DEL TÁNAGO, *Systra, Paris, France*

Annick ETTIEN, *Systra, Paris, France*

Emmanuel HUMBERT, *TELT, Le Bourget du Lac, France*

Christophe SALOT, *TELT, Le Bourget du Lac, France*

1 Introduction

Le projet de la nouvelle liaison ferroviaire Lyon – Turin a une importance stratégique dans le cadre du transport de passager et de marchandises entre la France et l'Italie. L'objectif est de créer une connexion rapide et efficace entre les deux pays et de réduire les émissions de gaz à effet de serre liées au transport routier. Le projet comporte la réalisation d'un tunnel de base bitube sous les Alpes d'environ 57.5 km de long avec des rameaux de communication tous les 333 m, 4 descenderies d'investigation et d'accès de secours et 3 sites de sécurité souterrains.

SYSTRA fait partie du groupement S2iP (constitué des sociétés Setec, Systra, Piniswiss, Italferr) en charge de la Maitrise d'Œuvre du lot central du Tunnel de Base côté français appelé « Chantier Opérationnel 6/7 » qui inclut environ 23 km de tunnel principal et le Site de Sécurité de La Praz. Le Maître d'Ouvrage TELT (Tunnel Euralpin Lyon Turin) est le promoteur public en charge de la réalisation et de l'exploitation de la section transfrontalière de la nouvelle ligne.

Le présent article porte sur le tronçon de tunnel d'environ 8.7 km de long, à creuser au tunnelier à voussoirs entre Saint-Martin-La-Porte et La Praz. Ce tronçon est caractérisé par un contexte géologique complexe, constitué principalement de grès et schistes avec des bandes de charbon, sous des couvertures variant de 600 à 1300 m environ.

En raison du contexte géologique et géotechnique complexe, ainsi que des difficultés d'excavation rencontrées lors du creusement de la descenderie de Saint-Martin-La-Porte réalisée antérieurement (de 2003 à 2010), une galerie d'investigation a été creusée dans l'axe du futur tube Sud du tunnel de base pour une meilleure reconnaissance des terrains. Cette galerie de reconnaissance a été réalisée entre le pied de la descenderie existante de Saint-Martin-La-Porte et la descenderie de La Praz, avec le diamètre final de l'ouvrage.

Les travaux ont été effectués par un groupement composé des entreprises Spie Batignolles Génie Civil (mandataire), Eiffage Génie Civil, Ghella SpA, CMC di Ravenna et Cogeis SpA, sous la Maitrise d'Œuvre Egis – Alpina.

Dans le cadre de la poursuite des travaux, Systra est en charge du dimensionnement du revêtement définitif du tube Sud déjà creusé et de la conception du futur tube Nord (tunnel de base bitube). Sur la base du retour d'expérience du creusement de la galerie de reconnaissance (tube Sud), Systra a mené une retro-analyse avec l'objectif d'optimiser le projet du futur tube Nord du tunnel de base.

Le travail a consisté d'abord en une prise de connaissance approfondie des journaux de chantier et des résultats des auscultations réalisées pendant le creusement de la galerie de reconnaissance. Par la suite, une rétro-analyse numérique a été menée sur la base des ovalisations mesurées sur le revêtement en voussoirs préfabriqués, en particulier dans les zones de faille où des désordres ont été observés. Cette retro-analyse a permis de recalculer les paramètres géotechniques du massif rocheux et l'état de contrainte initial dans les zones de faille. Les résultats de cette démarche ont été, par la suite, utilisés pour le dimensionnement du revêtement du futur tube Nord du tunnel de base.

La rétro-analyse a permis une amélioration substantielle du projet du tube Nord, notamment en termes de réduction des coûts de l'ouvrage et d'optimisation de la logistique des travaux.

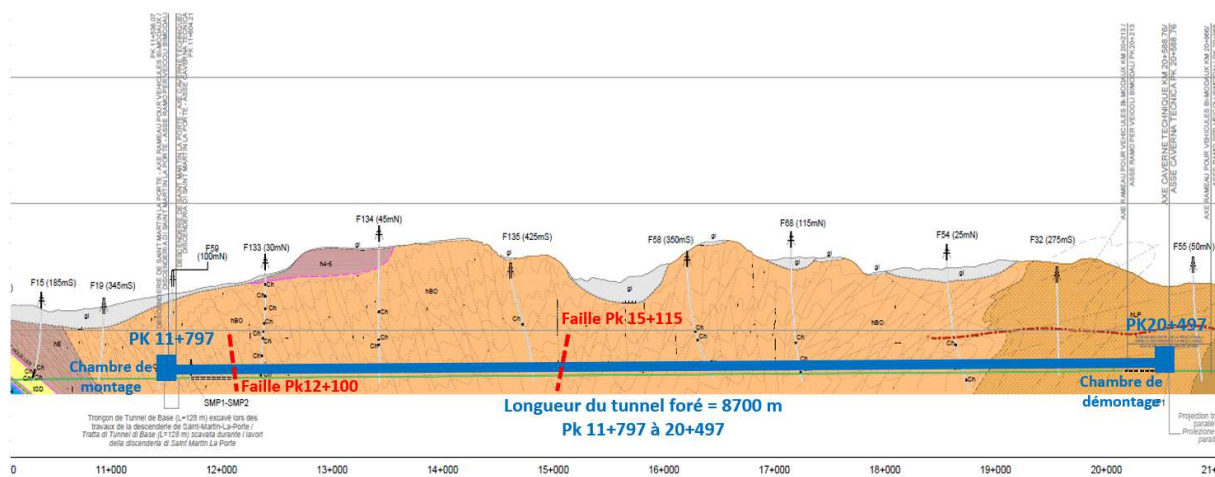


Figure 1: Profil longitudinal du tunnel de base entre Saint-Martin-la-Porte et La Praz

