

Rétroanalyse du creusement au tunnelier dans le massif fortement déformable du tunnel du Fréjus sous forte couverture

SEMERARO Martino, *Systra, Paris, France*

BESSION Alain, *Razel-Bec, Saclay, France*

VINNAC Audrey, *Systra, Paris, France*

SCHIVRE Magali, *Systra, Paris, France*

RAMOND Patrick, *Razel-Bec, Saclay, France*

BOCHON Alain, *Systra, Paris, France*

BÄPPLER Karin, *Herrenknecht, Schwanau, Allemagne*

Résumé

La galerie du tunnel autoroutier du Fréjus ($L \approx 12$ km, $\varnothing_{\text{utile}}$ intérieur 8,00 m) est actuellement en cours de construction, et le premier lot de 6,5 km est achevé. Le tunnel est situé dans le massif des schistes lustrés de la zone Piémontaise, caractérisé par une forte anisotropie et une schistosité parallèle à l'axe du tunnel, allant jusqu'à des couvertures de 1800 m. La conception et le choix des méthodes ont pu bénéficier de l'expérience acquise sur le chantier du tunnel autoroutier, qui sert d'un point de vue géologique de galerie de reconnaissance du massif. Le creusement est effectué avec un tunnelier roche dure de type bouclier à simple jupe pour la rencontre de terrains affectés par de grandes déformations, posant un revêtement de 40 cm par anneaux de voussoirs préfabriqués. Cet article présente la conception spécifique du tunnelier pour répondre à ces problématiques particulières, puis le phénomène de flambement immédiat de bancs de schistes lors de l'excavation qui a induit un chargement dissymétrique, conduisant à une fissuration du revêtement dans certaines zones. Les retro analyses présentées ont permis de contribuer à une meilleure maîtrise des risques avec en particulier la caractérisation du phénomène, la justification des actions mises en place pour anticiper les problèmes. Ceci a permis l'activation des adaptations de méthodes sur le tunnelier sans compromettre les cadences d'avancement du tunnelier.

Abstract

The safety tunnel of the existing Frejus Highway Tunnel ($L \approx 13$ km, \varnothing_{int} 8,00 m) at the French-Italian border, in the Western Alps, is currently under construction and the first 6.5-km Lot is successfully completed. The tunnel is excavated through the schistose formation of the "Piémontaise" zone, characterized by an anisotropic behavior and a schistosity almost parallel to the tunnel axis under high cover (1800 m locally). The design and the choice of the construction methods were made taking into consideration the construction experience of the adjacent highway tunnel excavated in conventional method in the '80s and used as a major reference for defining the geological conditions. The excavation with a hard rock, single shield TBM with a specific design suited for highly deformable rocks combined with a 0.40 m-thick precast lining were retained. The paper presents the TBM design conceived to cope with these specific problems. Then, the buckling phenomenon of the schist inducing asymmetrical convergences and loading on the lining with consequent localized cracks is presented. The back-analysis described in the paper allowed responding to the identified risks by interpreting the encountered behavior in the most critical sections, anticipating problems in the sections still to be excavated, and adapting the countermeasures during construction. The technical follow-up deployed during construction led to adapt the excavation procedures without impacting on the TBM advancement rates.

Rétroanalyse du creusement au tunnelier dans le massif fortement déformable du tunnel du Fréjus sous forte couverture

SEMERARO Martino, *Systra, Paris, France*

BESSION Alain, *Razel-Bec, Saclay, France*

VINNAC Audrey, *Systra, Paris, France*

SCHIVRE Magali, *Systra, Paris, France*

RAMOND Patrick, *Razel-Bec, Saclay, France*

BOCHON Alain, *Systra, Paris, France*

BÄPPLER Karin, *Herrenknecht, Schwanau, Allemagne*

1 Introduction

1.1 Contexte général du projet

La construction du tunnel routier du Fréjus entre la France et l'Italie a permis de répondre à un besoin croissant d'échanges commerciaux à la fois régionaux et internationaux entre les deux pays. Ce tunnel monotube long de 13 km creusé entièrement en méthode conventionnelle a été mis en service en 1980, il est concédé à deux sociétés : la SFTRF (Société Française du Tunnel Routier du Fréjus) et la SITAF (Società Italiana per il Traforo Autostradale del Frejus).

Depuis l'incendie dans le tunnel du Mont-Blanc en 1999, la législation en matière de sécurité dans les tunnels a subi d'importantes évolutions. La directive Européenne 2004/54/EC du 29 Avril 2004 concernant les exigences de sécurité applicables aux tunnels du réseau routier transeuropéen prévoit notamment qu'au plus tard le 30 Avril 2014, tous les tunnels en exploitation disposent d'issues de secours espacées de 500 m maximum. Pour répondre à cette norme, les sociétés concessionnaires du tunnel routier du Fréjus ont prévu de construire une galerie de sécurité parallèle au tunnel existant. Lors du sommet franco-italien du 3 décembre 2012, les premiers ministres italien et français ont approuvé la mise en circulation de la galerie de sécurité qui transforme de fait le tunnel du Fréjus en un bitube à circulation monodirectionnelle dans chaque tube. La liaison entre les deux tunnels sera assurée par 34 rameaux espacés de moins de 400m et par 9 by-pass carrossables. De plus, le projet prévoit la création de huit stations techniques et de deux usines de ventilation permettant la mise aux normes des équipements. L'entraxe moyen entre le tunnel routier et la galerie est de 50 m.



Figure 1. Vue en plan du projet

Les travaux de la galerie ont débuté en décembre 2009. Les 650 premiers mètres ont été excavés en méthode conventionnelle. Le tunnelier a été assemblé dans une chambre souterraine de dimensions importantes (section d'environ 280 m²) réalisée dans l'alignement de la galerie de sécurité (cf. photos ci-dessous en figure 2). Le creusement au tunnelier a débuté en juillet 2011 et s'est achevé pour le Lot 1 Génie civil côté France en février 2013 au PM 6 430. Le creusement s'est ensuite poursuivi en Italie. En mars 2014 le tunnelier se situait au PM 9 700.

