

ESSAIS ET AUSCULTATIONS DANS LA CONCEPTION ET L'EXÉCUTION DE QUATRE TUNNELS DANS LES SCHISTES LUSTRÉS DE LA VALLÉE DE SUSE (ITALIE)

Tests and site investigations in the design and construction of four tunnels bored in the calc-schists of Susa Valley (Italy)

In situ Versuche und Laborproben fuer die Entwerfung und den Bau von vier Tunnel im Kalkschiefer von Susatal (Italien)

L. STRAGIOTTI

Prof. Ing., Directeur de l' "Istituto di Arte Mineraria", Professeur de Principes de Géomécanique dans l'Ecole Polytechnique, Turin

E. ARMANDO

Prof. Ing., Professeur de Géophysique Appliquée dans l'Ecole Polytechnique, Turin

G.P. BARISONE

Dr. Ing., Adjoint de Géologie Appliquée dans l'Ecole Polytechnique, Turin

O. DEL GRECO

Dr. Ing., Adjoint de Principes de Géomécanique dans l'Ecole Polytechnique, Turin

N. INNAURATO

Prof. Ing., Professeur de Construction de Galeries dans l'Ecole Polytechnique, Turin

P. LUNARDI

Prof. Ing., Professeur de Consolidation des Roches et des Terrains dans l'Université de Florence, Responsable géotechnique du C.T.F. (Consorzio Traforo Fréjus)

S. PELIZZA

Prof. Ing., Professeur d'Exploitation des Mines dans l'Ecole Polytechnique, Turin

R. POLINO

Dr., Chercheur du CNR - Laboratoire pour la Géologie Appliquée à la planification routière, Padoue

U. VENTOSI

Dr. Ing., Technicien au Bureau Géotechnique de la Société Cogefar, Milan

RESUME:

La communication prend en considération toute une série de galeries en cours de creusement dans la Vallée de Suse (Turin): le Tunnel autoroutier du Fréjus (côté Italie), la contigue galerie d'exploration et deux tunnels ferroviaires à une voie pour le dédoublement de la ligne de chemin de fer Turin-Modane. Tous les quatre tunnels sont creusés dans la formation des schistes lustrés du Jura-Lias. La roche présente un comportement très différent d'une zone à l'autre, à cause de variations géo-structurales. Dans ce cadre on illustre les essais et auscultations effectués en cours de projet et d'exécution et on analyse les résultats techniques du creusement par rapport au comportement géomécanique et à l'anisotropie des schistes, au but d'en tirer des indications sur les paramètres les plus importants et sur l'efficacité des recherches.

SUMMARY:

The paper examines a lot of tunnels in course of construction in the Susa Valley (near Turin): the Frejus motor-way tunnel with the relevant drift, and two railway single track tunnels of the doubling line from Turin to Modane. The layout of these tunnels lies almost entirely in the Jura-Lias calc-schists formation. The rock shows a very different behaviour from site to site owing to geo-structural changes. In this view some laboratory essays and site investigations accomplished during the design and the construction of the tunnels are explained. The technical results are analysed in connection with the geo-mechanical behaviour and the anisotropy of the calc-schists in the purpose of drawing indications about the most influencing parameters and on the effectiveness of the researches.

ZUSAMMENFASSUNG:

Der Vortrag analysiert die Ausfuehrung verschiedener Tunnel im Bau bei Susatal (Turin) und zwar die Ausfuehrung des Frejus-Autobahntunnels (italienischer Seite) und des dazu zugehoerigen Sondierstollens und der zwei eingleisigen Eisenbahntunnel ("Exilles" und "Tanze") der Verdoppelung der Turin-Modane Linie. Alle diese Tunnel werden fast ausschliesslich in Kalkschiefer von Jura-Lias gebaut. Das geomechanische Betragen aendert sich mit der Wandelbarkeit des Gefueges. Diesbeueglich werden die im situ Versuche und Laborproben fuer die Entwerfung und den Bau beschrieben; es werden danach die technischen Ergebnisse des Baues analysiert, in Abhaengigkeit des geomechanischen Betragens und der Anisotropie des Kalkschiefers, um Anweisungen zu den beeinflussenderen Parametern und zu der Wirkung der Versuche bestimmen zu koennen.