2 Contexte géologique, géotechnique et hydrogéologique

2.1 Géologie et géotechnique

Le tunnel entre Saint-Martin-La-Porte et La Praz intercepte la zone définie comme le « Houiller Briançonnais » constitué des unités géologiques suivantes :

- Zone de transition entre l'unité des Encombres et l'unité du Bréquin-Orelle sur un linéaire d'environ 0.5 km à partir de la chambre de montage du tunnelier ;
- Unité du Bréquin-Orelle sur un linéaire d'environ 6.5 km
- Unité de La Praz sur un linéaire d'environ 1.6 km, jusqu'à la chambre de démontage du tunnelier.

Les unités géologiques listées ci-dessus consistent principalement en des alternances de schistes, grès et conglomérats avec la présence de bandes de charbon.

L'excavation de la galerie de reconnaissance (tube Sud) a mis en évidence le long des 2 premiers km du tunnel, des alternances de metagrès (grès micacés et grès schisteux) et metapelite à intercalation de schistes / schistes noirs d'épaisseur décimétrique. Ce tronçon est caractérisé par un comportement anisotrope du massif rocheux.

Au-delà de cette zone, au fur et à mesure de l'avancement du tunnelier vers l'est, le pourcentage de schistes diminue et le massif rocheux consiste principalement en des grès et pélites. L'anisotropie du massif rocheux devient moins importante.

Sur le tronçon excavé du tunnel de base, deux failles principales ont été rencontrées :

- Pk 12+100 (environ 0,3 km après la chambre de lancement du tunnelier) ;
- Pk 15+115 (environ 3,3 km après la chambre de lancement).

2.2 Hydrogéologie

Les formations schisteuses et gréseuses sont caractérisées par une perméabilité faible à moyenne.

Les venues d'eau identifiées en cours de travaux sont globalement faibles (< 1 l/s), avec des fronts secs à humides observés lors des levés de front. Toutefois, le débit global drainé par la galerie de reconnaissance est relativement important (débits cumulés d'environ 120 l/s selon les données de juin 2019). Les valeurs maximales mesurées ponctuellement dans les zones fracturées sont parfois importantes, avec notamment un débit ponctuel de 76 l/s mesuré dans la zone du front entre le Pk 19+290 et le Pk 19+500. Ce débit d'eau a baissé jusqu'à environ 50 l/s après la mise en place de l'anneau de voussoirs.

3 Caractéristiques géométriques du tunnel

Le tunnel de base est caractérisé par une configuration « bitube » sur la totalité de son linéaire de plus de 57 km. En raison de l'optimisation apportée grâce à la rétro-analyse qui fait l'objet du présent article, les coupes type du tunnel sont différentes entre le tube Sud (galerie de reconnaissance) et le tube Nord.

3.1 Coupe type du tube Sud

Le tube Sud (galerie de reconnaissance) a été creusé avec un tunnelier à voussoirs de type « monojupe ».

En raison du contexte géologique et géotechnique complexe, le revêtement est constitué d'un double anneau :

- Revêtement provisoire en voussoirs préfabriqués mis en place à l'avancement à l'intérieur du bouclier. L'épaisseur des voussoirs est de 45 cm. Trois types de voussoirs ont été mis en place selon les conditions géotechniques rencontrées, avec différentes classes de résistance de béton et différents taux de ferrailage ;
- Revêtement définitif en béton coffré pour reprendre les charges à long terme, avec une épaisseur minimale de 50 cm.

La coupe type du Tube Sud avec les dimensions du revêtement en « double anneau » est représentée sur la Figure 2 :

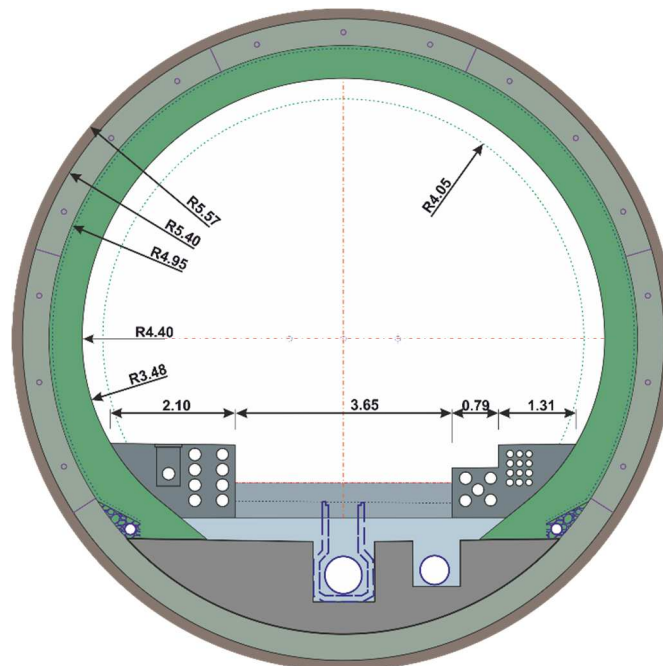


Figure 2: Coupe type du revêtement du tube Sud

3.2 Coupe type du tube Nord

Dans le cadre du projet du tube Nord du tunnel de base, nous avons envisagé un revêtement optimisé constitué d'un « simple anneau » en voussoirs préfabriqués. Deux épaisseurs différentes de voussoirs (respectivement de 50 cm et 60 cm) seront à appliquer en fonction des conditions géologiques et géotechniques réellement rencontrées.