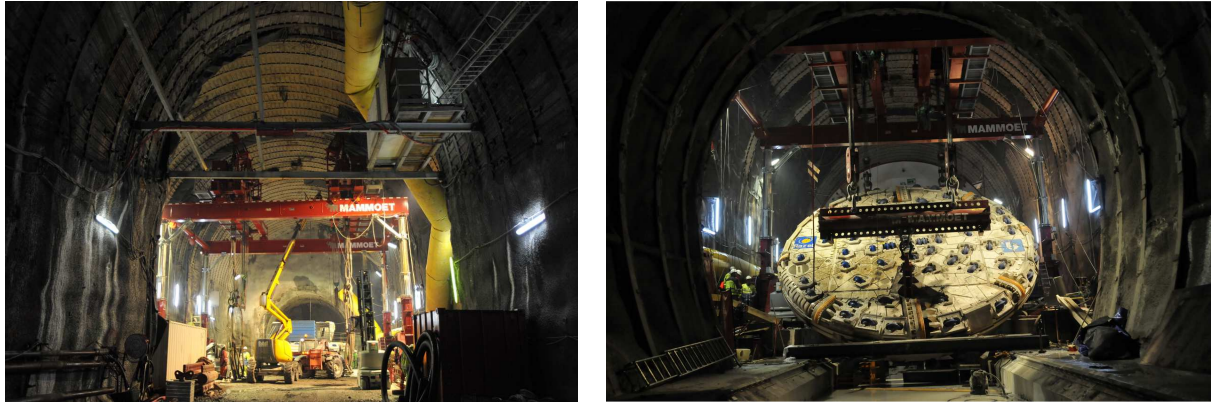


Figure 2. Montage du tunnelier dans la chambre souterraine

1.2 Contexte géologique

Le tunnel routier et la galerie de sécurité sont situés principalement dans le massif des schistes lustrés de la zone Piémontaise dont la couverture maximale est de 1 800 mètres au droit de la pointe du Fréjus. Cette zone est caractérisée par une séquence de calcschistes fortement lités (ou schistes lustrés). La schistosité est orientée parallèlement à l'axe du tunnel routier et présente un pendage moyen d'environ 45°. Cette schistosité influence le comportement mécanique des calcschistes par l'affaiblissement important de l'angle de frottement le long des plans de schistosité et sont caractérisés par une importante zone de faiblesse (en particulier sous forte couverture) le long des plans de schistosité. D'un point de vue structural, quatre familles de discontinuité ont été identifiées (Beau et al. 1980).

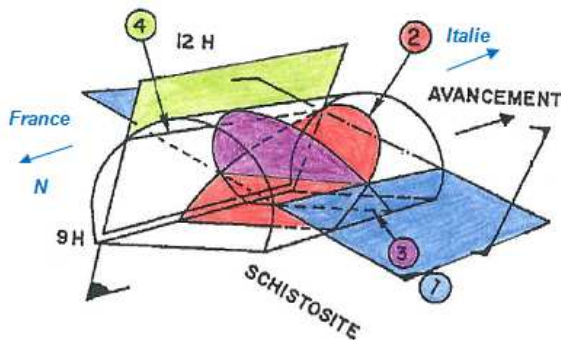


Figure 3. Représentation des familles de discontinuité

Famille	Type	Orientation/ Pendage
N°1	Schistosité	N270°-N315°/25°-70°
N°2	Diaclases	N360°/45°
N°3	Fractures	N180°/45°
N°4	Discontinuités	N90°/50°-70°

Le retour d'expérience sur l'excavation du tunnel routier a mis en évidence une anisotropie de l'état de contrainte (Stragiotti et al. 1979). Les rétro-analyse des mesures de convergence et des contraintes in-situ dans le tunnel routier ont permis d'estimer le rapport entre les contraintes principales compris entre 1,2 et 1,4 (σ_{\max} perpendiculaire à la schistosité).

Pendant le creusement du tunnel routier, les principales venues d'eau caractérisées par de faibles débits (au maximum 7 l/s) étaient localisées dans des secteurs de rocher très fracturé et près des zones de faille répertoriées dans l'unité Piémontaise. Ces informations se sont confirmées durant le creusement du Lot 1 où de faibles venues d'eau sont apparues.

2 Une conception anticipée

2.1 Rétro-analyses du tunnel routier

Le tunnel routier a été creusé parallèlement au plan de schistosité. Pendant sa construction, de grandes déformations des calcschistes ont été observées caractérisées par un flambement des bancs schisteux et par des convergences évolutives dans le temps.

L'auscultation du tunnel routier a mis en évidence le rôle déterminant de l'anisotropie de structure des schistes lustrés sur leur comportement mécanique mais aussi l'influence de la composition

minéralogique, du degré de tectonisation et des variations de l'état de contraintes naturelles du massif sur l'évolution des déformations.

Les convergences mesurées variaient entre 15 et 60 cm sur le diamètre et ont montré de grandes déformations du côté ouest du tunnel, perpendiculairement aux plans de schistosité où le phénomène de flambement s'est manifesté (figure 4). Une zone plastique moyenne de 3-4 m environ s'est développée autour de l'excavation, avec une extension maximale de 10 m.

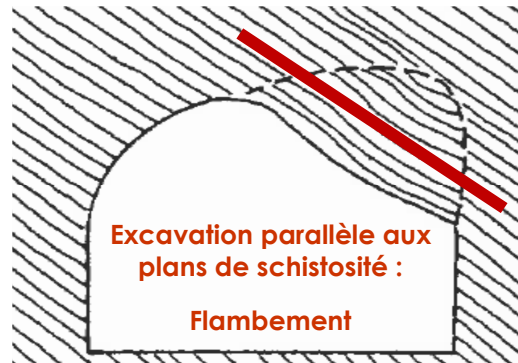


Figure 4. Représentation du phénomène de flambement dans le tunnel routier

La distance d'influence du front de taille était de 50 à 70 m. Au-delà de cette distance, l'évolution des convergences diminuait mais se poursuivait tout de même sans qu'aucune stabilisation ou limite asymptotique n'ait pu être atteinte. La durée du processus de stabilisation a été estimée à environ 1 000 jours après l'excavation (Simonnet et al. 2011).

2.2 Un tunnelier et un revêtement adaptés

Le dimensionnement du tunnelier a pris en compte cette expérience du tunnel routier et des déformations induites sur le soutènement et le revêtement. Le tunnelier retenu est un tunnelier roche dure de type bouclier de 9,46 m de diamètre, à simple jupe et à appui longitudinal, adapté aux grandes déformations. Le revêtement est composé d'anneaux de voussoirs de 40 cm d'épaisseur (Simonnet et al. 2011). Le dimensionnement du tunnelier et du revêtement sont notamment caractérisés par :

- Une poussée de déblocage du tunnelier de 100 000 kN et d'un couple atteignant 21 300 kN.m afin de se prémunir de tout risque de coincement de la machine dû à la grande déformabilité du massif ;
- Un bouclier présentant une conicité importante de 60 mm sur le diamètre afin de tenir compte du risque de convergences. Sa longueur a également été optimisée (11,20 m) ;
- Des possibilités de sur-excavation permettant le passage d'une surcoupe nominale de 90 mm à une surcoupe intermédiaire de 190 mm (+100 mm sur le diamètre) et une surcoupe maximale de 290 mm (+200 mm sur le diamètre) ;
- La capacité de boulonner le terrain radialement et de réaliser des sondages à l'avancement ;
- Un important vide annulaire allant jusqu'à 475 mm permettant la convergence du terrain avant l'installation du revêtement ;
- La possibilité de mise en place d'un produit de remplissage du vide annulaire (billes d'argile) compressible dans les zones fortement convergentes en lieu et place de la gravette qui est prévue pour les zones courantes non convergentes ;
- 2 types de voussoirs initialement prévus dont les ratios d'acier sont de 85 kg/m³ (voussoirs de type 1) et 130 kg/m³ (voussoirs renforcés de type 2) ;
- Des outils de mesures spécifiques comme la mesure de l'espace annulaire en différents points du bouclier à l'aide de vérins, appelés fontimètres.