1. TUNNELS EN COURS D'ETUDES

Dans la présente communication on illustre et analyse les relevés géostructuraux, les essais de laboratoire sur les matériaux et les recherches géophysiques et géomécaniques "in situ", déjà effectués ou actuellement en cours pour contribuer à coordonner les actions de creusement et de soutènement d'une série de tunnels de la vallée de Suse (Turin-Modane), tous creusés dans le complexe des schistes lustrés (Fig. 1).

Il faut en outre rappeler le tunnel ferroviaire du Fréjus, creusé depuis plus d'un siècle, qui a assumé pour le tunnel routier actuel le rôle d'une galerie d'exploration pour les questions de géohydrologie et en partie pour les questions géomécaniques.

En effet, le long de cette importante voie de communication entre l'Italie et la France, qui est la vallée de Suse, il y a en cours plusieurs travaux de construction pour le dédoublement de la ligne de chemin de fer Turin-Modane (4 tunnels à 1 voie) et ensuite le tunnel autoroutier du Fréjus.

Dans ce contexte, on considère, en raison de l'intérêt des études faites, 4 tunnels (Tableau 1) pour une longueur totale de 24 km environ, creusée entiè-

rement dans le complexe des schistes lustrés à ophiolites: la galerie d'exploration pour le tunnel du Fréjus, creusée en 1964; le tunnel autoroutier du Fréjus; le tunnel ferroviaire "Exilles"; le tunnel ferroviaire "delle Tanze".

Ces tunnels sont creusés à pleine section par explosif et le soutènement du creusement est essentiellement réalisé par des boulons d'ancrage (Tableau 2).⁰⁾

Les études sont effectuées dans le cadre de l'"Istituto d'Arte Mineraria" de l'école Polytechnique de Turin, avec la collaboration des Sociétés adjudicatrices et des Entreprises qui exécutent le travail; pour le tunnel du Fréjus, en particulier, collabore aussi, pour la partie géostructurale, le Laboratoire CNR de géologie appliquée à la planification routière, Padoue.

0) Dans le tableau on a aussi indiqué, pour comparaison, les données du creusement de l'ancien tunnel ferroviaire, selon les indications fournies par Biadego, 1906.