Les caractéristiques géométriques de la section sont résumées ci-après :

- Diamètre d'excavation : 10,34 m
- Vide annulaire : 22 cm (comprenant la hauteur des brosses, l'épaisseur de la jupe, la conicité du bouclier et la surcoupe)
- Epaisseur des voussoirs : 50 / 60 cm

- Diamètre interne nominal : 8,90 / 8,70 m (comprenant 15 cm de tolérance radiale)

Les coupes type, respectivement avec un voussoir de 50 cm et 60 cm, sont représentées sur la figure ci-après.

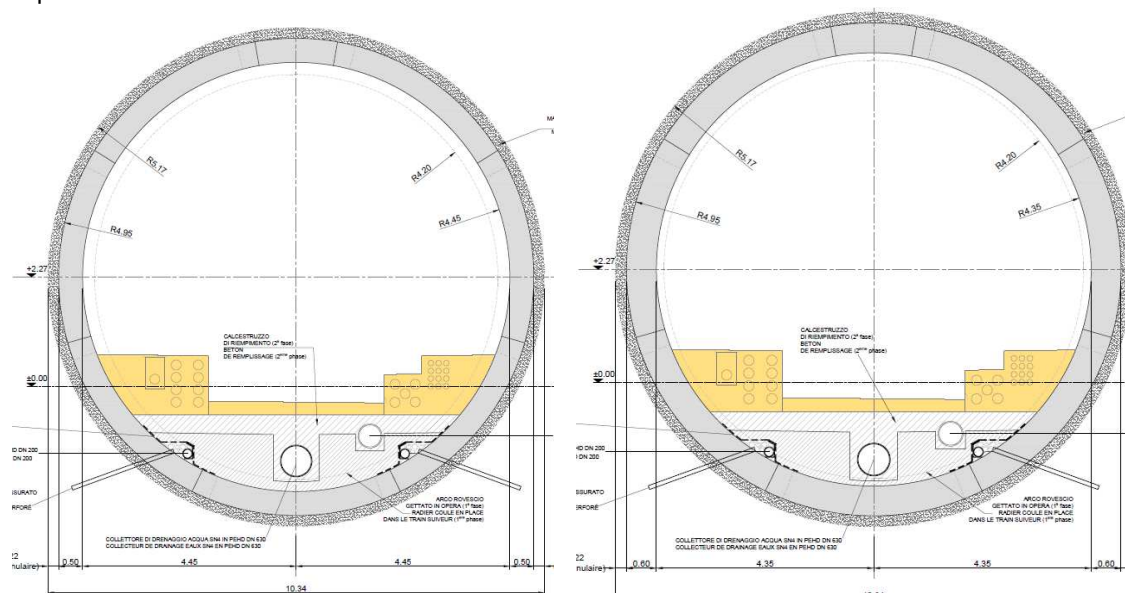


Figure 3: Coupes type du tube Nord : (A gauche) voussoir de 50 cm d'épaisseur et (A droite) voussoir de 60 cm

4 Retour d'expérience de la galerie de reconnaissance

4.1 Généralités

Le creusement au tunnelier du tube Sud a démarré le 8 septembre 2016 et s'est achevé le 23 septembre 2019 avec un linéaire excavé d'environ 8,7 km.

Le tunnelier, fabriqué par NFM Technologies et nommé « Federica », a un diamètre d'excavation de 11,26 m et une puissance de 5 MW.

Trois (3) types de voussoirs ont été utilisés :

- Type 1 : classe de résistance C45/55, taux de ferrailage 98 kg/m³ ;
- Type 2 : classe de résistance C80/95, taux de ferrailage 149 kg/m³ ;
- Type 3 : classe de résistance C80/95, taux de ferrailage 185 kg/m³.

Deux (2) arrêts majeurs de la machine se sont produits pendant l'excavation :

- Pk 12+100 : importants soutirages (environ 5000t à front contre 400t théoriques) et blocage du tunnelier lors de la rencontre de la première faille majeure ;
- Pk 15+115 : importants soutirages (environ 3800t sur 3 anneaux) et blocage du tunnelier lors de la rencontre de la deuxième faille majeure.

4.2 Expérience de la première faille comme base pour la rétro-analyse numérique

Les valeurs maximales de déformation de l'anneau de voussoirs préfabriqués ont été enregistrées au droit de la première faille rencontrée au Pk 12+100.

La deuxième faille, rencontrée au Pk 15+115, a induit des sur-excavations et des ovalisations d'anneaux moins importantes que celles mesurées au droit de la première faille.