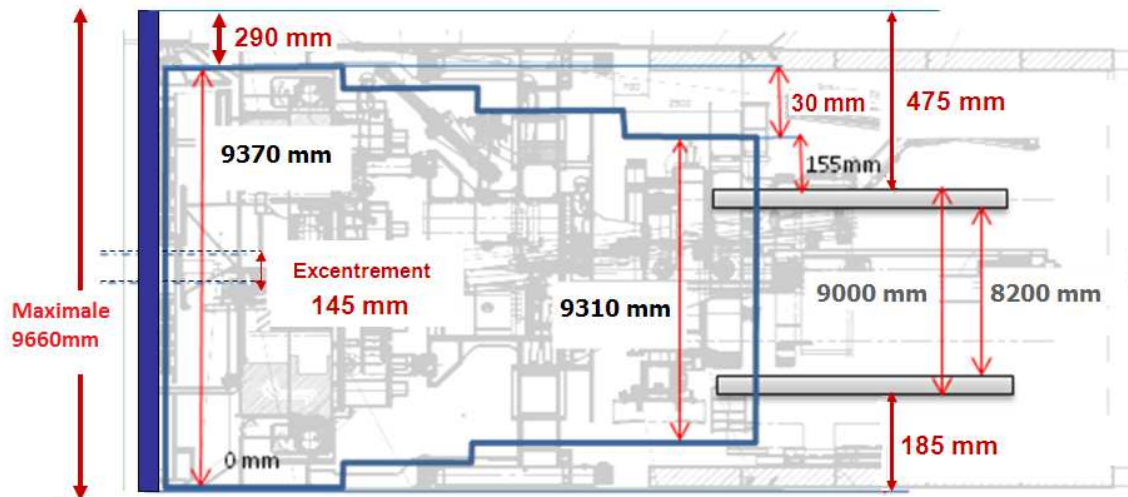


Figure 5. Dimension du bouclier, surcoupe maximale, conicité et vide annulaire (source : Simonnet et al. 2011)

2.3 Un pilotage prévisionnel du tunnelier en adéquation avec le comportement du terrain

Préalablement au démarrage du creusement, une maquette géotechnique synthétisant l'ensemble des données géotechniques disponibles a été établie. Elle permet en particulier d'anticiper les conditions de creusement envisageables (poussée totale, frottement, efforts sur le revêtement...) et de fixer de manière prévisionnelle les conditions de mise en œuvre des différents outils disponibles (choix de la surcoupe, du type de voussoirs, reconnaissances spécifiques, instrumentation...).

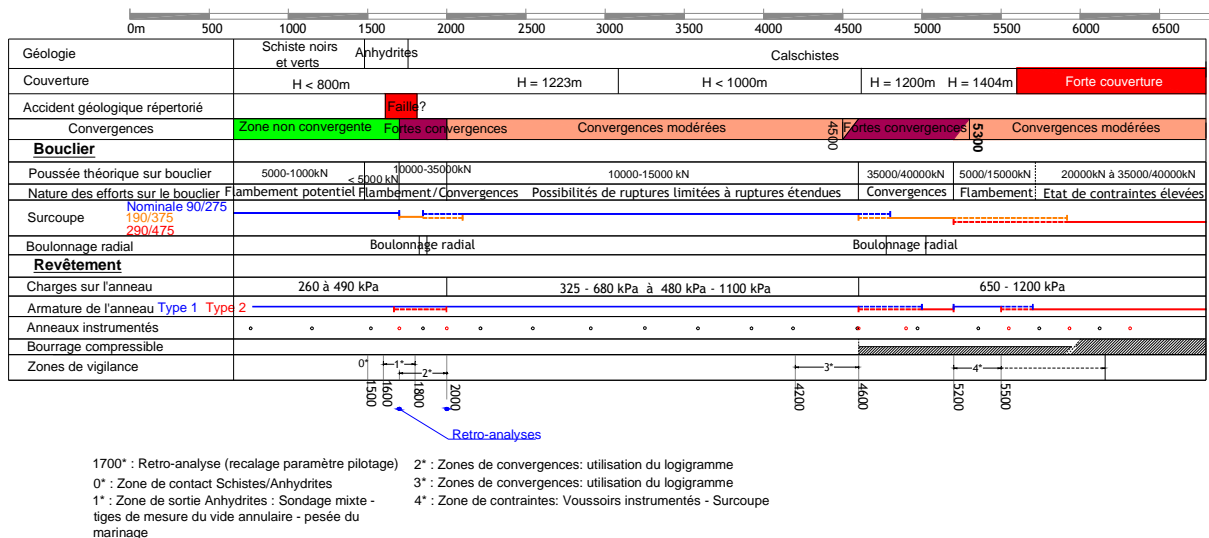


Figure 6. Maquette prévisionnelle de pilotage du tunnelier

Cette maquette a conduit à la définition de quatre « zones de vigilance » pour lesquelles les conditions de creusement attendues peuvent conduire à la mise en œuvre de mesures spécifiques :

- Les deux premières zones (PM 1 450 à 1 500 et PM 1 600 à 1 800) sont corrélées au changement de faciès (interfaces avec les anhydrites). Pour ces deux zones, des fortes convergences ainsi que des possibilités de rupture importantes sont envisageables. Il est donc prévu la mise en œuvre de la surcoupe intermédiaire ainsi qu'un boulonnage radial localisé des terrains depuis le bouclier.
- Les zones suivantes (PM 4 200 à 4 600 et PM 5 200 à 5 500) précèdent les zones de fortes convergences telles qu'elles ont été rencontrées lors du creusement du tunnel routier ainsi que les zones de forte couverture (supérieure à 1 400 m). On prévoit pour ces zones l'utilisation de la surcoupe intermédiaire, voire de la surcoupe maximale ainsi que le recours aux voussoirs renforcés (type 2).