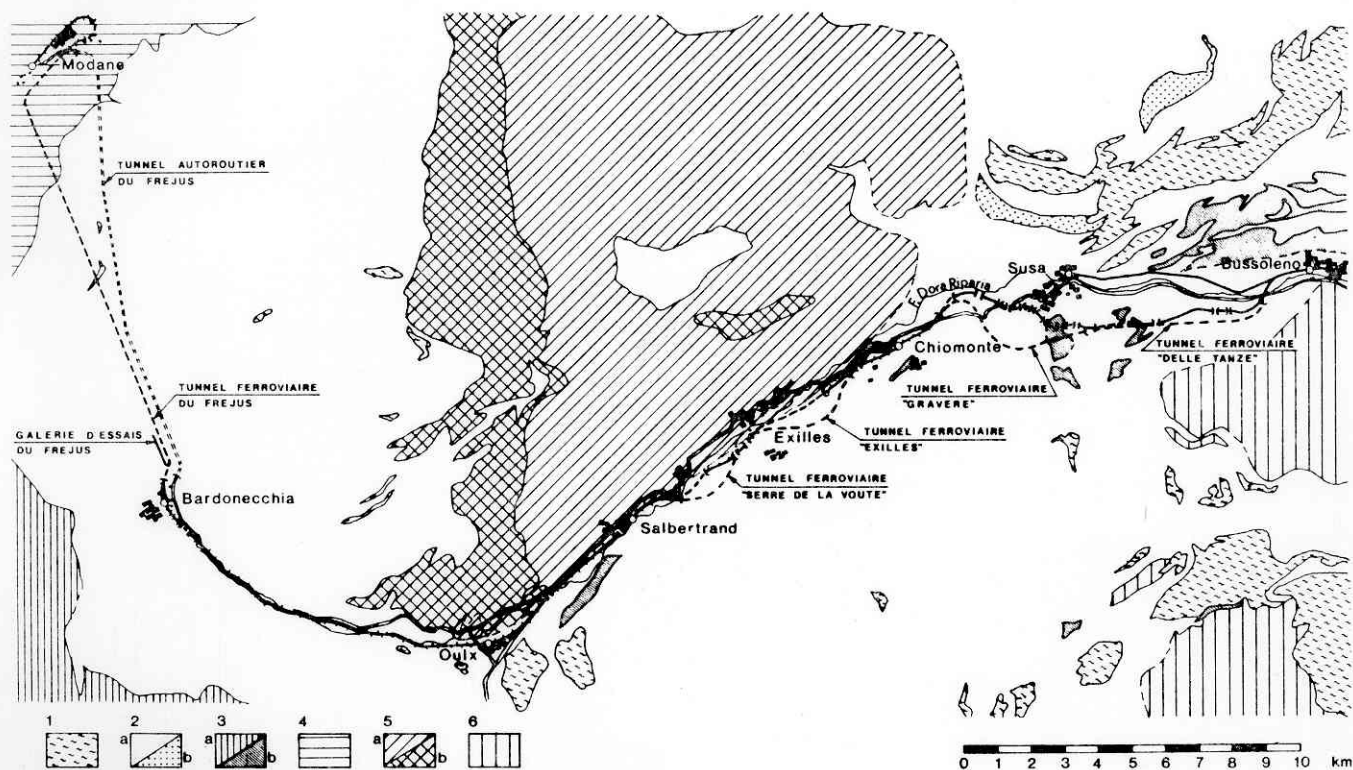


Fig. 1 Géologie schématique de la haute vallée de Suse

- (1) : principales intercalations de roches ophiolitiques (serpentinites, gabbros, diabases, amphibolites, prasinites, etc.) associées aux Schistes lustrés.
- (2) : complexe des Schistes lustrés: a) calcaires \pm micacés, micaschistes, schistes noirs et verts; b) principales intercalations de micaschistes albitiques et gneiss associés aux schistes lustrés (gneiss du Charbonnel auct.).
- (3) : Complexe de base des schistes lustrés : a) Trias dolomitique : dolomies grises noriennes et calcaires \pm lumachelles, dolomies et schistes noirs rhétiens du massif de la Grande Roche; b) calcaires cristallins \pm dolomitiques à cachet triasique à la base et au sein des Schistes lustrés en basse Vallée de Suse.
- (4) : Zone Briançonnaise : substratum carbonifère et permien; couverture triasique de type briançonnais de la Vallée de l'Arc.
- (5) : Massif d'Ambin : a) soubassement cristallin antetriasique (gneiss micacés, gneiss conglomératiques, micaschistes et amphibolites) et b) couverture sédimentaire mésozoïque (quartzites \pm micacés, calcaires \pm dolomitiques, dolomies, cagneules).
- (6) : Massif Dora Maira : micaschistes, micaschistes à grenat, gneiss fins tabulaires et ocellés, prasinites et amphibolites.

Tab. 1 - Généralités sur les tunnels

Tunnel		Section		Longueur m	Pente	
Denomination	Type	Forme	Surface utile m ²		Orientation	Valeur %
Tunnel du chemin de fer du Fréjus	tunnel du chemin de fer de passage de base	fer à cheval	48	12.233	double	3
Galerie d'essais du Fréjus	galerie d'essais	carrée	10	1.008	unique en descente de S à N	1,18
Tunnel routier du Fréjus	tunnel routier de passage de base	fer à cheval	66,25	12.895	unique en descente de S à N	0,54
Tunnel du chemin de fer Exilles	tunnel du chemin de fer en montée à simple voie	fer à cheval	30	5.539	unique en montée de E à W	2,6
Tunnel du chemin de fer "delle Tanze"	tunnel du chemin de fer en montée à simple voie	fer à cheval	30	5.433	unique en montée de E à W	2,2 + 2,6

2. DONNEES GEOLOGIQUES GENERALES

La figure 1 montre les lithologies prédominantes dans la moyenne et dans la haute vallée de Suse. On distingue, pour ces dernières, d'E à O, et du bas vers le haut, selon un ordre stratigraphique, les unités structurales suivantes: le Massif Dora Maira, le Massif d'Ambin, la Zone Briançonnaise s.s. et le Complexe des schistes lustrés à ophiolites.

C'est dans ce dernier complexe que l'on est en train de creuser les tunnels qui font l'objet de la présente communication.