Par conséquent, la section au droit du PK12+100 est considérée comme le cas le plus défavorable et les données recueillies ont été utilisées comme valeurs de base pour la rétro-analyse numérique et le dimensionnement du revêtement du tube Nord dans les deux zones de faille. La faille du Pk 15+115 n'a pas fait l'objet d'une rétro-analyse car non dimensionnante vis-à-vis des déformations des anneaux.

Au droit de la première faille (Pk12+100), les sondages réalisés ont révélé une alternance de grès, de schistes noirs et couches de charbon, ainsi qu'une direction perpendiculaire de la faille par rapport à l'axe du tunnel. L'orientation de la faille par rapport au tunnel est représentée sur les figures ci-après.

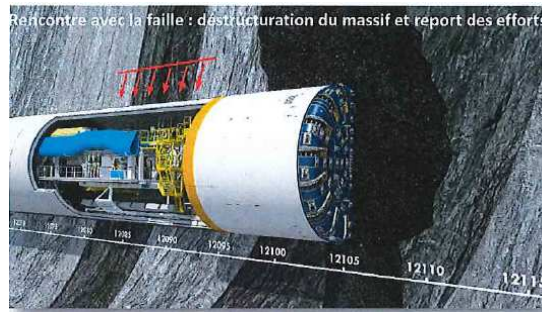


Figure 4: Représentation 3D du tunnelier dans la zone de la première faille principale (Pk 12+100)

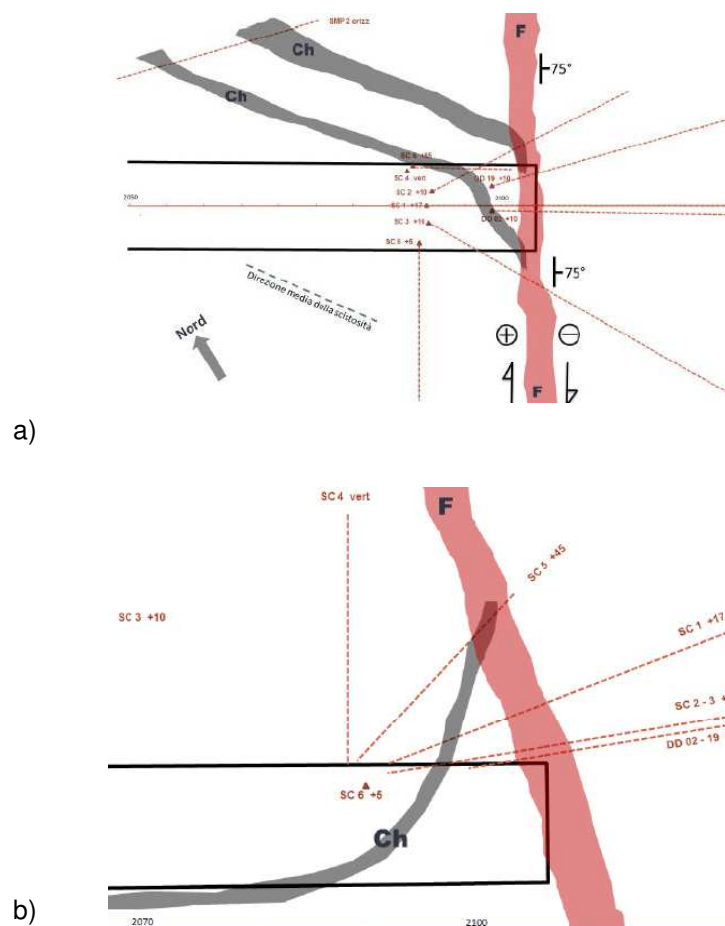


Figure 5: Faille principale Pk 12+100 (F : faille ; Ch : couches de charbon) – a) Vue en plan - b) Coupe longitudinale

Les observations effectuées pendant l'arrêt du tunnelier (au droit de cette faille) ont mis en évidence un massif rocheux très fracturé et hétérogène avec un comportement poussant. Les importantes sur-

excavations ont engendré un transfert de charge qui a eu pour conséquence une forte ovalisation de plusieurs anneaux dans la zone à proximité de la faille, ainsi que la formation de fissures présentant des ouvertures de 0.5 à 5mm.

Les voussoirs fissurés ont été renforcés avec des cintres HEB de sorte à éviter toute évolution des ovalisations.



Figure 6: Voussoirs fissurés et renforcement avec cintres HEB

L'ovalisation des anneaux de voussoirs a été mesurée avec un système d'inclinomètres de type RCMS (Ring Convergence Measurement System) installé dans le train suiveur du tunnelier et ensuite remplacés par des cibles optiques après le passage du train suiveur. L'installation du système RCMS et le schéma de mesure sont représentés sur la Figure 7.