2.4 Modalités de suivi des conditions de creusement et définition de valeurs seuils

L'adaptation en temps réel des méthodes aux conditions de creusement ainsi que la décision de mise en œuvre des différentes contre-mesures nécessitent la mise en œuvre sur le chantier d'un dispositif d'auscultations complet des travaux d'excavation. Ces auscultations concernent principalement les points suivants :

- Suivi des paramètres du tunnelier : l'ensemble des données produites par le tunnelier relatives aux conditions de creusement (frottement, poussée totale, couple, volume de remplissage du vide annulaire, et mesures du vide annulaire par les fontimètres) sont à analyser quotidiennement et à corrélérer aux prévisions.
- Suivi du revêtement : mise en place de nombreux anneaux instrumentés (jauges de contraintes noyées dans le béton), d'extensomètres au droit de chaque rameau (tous les 400m environ), et mesure de la convergence des anneaux tous les 50 m.
- Investigations géologiques : en complément des sondages destructifs de reconnaissance systématique (L variant de 30 à 60m, avec un recouvrement de 15m ; réalisation durant le poste de maintenance qui dure 8h), des carottages radiaux seront réalisés afin de prélever des échantillons de roche. La connaissance du comportement du massif sera par ailleurs complétée par des inspections visuelles du vide annulaire (au travers de trappes ménagées dans le bouclier) ou à l'endoscope au travers des voussoirs.



Trappe dans le bouclier

Carottage radial

Vide annulaire à l'endoscope

Figure 7. Illustrations des auscultations mises en place

L'analyse quotidienne de ce faisceau d'informations collectées sur le terrain permet d'une part d'améliorer la compréhension des phénomènes à l'œuvre et d'autre part de nourrir le processus de prise de décision menant à l'activation des différentes contre-mesures (Schivre et al. 2014). En particulier, il a été mis en œuvre un tableau de bord quotidien de suivi des paramètres de creusement permettant de comparer les conditions constatées aux seuils de vigilance et d'alerte redéfinis à l'issue du franchissement de la première zone de convergence (Tableau 1).

Tableau 1. Tableau de suivi quotidien des paramètres de creusement associés à des seuils prédéfinis

Date :		16/11/2011				Anneaux		525 à 531			
Paramètres étudiés	U	Seuil de vigilance		Seuil d'alerte		16/11/2011		15/11/2011	Comparaison J/J-1		
		mini	max	mini	max	Valeur mini du jour J	Valeur maxi du jour J	Moyenne de J	Moyenne de J-1	% variation	
Verin R1	mm	<>	80 200	<>	50 300	109	149	129	106	↑ 21%	
Verin R2	mm	<>	80 200	<>	50 300	35	147	107	22	↑ 379%	
Verin R3	mm	<>	80 200	<>	50 300	73	140	119	119	→ 0%	
Verin R4	mm	<>	80 200	<>	50 300	73	129	110	111	→ -1%	
Verin R5	mm	<>	80 200	<>	50 300	101	144	118	121	→ -3%	
Verin L1	mm	<>	80 200	<>	50 300	137	188	165	159	→ 4%	
Verin L2	mm	<>	80 200	<>	50 300	159	179	169	160	→ 6%	
Verin L3	mm	<>	80 200	<>	50 300	152	187	171	161	→ 6%	
Verin L4	mm	<>	80 200	<>	50 300	159	175	167	158	→ 5%	
Verin L5	mm	<>	80 200	<>	50 300	151	164	159	152	→ 4%	
Force de poussée totale	KN	>	30 000	>	35 000	19 000	29 900	23 986	25 664	→ -7%	
Force de frottement	kN	>	10 000	>	12 500	10 000	13 800	11 743	14 927	↓ -21%	
Force de poussée sur le terrain	kN	<	10 000	<	8 000	9 800	15 800	12 400	11 082	↑ 12%	
Poids de marinage	T	>	210	>	220	185	203	193	203	→ -5%	
Vitesse de creusement	mm/min	>	60	>	75	64	84	77	71	→ 8%	

<	Seuil mini
>	Seuil maxi

	Alerte
	Vigilance
	OK

3 Retour d'expérience du Lot 1, lors du creusement des 6 premiers kilomètres

3.1 Problématiques rencontrés et caractérisation du phénomène

Un phénomène de flambement immédiat de bancs de schistes lors de l'excavation a induit un chargement dissymétrique des anneaux de voussoirs, conduisant à une fissuration du revêtement dans certaines zones.

En octobre 2011, des fissures sur les anneaux de voussoirs ont été constatées en rein droit (entre 1h et 2h) de la galerie de sécurité entre les PM 1 335 et 1 410 alors que le front de taille était au PM 1 430. Ce phénomène s'est ensuite étendu sur un linéaire important du tunnel. Dans certains secteurs, la fissuration s'est également développée en base de piédroit gauche où elle est dans certains cas plus développée qu'en rein droit.

La conception du revêtement avec un décalage par demi-voussoir entre anneaux contigus a provoqué une fissuration des anneaux présentant un voussoir entre 1h et 2h (anneaux pairs) et une ouverture ainsi que des désaffleurements importants pour les anneaux présentant un joint en rein droit (anneaux impairs).

Les fissures sont longitudinales et varient de l'état de microfissures (ouverture inférieure à $1/10^{\text{ème}}$ de mm) jusqu'à des fissures très visibles dont l'ouverture est supérieure à 1 mm. L'étendue de la zone fissurée varie selon les anneaux de quelques dizaines de centimètres à 4m environ de circonférence.

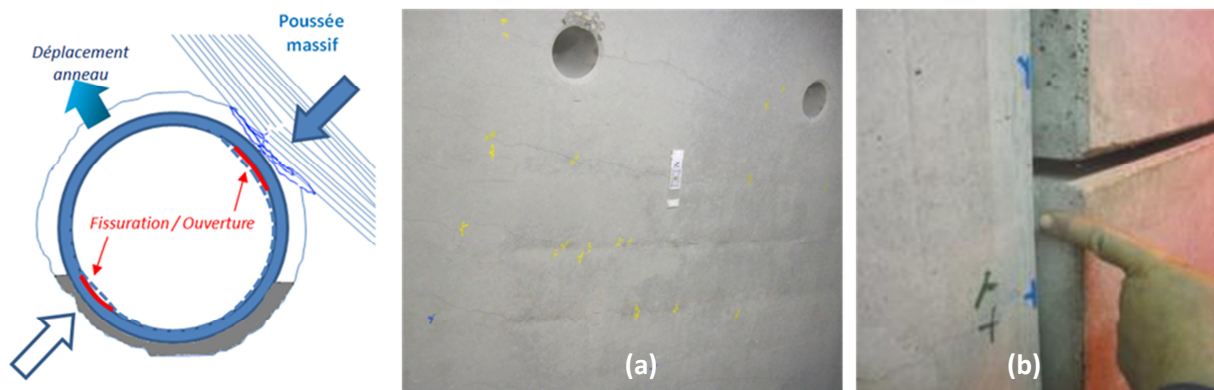


Figure 8. Phénomène de flambement immédiat des schistes et conséquences sur l'anneau : fissuration pour les anneaux pairs (a) et ouverture des joints pour les anneaux impairs (b)

3.2 Contre-mesures lors du creusement et adaptation des méthodes en temps réel

L'apparition du phénomène de flambement ainsi que la fissuration des voussoirs associée a conduit à la mise en œuvre d'un certain nombre de mesures visant à réduire les conséquences de ce phénomène. Parmi ces contre-mesures, certaines avaient été prévues dès la phase de conception du projet tandis que d'autres ont dû être développées sur le chantier au fur et à mesure que la compréhension des phénomènes à l'œuvre se précisait.