Le massif Dora Maira fait partie de la nappe pennine du Mont Rose - Grand Paradis - Dora Maira, et il est formé, dans l'aire représentée sur la carte, surtout de micaschistes et micaschistes \pm à grenat auxquels sont associées des intercalations subordonnées de prasinites et amphibolites \pm à grenat et glaucophaniques. Ceci affleure seulement dans le secteur sud-oriental de la carte.

Le massif d'Ambin, partie orientale de la nappe du Grand St. Bernard, affleure dans la partie centrale de la Vallée.

Il est constitué d'un soubassement cristallin, où l'on distingue les micaschistes albitiques gris et les gneiss micacées à grenat en bas, et micaschistes \pm albitiques à nombreux niveaux conglomératiques en haut, et d'une couverture sédimentaire mésozoïque constituée de quartzites basales, anhydrites, gypses, cargneules et d'une série calcareo-dolomitique à nombreux niveaux en brèches.

Dans l'aire centrale, la zone briançonnaise affleure seulement dans la partie occidentale, et elle est formée d'un soubassement cristallin permocarbonifère affleurant aux environs de Modane et d'une couverture

triasique de type briançonnais retrocharriée sur le complexe des calcschistes à ophiolites.

Sur toutes les unités précédentes, on trouve, en contact tectonique, le complexe des schistes lustrés à ophiolites, qui représente le résultat de la fermeture du bassin ophiolitique piémontais (Peretti 1969, Polino 1978).

Tout en appartenant à la même unité tectonique, on y distingue des séquences à ophiolites prédominantes (à l'E de la figure) et des séquences à métasédiments. Les premières se réfèrent aux portions de bassin à substrat océanique en expansion, les secondes, quelquefois en continuité avec les séquences sédimentaires tardo-triasiques et liasiques, (massifs du Chaberton-Grande Hoche, du Grand Roc, etc...) ont été probablement déposées sur la croûte continentale pénnine et sur sa couverture préophiolitique.

Les calcschistes de la moyenne et haute Vallée de Suse se sont caractérisés par une remarquable prédominance des paraschistes sur les métaophiolites et sont, à l'échelle du massif, extrêmement monotones. A l'échelle de l'affleurement, ils sont caractérisés par une remarquable variabilité lithologique, avec une forte alternance de niveaux carbonatés et de niveaux phylladiques, auxquels se superpose une forte déformation plissée qui altère et rend plus difficiles à comprendre les rapports originaires entre les diverses lithologies. Malgré la déformation intensive et la monotonie lithologique générale que l'on observe dans la vallée de Suse, on trouve dans ce complexe des séries différentes qui ont probablement une signification paléogéographique différente.

Une fracturation tardive répartie de façon variable (Fig. 2) peut altérer et aggraver, sur certains tron-

Tunnel	Section de creusement m ²	Adjudicateur	Constructeur	Partie attribuée aux constructeurs actuels		Calendrier des excavations		Données opératives							
				longueur m	chantiers n	début	fin	jours salaires travaillés pour l'excavation de :		Main d'œuvre rapportée à :					
								m	n	volume excavé h/m ³	mètre de tunnel terminé h/m	mines m ³	explosif N/m ³	énergie électrique kWh/m ³	gazoline l/m ³
Tunnel du chemin de fer Fréjus (côté Italie)	7 = galerie 41 = élargissements	Etat Italien	Entreprise GRATTONI et SOMMEILLER	7.080	1	octobre 1957	décembre 1970	752 (1)	1260	86 (3)	17316	9 (3)	46 (3)	440 (5)	=
Galerie d'essais du Fréjus	10	Province de Turin	ACCATI (Torino)	1.008	1	23.10.'63	avril 1965	1008	450	25	300	=	35	27	=
Tunnel routier Fréjus (côté Italie)	de 01 à 07	SITAF (*)	C T F (**) Bardonecchia (TO)	6.400	1	20.01.'75	juin 1979	5000	880	0,6	210	1,35	12,5	29	3
Tunnel du chemin de fer Exilles	de 47 à 51	Chemins de fer italiens	ASFALTI SINTEX (Rologna)	3.082	2	02.04.'74	juin 1979	1985 (Est)	1450	2,8	220	1,70	14,0	12	7
Tunnel du chemin de fer "della Tanze"	42	Chemins de fer italiens	CARIRONI Colico (CO)	4.953	3	10.04.'78	février 1980	408	214	1,18	68 (4)	2,05	20,0	12	2

Tab. 2 - Moyennes relatives aux opérations de creusement et de soutènement des ouvrages