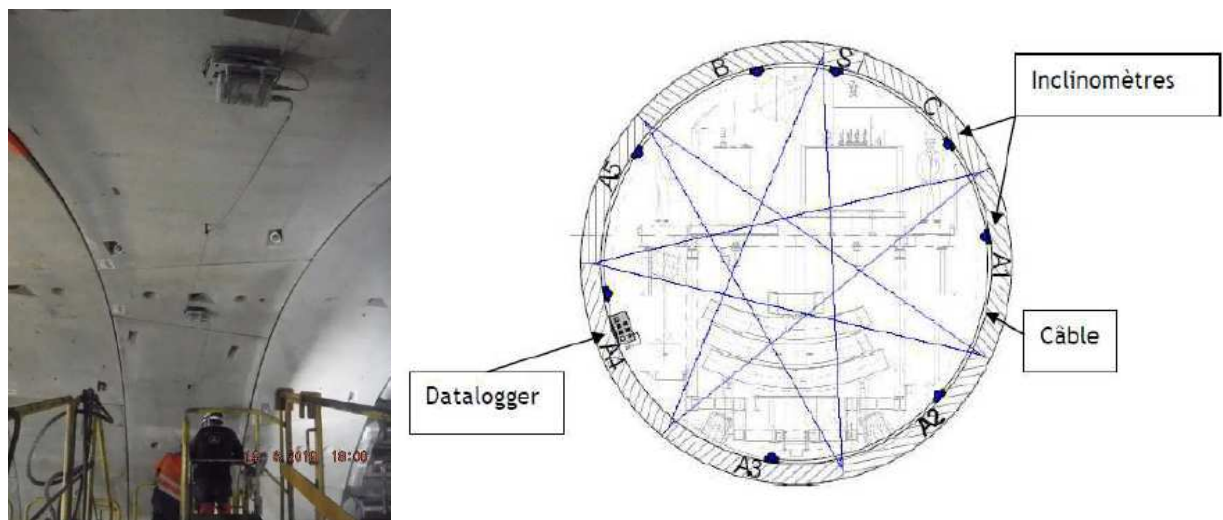


Figure 7: Installation et schéma de principe du système RCMS

Des extensomètres et des cellules de pression ont également été installés sur plusieurs voussoirs instrumentés. Toutefois, ces systèmes ont fourni des résultats difficiles à interpréter qui n'ont pas été utilisés pour la rétro-analyse. Par exemple, les mesures de pression de contact entre les voussoirs et le rocher ont atteint des valeurs maximales à proximité de la faille de l'ordre de 2 à 2,5 MPa au droit de l'anneau 201 (Pk 12+058) le mois d'avril 2018. Cependant, à fin juillet 2019, on note une diminution de la pression au droit de cet anneau, à une valeur d'environ 0,5 MPa. Par ailleurs, les valeurs de pression enregistrées sur l'ensemble du tunnel ne sont pas toujours cohérentes avec les contraintes mesurées dans le béton, ce qui semble confirmer la faible fiabilité de ce type de mesure dans le contexte rencontré.

Par conséquent, la rétro-analyse numérique s'est basée uniquement sur les valeurs de convergence, beaucoup plus représentatives des phénomènes d'ovalisation qui ont eu lieu sur le revêtement en place.

5 Rétro-analyse numérique

5.1 Définition des valeurs cibles pour la rétro-analyse

Au droit de la section retenue pour la rétro-analyse (PK12+100), des ovalisations centimétriques ont été mesurées.

Les mesures effectuées dans cette zone ont été utilisées pour la détermination des valeurs cible de déformation à utiliser pour la rétro-analyse.

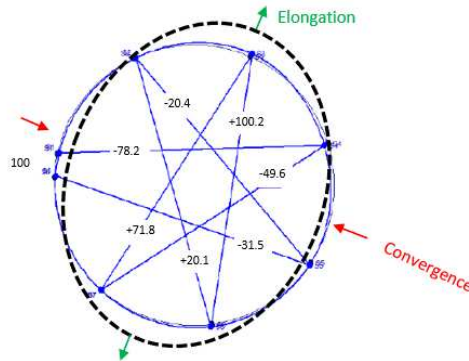


Figure 8: Mesures d'ovalisation dans la zone de la première faille (PK 12+100)

La Figure 9 montre les résultats en termes de convergence/élongation en fonction du temps selon le schéma géométrique de la Figure 8. La convergence et l'élongation maximales ont été mesurées respectivement sur les cordes 1 - 4 et 3 - 6.

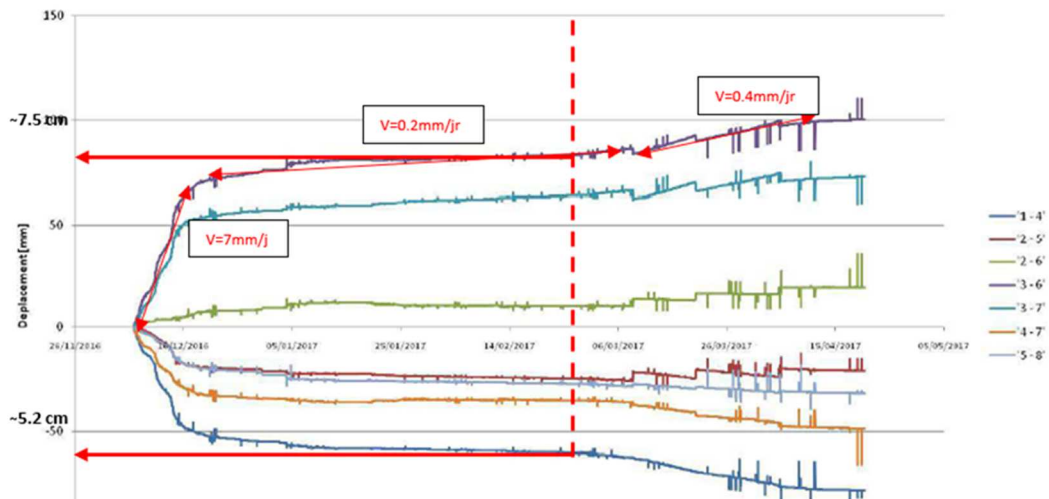


Figure 9: Convergence/élongation en fonction du temps

Deux plafonds de déformation ont été identifiés (selon la Figure 9) :