3.2.1 Première zone de convergence (du PM 1180 au PM 2980) et mesures implémentées

Le phénomène de fissuration des anneaux a commencé à être constaté dans une zone qui n'était initialement pas identifiée comme une zone requérant des précautions particulières. Il était par ailleurs associé à une augmentation soudaine du frottement sur la machine requérant la mise en œuvre d'efforts de poussée importants (plus de 50 000 kN). Ces fortes valeurs de frottements associées aux valeurs des fontimètres relativement faibles du côté droit du bouclier, traduisent un flambement prononcé des bancs schisteux dans ce secteur. Les carottages radiaux réalisés dans cette zone et illustrés sur la figure 7 confirment cette hypothèse. Par ailleurs, les faibles valeurs de pénétration enregistrées révèlent un terrain relativement dur dans cette zone.

La première contre-mesure mise en œuvre a été la poursuite de l'avancement avec des voussoirs renforcés de type 2 capables de supporter l'accroissement des efforts de poussée.

Pour réduire le risque de blocage du tunnelier, l'augmentation de diamètre de la roue de coupe de 10cm a été mis en œuvre afin d'augmenter le vide annulaire et par conséquent de disposer d'un espace supplémentaire permettant d'absorber les convergences avant que le terrain ne vienne enserrer le bouclier.

Suite à la persistance du phénomène de fissuration, il a alors été décidé de mettre en œuvre un boulonnage radial des terrains composé tout d'abord de 3 puis de 9 boulons Swellex par anneau de 4 m de longueur. Ce boulonnage est réalisé au travers du bouclier et posé à 4 m du front. Cependant cette mesure implique des cadences d'avancement très faibles pour avoir une densité de boulonnage significative. Ceci nécessite d'interrompre les cycles de foration pour procéder à la mise en œuvre des boulons, mise en œuvre rendue particulièrement délicate par l'exigüité du poste de travail situé dans le bouclier.

Afin d'améliorer le confinement de l'anneau, une réflexion a été menée sur les matériaux et méthodes employés pour l'injection du vide annulaire.

La procédure de remplissage du vide annulaire prévue en phase de conception consistait en une injection immédiate du mortier semi-inerte depuis la jupe sur les 100° en radier, suivie par une injection de la gravette en deux phases distinctes (figure 9) : un premier remplissage à travers l'anneau N-4 entre 10h et 14h puis une deuxième phase de clavage exécutée à 12h depuis l'anneau N-7.

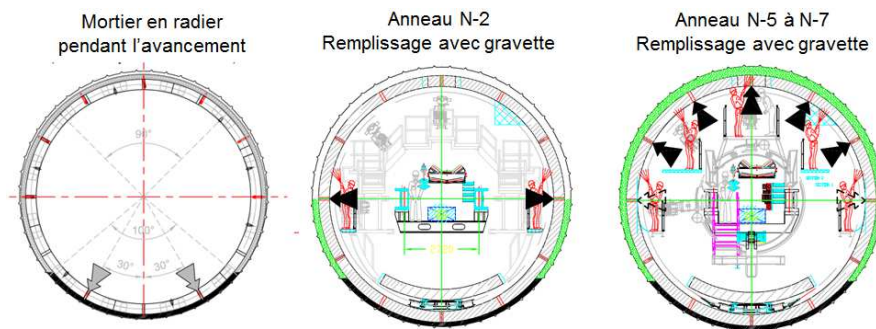


Figure 9. Procédure de remplissage du vide annulaire initiale

Cette modalité de remplissage retardée de la gravette ne permet pas une butée immédiate de l'anneau tandis que le phénomène de flambement est presque instantané. Cela conduit à des déplacements importants de l'anneau et à une augmentation des moments fléchissant. La fissuration est ainsi liée au faible confinement de l'anneau, en particulier, lors des premières heures alors que l'anneau sort de la jupe et qu'il est exposé aux sollicitations du terrain et que le vide annulaire qui l'entoure ne peut être intégralement comblé. La difficulté consiste alors à remplir complètement le vide annulaire avant la mise en charge de l'anneau.

Il s'agit donc à la fois de permettre le clavage au plus près du front de l'anneau et d'améliorer son confinement. La problématique de reflux de matériaux de remplissage du vide annulaire (gravette) vers le front le long du bouclier, est particulièrement accentuée ici par le vide annulaire et la conicité importante du tunnelier.

Ces deux objectifs ont été atteints en introduisant un remplissage de type mortier-gravette-mortier (figure 10) : la gravette est remplacée à 12h par du mortier. Le point d'injection de la gravette a été avancé à l'anneau N-2 de manière à améliorer le confinement de l'anneau immédiatement en sortie de jupe.

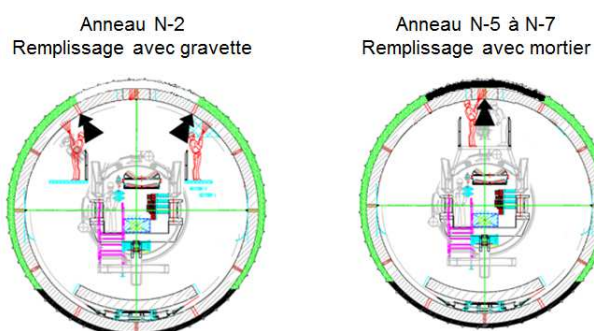


Figure 10. Procédure de remplissage du vide annulaire améliorée « mortier-gravette-mortier »

L'ensemble de ces mesures a été mis en œuvre graduellement. Sur la base des premières observations, il a été décidé de traverser le linéaire restant de la première zone de convergence en conservant l'application de ces contre-mesures (surcoupe intermédiaire +100 mm, voussoirs de type 2, remplissage mortier-gravette-mortier).

3.2.2 Seconde zone de convergence (du PM 4500 au PM 5300) et mesures implémentées

Parallèlement au franchissement de la première zone de convergence et à la mise au point des contre-mesures nécessaires à la maîtrise de la fissuration, une réévaluation des conditions de creusement dans la deuxième zone de convergence (attendue à partir du PM 4 500) a été menée. Cette réévaluation, consistant à projeter dans le contexte particulier de cette seconde zone (forte couverture, fortes convergences constatées lors du creusement du tunnel historique) les conditions effectivement rencontrées dans la première zone de convergence, a conduit à retenir la stratégie suivante :

- Développement d'un anneau de type 3 (Tirpitz et al. 2011) au ferrailage particulièrement renforcé (ratio d'acier de 285 kg/m³) de manière à pouvoir reprendre un chargement associant l'intensité des efforts prévus dans cette zone de forte couverture à la dissymétrie constatée dans la première zone
- Utilisation de la surcoupe intermédiaire (+100 mm)
- Poursuite du remplissage du vide annulaire en mode mortier-gravette-mortier ; à noter que l'utilisation d'un remplissage compressible ne s'est pas avéré nécessaire
- Recours à un avancement continu (organisation de la production en 7 jours sur 7 au lieu de 5 jours sur 7) afin de supprimer les arrêts de week-end pendant lesquels le bouclier se trouve sous un massif convergent non soutenu et ainsi diminuer les risques de blocage de la machine.