- (1) perforation manuelle
- (2) perforation mécanique
- (3) pour la galerie d'avancement de 7 m², avec emploi de poudre à canon
- (4) sans revêtement
- (5) énergie hydraulique pour les compresseurs

(*) Società Italiana per il Traforo Autostradale Fréjus
 (**) Consorzio traforo Fréjus (sponsor: Impresa COGEFAR - Milano)

Soutènement

Tunnel	Boulonnage		Cintres		Béton projeté	
	ancrage		tige		type	emploi
	diamètre mm	longueur m	diamètre mm	emploi		
Tunnel du chemin de fer Fréjus (côté Italie)	Cintres métalliques et soutènements en bois					
Galerie d'essais du Fréjus	36	1,3	16	16	=	no
Tunnel routier Fréjus (côté Italie)	51	4 + 5	24	24	2 x MP 180	occasional
Tunnel du chemin de fer Exilles	=	3 + 6	24	24	réticulaires n°7 g. 30 HE 260	occasional
Tunnel du chemin de fer "della Tanze"	46	2	28	28	=	no

çons, les caractéristiques mécaniques du massif rocheux généralement bonnes ou assez bonnes, rendant peu estimes les valeurs des caractéristiques géomécaniques du matériel résultantes des essais de laboratoire.

Les tunnels examinés traversent le complexe des schistes lustrés à ophiolites dans des localités différentes et à des niveaux structuraux différents.

Ces tunnels rencontrent des conditions de creusement très variées, liées aussi bien à des différences dans la composition lithologique (prédominance de calcschistes carbonés ou de calcschistes phylladiques) qu'à un degré de tectonisation, qui, variant d'un point à un autre, influe considérablement sur la réponse donnée par le massif au creusement.

3. CARACTERISTIQUES GEOMECHANIQUES DU CALCSCHISTE

L'anisotropie typique et prononcée des calcschistes a conseillé de les traiter, du point de vue géomécanique et pour la programmation des essais de laboratoire, comme une roche à isotropie transversale (orthotropie), individualisant les 2 directions d'anisotropie dans un sens respectivement parallèle (direction indiquée par la suite par l'indice 1) et perpendiculaire à la schistosité (indice 2).

On a donc eu soin d'obtenir, dans la mesure du possible, des éprouvettes orientées de façon à pouvoir être soumises à des essais effectués dans une direction respectivement parallèle et perpendiculaire à la schistosité; elles sont confectionnées selon les réglementations suggérées par la S.I.M.R.

On a effectué sur tout ou partie des éprouvettes les essais reportés - en même temps que les résultats - sur le Tableau 3.

Le groupe le plus nombreux de déterminations a concerné le tunnel du Fréjus, aussi bien à cause de l'importance de cet ouvrage en soi que par le fait que, dans les tunnels de chemin de fer, les recherches sont en cours depuis moins de temps.

La roche provenant du tunnel autoroutier possède une anisotropie prononcée (Fig. 3) qui correspond du reste à la schistosité tout aussi prononcée, avec un comportement sous la pression uniaxiale (exercée par presse traditionnelle) généralement fragile; on remarque une tendance à la déformation sous charge constante au-