- Premier plafond : correspondant à une convergence cumulée de l'ordre de 5 cm (corde 1-4) et une élongation cumulée de l'ordre de 7 cm (corde 3-6) ;
- Deuxième plafond de déformation, qui est identifié après le redémarrage du tunnelier. Ce plafond est difficilement interprétable pour être intégré dans la rétro-analyse et peut être associé à un report de charge secondaire qui a eu lieu pendant la phase de déblocage du TBM.

Nous nous sommes limités à prendre en compte le premier plafond de déformations pour la rétro-analyse qui a servi de base pour le dimensionnement des voussoirs du tube Nord dans la zone de faille. Cela peut être considéré comme conservatif, car il est envisagé d'effectuer des interventions de traitement de la zone de faille avant le passage du tunnelier de manière à limiter le risque d'ovalisation des voussoirs.

5.2 Calibration des paramètres géotechniques dans les zones de faille

Les paramètres qui ont été calés sur la base des déplacements radiaux mesurés sont les suivants :

- Paramètres de résistance du massif rocheux :
 - Module de Young (E_m) ;
 - Cohésion (c') ;
 - Angle de frottement (ϕ) ;
- L'état de contrainte in situ
- L'angle de rotation des contraintes principales

La retro-analyse a été menée à l'aide du logiciel aux éléments finis RS2, développé par Rocscience pour les calculs d'ouvrages géotechniques et souterrains en conditions de déformation plane.

Deux hypothèses de base ont été prises en compte pour modéliser la schistosité du massif :

- Le massif rocheux a été considéré comme un milieu transversalement isotrope (isotrope à l'intérieure de chaque plan de schistosité). Dans un modèle 2D en conditions de déformation plane, RS2 permet de modéliser ce comportement en attribuant au milieu continu deux modules élastiques différents dans le même plan (E_1 , E_2) selon les directions orthogonales 1 et 2, et un module au cisaillement correspondant (G_{12}) comme indiqué sur la Figure 10 Le module élastique hors plan (E_z) est pris égal à E_1 .
- La contrainte in situ a été pivotée de 30° .

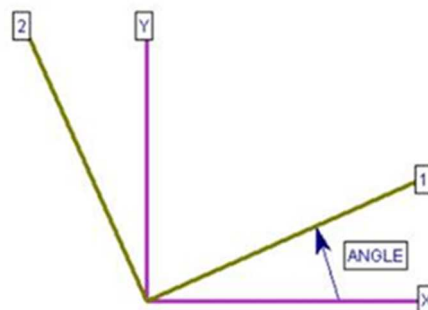


Figure 10: Direction du module E_1 et E_2

Une loi de comportement élastique parfaitement plastique en compression et élasto-fragile en traction a été associée au revêtement à voussoirs. De cette manière, la plastification des fibres comprimées et le comportement post-fissuration du béton en traction seront prises en compte de sorte à s'approcher au mieux du comportement des voussoirs, constaté in situ.

Au bout de plusieurs itérations, les déplacements cibles ont été atteints avec les paramètres géotechniques affichés au tableau suivant.

Tableau 1 : Paramètres issus de la retro-analyse

Retro-analyse	
PK de référence [km]	12+100
Couverture [m]	740
Matériel transversalement isotrope	
E1 [MPa]	675
E2 [MPa]	1250
G12 [MPa]	893
Angle [°]	-30
C [MPa]	0.8
φ [°]	30
K0 [-]	1.1

La Figure 11 illustre les résultats obtenus par la retro-analyse en termes de déplacements radiaux minimum et maximum, de 2.7 cm et de 3.6 cm. Ces déplacements correspondent respectivement, à une convergence maximale de 7.2 cm et à une elongation maximale de 5.4 cm. Ces valeurs sont cohérentes avec les déformations mesurées sur les voussoirs, issues du premier plafond de stabilisation (Figure 9).

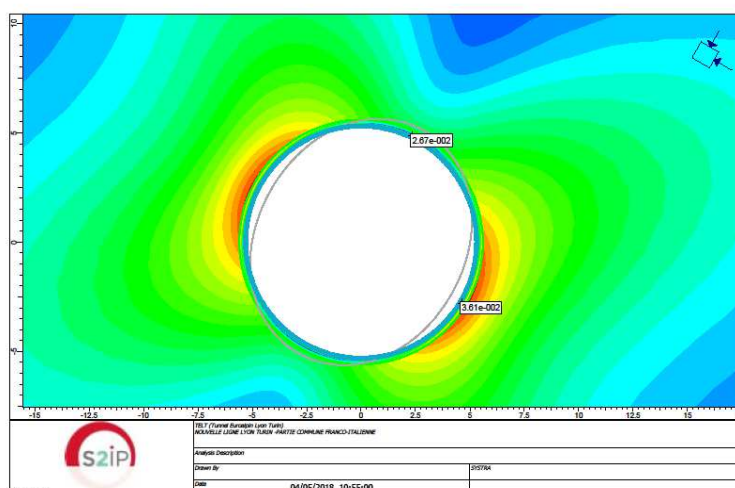


Figure 11: Déplacements radiaux de retro-analyse obtenus avec le logiciel RS2

Les paramètres géomécaniques obtenus de cette analyse (voir Tableau 1) ont été utilisés pour le dimensionnement du revêtement à voussoir du tube Nord dans la zone de faille.