Durant le creusement de cette zone, l'augmentation de la poussée totale et des frottements a été moins importante par rapport à celle relevée pour la première zone de convergence. En revanche, les mesures des fontimètres situés à droite ont considérablement diminué alors que le diamètre d'excavation est plus important dans cette zone (du fait de l'activation de la surcoupe intermédiaire). Le phénomène de flambement semble donc être également présent. Par ailleurs, la pénétration augmente sensiblement. Ceci traduit la présence d'un terrain plus tendre par rapport à celui traversé dans la zone précédente mais également un terrain plus hétérogène révélé par l'irrégularité des mesures.

Cette deuxième zone de forte convergence se révèle être un contexte plus favorable pour le tunnelier ainsi que pour le revêtement grâce aux combinaisons de mesures mises en place dans ce secteur.

4 Rétro-analyses pour quantifier l'efficacité des contre-mesures

Un des buts des rétro-analyses présentées dans cet article est de se doter d'une validation quantitative de l'efficacité des mesures implémentées en cours de creusement afin de pouvoir mieux calibrer leur efficacité en vue de la poursuite du creusement du tunnelier voire d'extrapoler leur application pour d'autres chantiers. Ceci permet de contribuer à une meilleure maîtrise des risques avec en particulier la justification des actions mises en place et la garantie d'une meilleure anticipation (Vinnac et al. 2014).

4.1 Choix des données pertinentes

Afin d'analyser l'état du revêtement et de disposer d'un moyen de comparaison objectif des différents tronçons de la galerie, un système de cotation de la fissuration a été établi prenant en compte l'ouverture des fissures, leur densité, et leur localisation par voussoir.

La cotation d'un anneau est comprise entre 10 pour un anneau légèrement fissuré à 100 pour un anneau fortement fissuré. Des majorations ont été appliquées si l'anneau considéré présente un ou plusieurs secteurs fissurés et si les anneaux adjacents sont fissurés ou non. La matrice ci-dessous présente les valeurs retenues pour quantifier le degré de fissuration et donne un cadre complet de l'état de fissuration des voussoirs sur le Lot 1. Trois catégories ont été identifiées :

- en vert, il s'agit d'une situation en principe non préoccupante qui ne nécessitera pas ou peu de traitement et un suivi normal ;
- la couleur orange correspond à un état intermédiaire qui pourra donner lieu selon les cas à un suivi renforcé ou à un renforcement de l'anneau ;
- en rouge, on identifie un état dégradé qui nécessitera manifestement un renforcement adapté.

Sur le Lot 1, 55% des anneaux sont affectés par le phénomène de fissuration dont 30% correspondent à un degré Vert, 21% à un degré Orange et 4% à un degré rouge.

Tableau 2. Système de notation de la fissuration

		Microfissures			Fissures visibles			Fissures très visibles			Fissures très visibles : \geq à 1 mm		
		< 5 fissures	5 à 20 fissures	> 20 fissures	< 5 fissures	5 à 20 fissures	> 20 fissures	< 5 fissures	5 à 20 fissures	> 20 fissures	< 5 fissures	5 à 20 fissures	> 20 fissures
Anneau fissuré entouré d'anneaux non fissurés	Fissuration dans un seul secteur	10	12	14	18	22	24	30	32	34	36	38	40
	Fissuration dans deux secteurs ou plus	15	18	21	27	33	36	45	48	51	54	57	60
Anneau fissuré au contact d'un anneau fissuré	Fissuration dans un seul secteur	20	24	28	36	44	48	60	64	68	72	76	80
	Fissuration dans deux secteurs ou plus	25	30	35	45	55	60	75	80	85	90	95	100

Les paramètres principaux du tunnelier pris en compte pour la rétro-analyse ont été les suivants :

- la poussée totale des vérins (kN);
- les frottements (kN);
- la pénétration (mm/rev) caractérisant la qualité du massif rencontré : des valeurs élevées de pénétration correspondent à un sol tendre tandis que des valeurs faibles traduisent un terrain dur. Des valeurs variables correspondent en revanche à un terrain hétérogène ;
- les valeurs des fontimètres mesurant la distance terrain-bouclier (mm). Ces mesures sont exécutées à l'arrêt du tunnelier pendant le montage des anneaux. Afin de mettre en évidence les déformations dissymétriques du massif, les mesures des fontimètres de droite ont été séparées de celles de gauche.

D'autres paramètres ont également été enregistrés mais semblent moins pertinents pour la rétro-analyse. Par exemple, le volume de remplissage du vide annulaire n'était pas significatif car les quantités mesurées étaient souvent inférieures aux valeurs théoriques du fait des difficultés de remplissage du vide annulaire et de la présence de blocs entre le terrain et l'extrados du revêtement.

Par ailleurs, l'emploi des contre-mesures implémentées qui sont décrites dans les §3.2.1 et 3.2.2 est reporté sur la maquette de rétro-analyse du lot 1 (figure 11).

4.2 Justification des actions mises en place pour anticiper les problèmes.

Afin de pouvoir qualifier l'efficacité des contre-mesures mises en place sur le Lot 1, un système de références a été créé permettant de caractériser le contexte de creusement via les paramètres enregistrés par le tunnelier. Ce système est basé sur les seuils des paramètres du tunnelier initialement proposés lors du creusement de la première zone de convergence et qui ont été revus en fonction de la fissuration apparue sur le Lot 1 (légende du tableau 3). Ce système permet d'identifier la qualité du massif (dur, intermédiaire ou tendre) ainsi que son comportement lors de l'excavation au tunnelier (favorable, moyen ou défavorable). La tendance des paramètres du tunnelier et l'indicateur de la qualité du massif sont ainsi représentés dans le tableau 3 proportionnellement au linéaire de chaque zone.