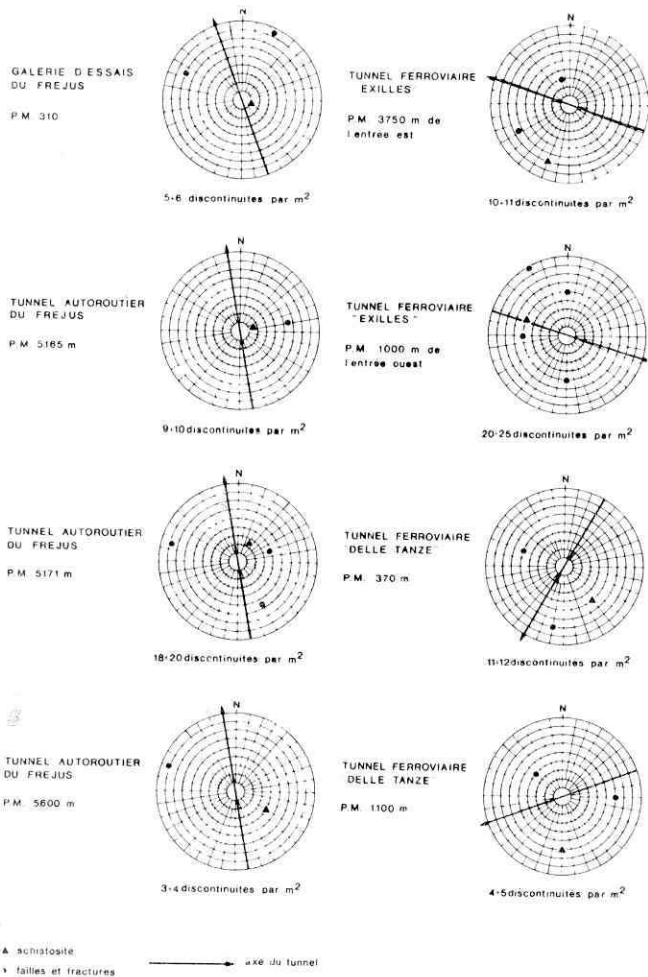


Fig. 2 Principaux systèmes de discontinuités sur les tronçons examinés.

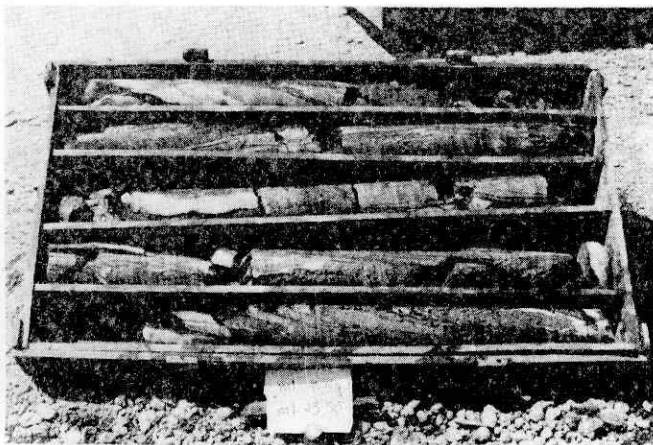


Fig. 3 Photographie de carottes extraites du tunnel autoroutier du Fréjus au point métrique 887 et 872 à gauche, en direction parallèle à la schistosité (RQD de 40% à 72%); à droite, perpendiculairement à la schistosité (RQD de 11% à 32%).

leurs mesurées par quadripôles de 30 m sont généralement inférieures à celles mesurées par des quadripôles de 15 m; on pourrait expliquer ce phénomène en partie par la présence de la croûte superficielle de béton projeté présentant une résistivité probablement plus élevée que celle de la roche, et en partie par un contenu en eau de la roche plus bas autour des parois du tunnel, ou bien à cause d'un volume plus grand des vides, ou à cause de l'action de séchage exercée par la ventilation.

De toute façon on considère que les mesures de résistivité sont moins significatives que celles des vitesses des ondes sismiques, surtout quand on veut obtenir une corrélation avec les paramètres techniques du creusement, vu qu'elles subissent fortement l'influence de la présence d'eau et des soutènements provisoires éventuels.

5.2.2. Pendant le creusement, on a eu surtout de la stillation et seulement exceptionnellement des venues d'eau, à un débit cependant toujours limité (la quantité actuellement débitée sur les premiers 4000 m de tunnel est de 5 l/s environ).

L'eau, à une température égale ou légèrement inférieure à celle de la roche, a une réaction basique ($\text{pH} = 9,8 + 10$) et une bonne teneur en ions SO_4^{--} ; en correspondance aux venues principales (autour des points métriques 2400 + 2850) on a adopté pour le revêtement un ciment à basse teneur en aluminat tricalcique (type "Pouzzolanique").

On n'a pas jugé bon d'adopter des techniques particulières d'imperméabilisation; seul le tronçon en éboulis à l'entrée et un court tronçon contigu en calcschiste ont été complètement imperméabilisés par des toiles en p.v.c.

Les caractères physico-chimiques exposés ci-dessus et l'épuisement rapide des diverses venues, comptenu aussi de la couverture dans les premiers 4000 m de tunnel, font penser à des accumulations sub-fossiles, ou à des circuits à alimentation très lente et à long parcours.