6 Dimensionnement du revêtement du tube Nord

6.1 Dimensionnement des voussoirs

La solution envisagée dans le cadre de la phase du projet précédente pour le tube Sud prévoyait un revêtement en double anneau composé d'un revêtement provisoire en voussoirs préfabriqués et un d'anneau interne coulé sur place (cf. § 3.1).

La retro-analyse a permis d'optimiser la conception du revêtement du tube Nord en passant d'une configuration en double-anneau à un revêtement en « simple anneau » en voussoirs préfabriqués conçus autant pour la phase travaux que pour le long terme.

Deux épaisseurs différentes du revêtement en voussoir ont été envisagées (respectivement 50 cm et 60 cm), pour être appliquées en fonction des conditions géotechniques rencontrées. Plusieurs sections

de calcul ont été analysées. Les résultats des deux coupes dimensionnantes sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2: Sections dimensionnantes utilisés dans l'analyse

Section	Epaisseur du voussoir [cm]	Analyse	PK [km]	Couverture [m]	K_0 [-]
T1	0.5	Couverture maximale hors zone de faille	13+500	1000	1.2
T2	0.6	Zone de faille (Tableau 1)	12+100	740	1.1

Les analyses de la section T1 (hors faille) ont été menées à l'aide du logiciel FLAC 3D tandis que pour le T2 (rétro-analyse en zone de faille), l'analyse a été réalisée avec le logiciel Rocscience RS2.

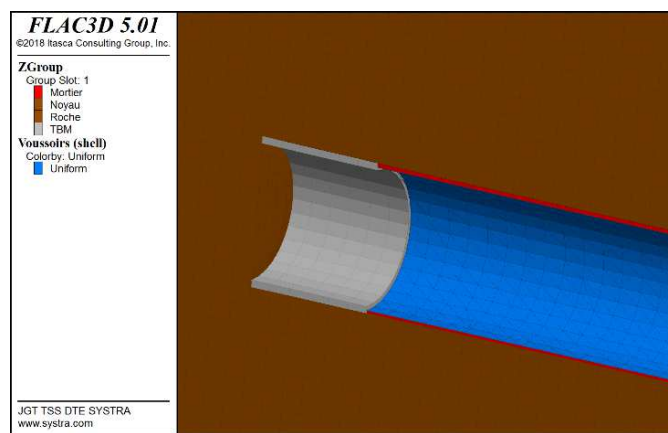


Figure 12: Modèle FLAC 3D utilisé pour le dimensionnement des voussoirs type T1

Une analyse 3D en zone de faille n'est pas envisageable, car ne permettrait pas une convergence numérique, ce qui est d'ailleurs en cohérence avec les surexcavations qui ont eu lieu lors de la traversée de la faille.

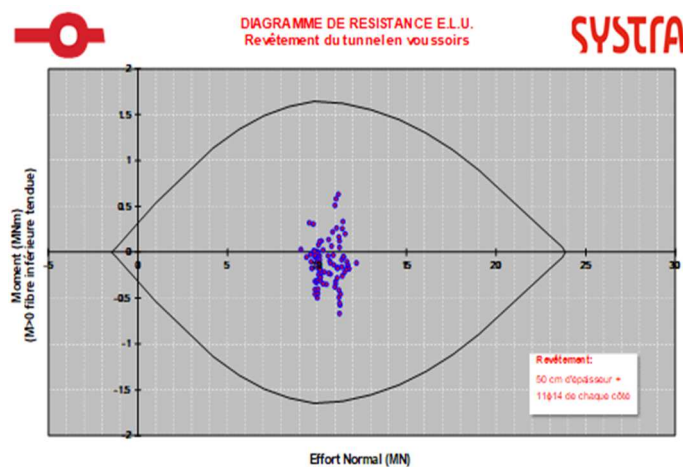


Figure 13: Diagramme d'interaction pour la vérification des voussoirs type T1 ; Efforts issus du modèle FLAC 3D

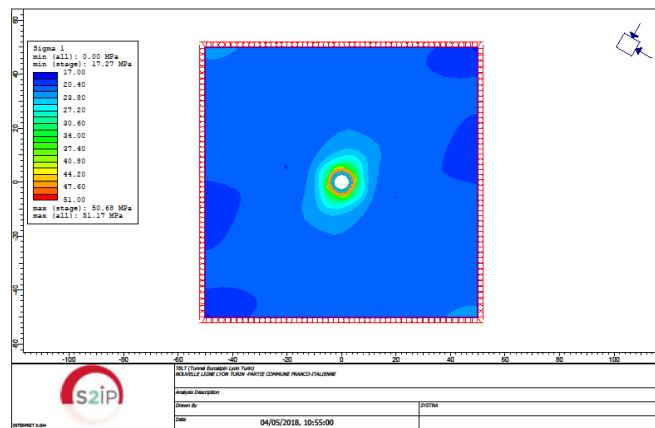


Figure 14: Modèle RS2 utilisé pour le dimensionnement des voussoirs type T2 (modèle 2D) – Contraintes principales majeures