Du fait d'une mise en œuvre graduelle des contre-mesures, l'évaluation de leur contribution à la diminution de la fissuration est possible en comparant plusieurs zones entre elles tout en prenant en compte le contexte d'excavation et la fissuration apparue sur le Lot 1

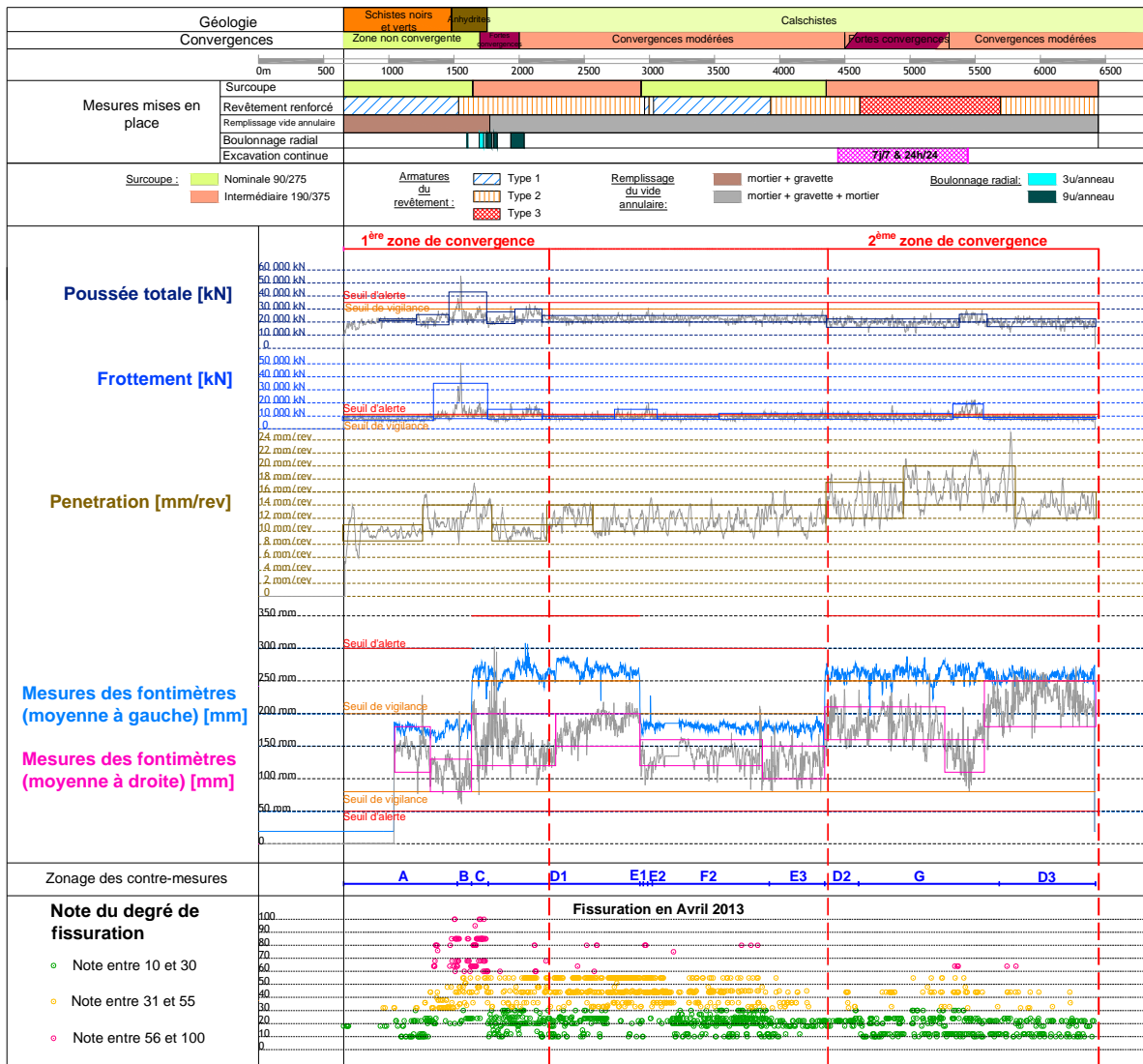


Figure 11. Maquette de rétro-analyse du Lot 1

Le remplissage du vide annulaire en mode mortier-gravette-mortier constitue une optimisation pertinente du mode de remplissage initialement prévu dont l'efficacité est validée en comparant les zones C et D1 où une évolution du degré de fissuration est apparue seulement en zone C pour un contexte d'excavation similaire dans les deux zones.

A partir de la mise en place du remplissage du vide annulaire en mode mortier-gravette-mortier, il a été possible de mettre en évidence l'efficacité de la surcoupe intermédiaire qui permet de limiter les effets néfastes du flambement du terrain sur le revêtement à condition que sa mise en place soit effectuée en amont des zones à risques. Ceci est validé par la comparaison des zones E3 et D3.

Dans le cas d'un terrain présentant un phénomène de flambement prononcé, le renforcement du ferrailage des voussoirs s'avère également être une mesure efficace à mettre en place. En analysant le degré de fissuration sur la figure 11, la comparaison des zones F2 et E3 d'une part et des zones D1 et G d'autre part permet de mettre en évidence l'efficacité des voussoirs de type T2 et T3 puisque, pour un contexte d'excavation similaire voire plus défavorable, la mise en place des voussoirs renforcés s'assortit d'une diminution de la fissuration.

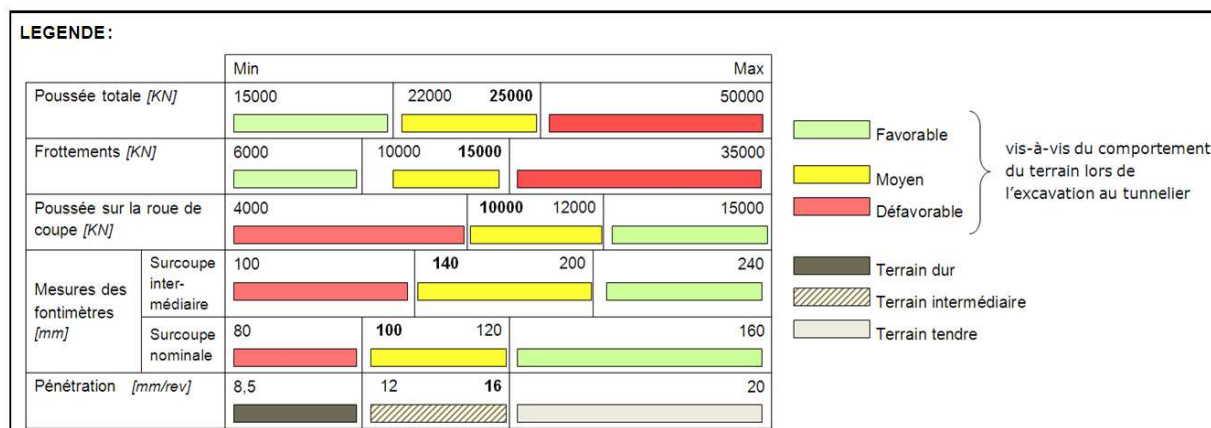
La mise en place du boulonnage est une mesure pouvant réduire la fissuration des voussoirs. Cependant cette mesure implique des cadences d'avancement très faibles. Le boulonnage, en ralentissant le tunnelier, allonge alors la durée pendant laquelle les anneaux venant d'être posés se trouvent dans une situation transitoire où ils sont soumis aux sollicitations dissymétriques du terrain et sont confinés de manière imparfaite. Il est donc préférable d'éviter cette situation.