5.2.3. La température de la roche (Fig. 10) augmente constamment au fur et à mesure que le creusement avance; dans le tronçon initial de 4500 m, à couverture longitudinale constante, on a eu des valeurs du gradient géothermique qui reflètent les prévisions résultantes des données disponibles tirées du tunnel ferroviaire et de la galerie d'exploration.

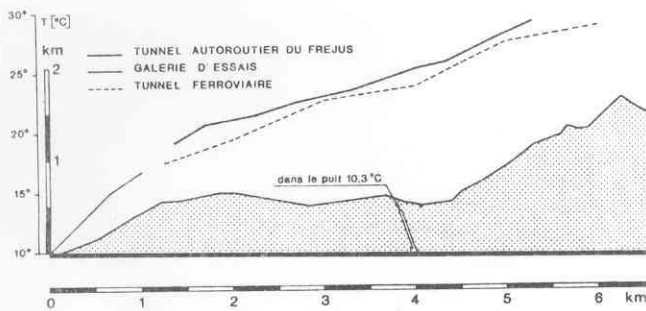


Fig. 10 Température de la roche dans le tunnel du Fréjus.

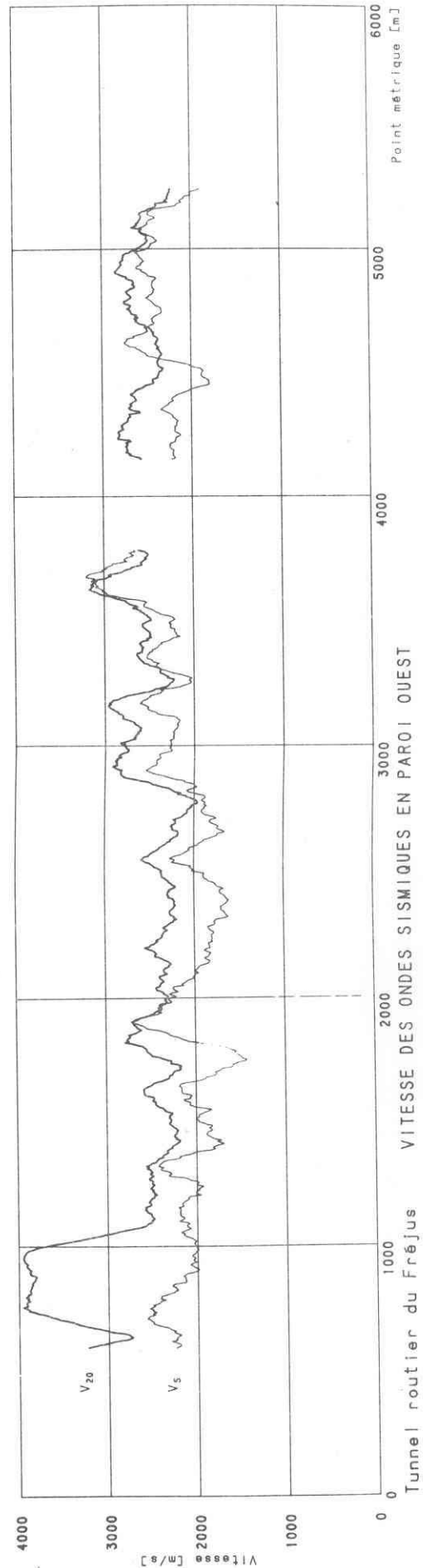


Fig. 9 Vitesse des ondes sismiques longitudinales relevées le long de la paroi Ouest dans le tunnel du Fréjus.

5.3. Tunnel ferroviaire Exilles

Dans ce tunnel on rencontre beaucoup de difficultés de creusement et de soutènement (Cremonini 1978); en partie à cause de la milonitisation complète du matériel sur de vastes tronçons et en partie à cause des abondantes venues d'eau qui par conséquent se sont produits même sous de grosses couvertures.

Les conditions difficiles de stabilité (surtout pour l'entrée Est) sont très bien mises en évidence par les mesures de convergence (Fig. 6) systématiquement répétées tous les 25 m au moins, par lesquelles on détermine l'organisation du creusement et les interventions de soutènement; mais ces mesures sont très difficiles pour les temps du cycle (Tableau 5).