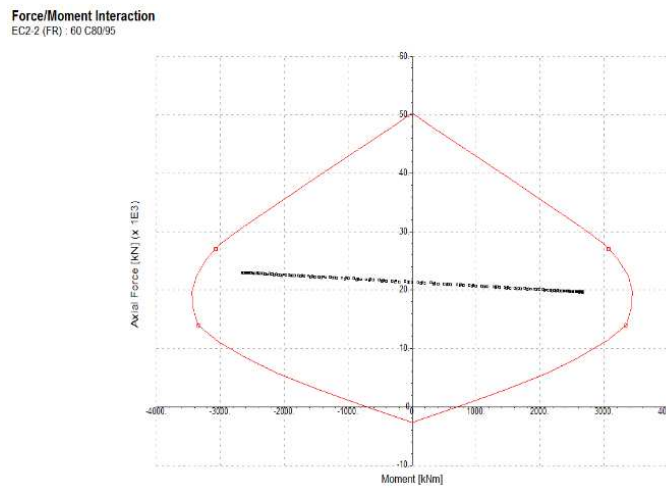


Figure 15: Diagramme d'interaction pour la vérification des voussoirs type T2 ; Efforts issus du modèle RS2

Les caractéristiques des voussoirs utilisés dans les analyses décrites ci-avant sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 3: Propriétés des voussoirs

	Voussoir type T1	Voussoir type T2
Classe du béton	C45/55	C80/95
Épaisseur	50 cm	60 cm
Ratio d'acier	90 kg/m ³	110 kg/m ³

6.2 Répartition des types de voussoirs le long du tube Nord

Sur la base des résultats de calcul présentés aux paragraphes précédents, la répartition des différents types de voussoirs le long du tunnel Nord a été définie comme suit :

- Voussoir type T2 (60 cm d'épaisseur) pour la traversée des zones de faille ;
- Voussoir type T1 (50 cm d'épaisseur) pour le reste du tunnel (hors zone de faille).

Par ailleurs, le voussoir type T1 a été réparti en deux sous-catégories :

- Voussoir type T1a (ratio d'acier de 90 kg/m³) à appliquer dans les zones courantes ;
- Voussoir type T1b (ratio d'acier de 110 kg/m³) à retenir au droit des zones caractérisées par des valeurs d'ovalisation supérieures à 20 mm et/ou dans les zones caractérisées par des poussées élevées du tunnelier liées au fort frottement sur le bouclier. Dans les zones d'attaque et de percement du tunnelier, des voussoirs type T1b sont également mis en place.

7 Conclusions

Le retour d'expérience du creusement du tube Sud (galerie de reconnaissance) du tunnel de base Lyon – Turin entre Saint-Martin-la-Porte et La Praz a confirmé la complète faisabilité du creusement au tunnelier du tronçon en objet.

L'analyse des journaux de chantier et les données d'auscultation effectuées durant les travaux de creusement du tube Sud, nous a permis de mener une rétro-analyse numérique visant à recréer les conditions d'ovalisation mesurées sur les anneaux de voussoirs au droit de la première faille principale.

Les résultats de cette rétro-analyse ont été, par la suite, utilisés pour le dimensionnement du revêtement à mettre en place dans les zones de faille au droit du futur tube Nord du tunnel de base.

Cette approche a rendu possible une optimisation substantielle du projet du tube Nord. En effet, elle a permis de passer d'un revêtement en double anneau (voussoirs préfabriqués + coque interne en béton coffré) à un revêtement en simple anneau en voussoirs préfabriqués. Cette évolution de conception comporte plusieurs avantages, notamment :

- La réduction du coût du tube Nord dans ce secteur
- La réduction de la section d'excavation
- La simplification de la logistique de chantier, grâce à la suppression de l'anneau interne en béton coffré.

Pour ce qui concerne le tube Sud, les anneaux de voussoirs déjà en place assurent une fonction de soutènement et n'ont pas été conçus pour reprendre les charges à long terme, ni pour résister aux incendies. Leur ovalisation et leur endommagement lors de la traversée des zones failles, ont d'ailleurs confirmé la nécessité d'un deuxième anneau en béton coffré pour la phase d'exploitation. La rétro-analyse a permis une optimisation de cet anneau interne avec une réduction de l'épaisseur minimal de 75cm à 55cm.

8 Références

Gamba, F. et al. 2019. Presentation of the successful crossing by the "Federica" TBM of a geological accident in Saint-Martin-La-Porte construction site. Tunnel and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archaeology, Architecture and Art – Peila, Viggiani & Celestino (Eds). Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-38865-9.

Guglielmetti, V. et al. 2007. Mechanized Tunneling in Urban Areas – Design Methodology and Construction Control. Taylor & Francis, London.

Hoek, E. et al. 1983. Strength of jointed rock masses. Géotechnique, Vol.23, No. 3, 1983, pp. 187-223.

Hoek, E. et Marinos, P. 2000. Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses. Tunnels and Tunnelling International, Part 1, 32(11), 45-51; Part 2, 32(12), 33-36.

RS2 Manuals. RS2 Model – Material Properties – Elastic Properties.

FLAC 3D Manuals, Version 5.0, Theory and Background.