Tableau 3. Zones de combinaison des contre-mesures vs Tendance des paramètres du tunnelier

Zone		A	B	C	D1	E1	F1	E2	F2	E3	D2	G	D3
Contre-mesures	Surcoupe	Nominale	Nominale	Inter-médiaire	Inter-médiaire				Nominale	Nominale	Intermédiaire	Inter-médiaire	Inter-médiaire
	Type de voussoirs	T1	T2	T2	T2				T1	T2	T2	T3	T2
	Remplissage du vide annulaire	M-G*	M-G*	M-G*	M-G-M**				M-G-M**	M-G-M**	M-G-M**	M-G-M**	M-G-M**
	Excavation en continu										7/7&24h/24	7/7&24h/24	
Tendance des paramètres du tunnelier													
Frottements [KN]													
Poussée totale [KN]													
Poussée sur la roue de coupe [KN]													
Mesures des fontimètres [mm]													
Indicateur de la qualité du massif													
Pénétration [mm/rev]													

*M-G : Mortier-Gravette

**M-G-M : Mortier-Gravette-Mortier



L'activation de la surcoupe intermédiaire en amont avec la mise en place de voussoirs de type T3 et un mode de remplissage mortier-gravette-mortier associé à un creusement en continu est une combinaison efficace pour le passage de zones à forte convergence. Ceci s'est vérifié pour la 2^{ème} zone de convergence. Même si l'efficacité seule du creusement en continu n'a pu être mise en évidence, cette solution ne peut être écartée car elle permet tout de même de limiter le risque de coincement du tunnelier.

5 Conclusions

Le creusement du Lot 1 de la galerie du Fréjus de 6,5 km s'est achevé avec succès. Grâce au retour d'expérience de la construction du tunnel routier réalisé en méthode conventionnelle, le projet a été développé autour d'un modèle géologique fiable. Cette bonne connaissance du contexte géologique combinée avec les nouvelles technologies en matière de mécanisation ont permis de concevoir le creusement avec un tunnelier roche dure de type bouclier à simple jupe dans ce contexte difficile de déformations dissymétriques des schistes lustrés.

Un des points clef du succès du projet a été le dimensionnement spécifique du tunnelier et de son revêtement : poussée de déblocage élevée, forte conicité du bouclier, surcoupes, boulonnage, voussoirs renforcés, mode de remplissage du vide annulaire.

Cette réussite est due également à la définition au préalable d'une maquette de pilotage prévisionnelle du tunnelier et sa mise à jour au fur et à mesure de l'excavation, sur la base de la réponse du terrain, des procédures d'excavation identifiant des seuils pour les paramètres principaux, et des rétro-analyses effectuées en cours de chantier.

Une équipe d'ingénieurs dédiée au suivi technique des paramètres du chantier, travaillant en étroite collaboration avec les équipes sur site expérimentées ont permis cette continuité conception-réalisation, et d'obtenir ainsi une grande réactivité sur site pour implémenter les adaptations de méthodes requises.

Le processus de creusement industriel du tunnelier a atteint une cadence mensuelle moyenne de 400m/mois qui a été très peu affectée par la mise en place de l'activation de ces contre-mesures.

Les rétro-analyses détaillées menées ultérieurement ont pu mettre en évidence l'efficacité des choix retenus et des adaptations proposées en corrélant les paramètres du tunnelier et le phénomène de flambement.

6 Remerciements

Les auteurs voudraient remercier la SFTRF, Maîtrise d'ouvrage du Lot 1 ainsi que les équipes sur site de la Maîtrise d'œuvre I3S sous pilotage de SYSTRA, et de l'entreprise RAZEL-BEC pour leur coopération à la rédaction de cet article.

7 Références

- Simonnet, D. ; Miche, N. ; Mathieu, E. ; De Lorenzi, D. ; Chille, F. ; Schivre, M. ; Thone, M. 2011 *Galerie de sécurité du tunnel routier du Fréjus : rétro-analyse du chantier du tunnel routier pour le choix d'une méthode mécanisée de galerie en milieu fortement déformable*. AFTES.
- Tirpitz, E.-R. ; Karg, J. ; Ramond, P. 2013. *Sicherheitsstollen für den "Tunnel de Fréjus" – Erfolgreiche Anpassung eines TBM-Vortriebs an unvorhergesehenes Felsverhalten*. STUVA-Conference 2013. Forschung + Praxis Volume 45 by STUVA.
- Schivre, M.; Ramond, P.; Bochon, A.; Vinnac, A.; Bianchi, G.W.; Fuoco, S. 2014. *TBM excavation of the Frejus safety tunnel through highly deformable schistous rock mass under high rock cover*. ITA-AITES World Tunnel Congress 2014.
- Vinnac, A. ; Marcucci, E. ; Schivre, M. ; Ramond, P. ; Chiriotti, E. ; Fuoco, S. *Performance monitoring for back-analysis of hard rock TBM tunnelling: the case of the Frejus safety tunnel*. ITA-AITES World Tunnel Congress 2014.
- Tardáguila, I.; Celada, B.; Galera, J-M. *Geotechnical control during the excavation of the tunnel of Guadarrama*. ITA-AITES World Tunnel Congress 2007.
- Berest, P. ; Habib, P. ; Nguyen, M.D. 1980. *Tentative d'interprétation des mesures faites aux tunnels du Fréjus et du Gran Sasso*. Revue Française Géotechnique n°12.
- Beau, J.R. ; Cabanius, J. ; Courtecuisse, G. ; Fourmaintraux, D. ; Gesta, P. ; Levy, M. ; Néraud, C. ; Panet, M. ; Péra, J. ; Tincelin, E. ; Vouille, G. 1980. *Tunnel du Fréjus : les mesures effectuées sur le chantier français et leur application pour la détermination et l'adaptation d'un soutènement provisoire*. Revue Française de Géotechnique n°12.
- Lunardi, P. 1980. *L'application de la mécanique des roches aux tunnels : cas des tunnels du Gran Sasso et du Fréjus*. Revue Française de Géotechnique n°12.
- Levy, M. ; Matheron, P. ; Demorieux, J.M. ; Courtecuisse, G. 1979. *Les travaux du tunnel routier du Fréjus*. TRAVAUX. Juillet-Août 1979.
- Stragiotti, L. ; Armando, E. ; Barisone, G.P. ; Greco, O.DEL. ; Innaurato, N. ; Lunardi, P. ; Pelizza, S. ; Polino, R. ; Ventosi, U. 1977. *Essais et auscultations dans la conception et l'exécution de quatre tunnels dans les schistes lustrés de la vallée de Suse (Italie)*.