Les valeurs de la vitesse des ondes sismiques varient de 1670 à 3035 m/s (valeur moyenne 2150 m/s) pour les bases de 5 m et de 1840 à 3245 m/s (valeur moyenne 2580 m/s) pour les bases de 20 m dans les deux tronçons avant du p.m. 3350; de 1830 à 3590 m/s (valeur moyenne 2790 m/s) pour les bases de 5 m et de 2140 à 3420 m/s (valeur moyenne 2670 m/s) pour les bases de 20 m après le point métrique 3650; de 1230 à 2100 m/s (valeur moyenne 1740 m/s) pour les bases de 5 m et de 2340 à 2820 m/s (valeur moyenne 2610 m/s) pour les bases de 20 m dans le tronçon à l'amont.

5.4 Tunnel ferroviaire "delle Tanze"

Dans ce tunnel les schistes lustrés, qui se présentent dans une disposition régulière avec une forte inclinaison, ont manifesté les meilleures conditions de stabilité, au moins à l'entrée Est, jusqu'à maintenant la plus avancée.

Les valeurs de la vitesse des ondes sismiques varient de 1430 à 7150 m/s (valeur moyenne 3220 m/s) pour les bases de 5 m et de 2000 à 4820 m/s (valeur moyenne 3280 m/s) pour les bases de 20 m.

6. OBSERVATIONS CONCLUSIVES SUR LE COMPORTEMENT DES SCHISTES LUSTRES

6.1. Constatations

Des essais et des contrôles effectués jusqu'à aujourd'hui, en se réservant bien entendu de faire par la suite des mises au point rendues possibles par la continuation des études relatives à l'achèvement des creusements en cours, mises au point concernant le comportement des schistes lustrés pour l'ouverture de nouveaux creusements, on peut tirer les conclusions suivantes:

6.1.1. Influence de la composition lithologique. Les schistes lustrés très carbonatés (marbres), qui se présentent sous forme de bancs très épais et continus, ne donnent aucun problème de creusement et de soutènement (lorsqu'il n'y a ni fractures ni eau).

Les types phylladiques (avec mica blanc et substances charbonneuses) ne présentent en général aucun problème de creusement; on peut toutefois les diviser plus facilement en dalles ou blocs avec comme conséquence des problèmes de stabilité par rapport à la disposition de la schistosité.

6.1.2. Influence de la schistosité. La schistosité principale est de type planaxial (Fig. 8) caractérisée par une orientation des micas et par la disposition en plans des substances charbonneuses.

Le long des plans de schistosité on observe souvent des signes de glissement avec des miroirs de faille.

Le massif rocheux se divise donc très facilement

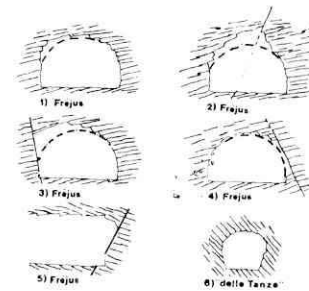


Fig. 11 Influence de la schistosité et des fractures sur la stabilité locale du creusement.

le long de ces plans, et pour cette raison, très souvent, avec une disposition sub-horizontale (Fig. 11) on a de faciles décollements avec hors profil dans la calotte tandis que les piédroits restent stables. Dans ces conditions la longueur du creusement assume une importance déterminante: en effet, pour le Fréjus, au lieu d'une certaine bonne stabilité de la galerie d'exploration, on a rencontré de gros problèmes d'instabilité locale dans la calotte du tunnel autouroutier qui ont imposé le boulonnage systématique du creusement.

6.1.3. Influence de la fracturation. La fracturation, dans tout le complexe des calcschistes (exploré en des points différents sur une étendue de 30 km), est irrégulièrement répartie. Elle a une importance fondamentale dans la détermination des conditions de creusement et de stabilité.

Par exemple, dans le cas du Fréjus (Fig. 2 et Fig. 11) la formation rocheuse, en plus des plans de schistosité, est intéressée par de différentes familles de fractures; on trouve 2 cas extrêmes:

- les fractures ouvertes, présentant en général de grandes dimensions et associées à des bandes cataclastiques; mises en relation avec le degré d'humidité (stipulations locales), avec la disposition plus ou moins défavorable par rapport à l'axe du tunnel et avec l'association à d'autres systèmes de fractures, elles peuvent engendrer de graves situations locales d'instabilité;
- les fractures fermées, habituellement peu étendues. Elles sont plus fréquentes et elles représentent des solutions de continuité plus ou moins latentes dont l'importance est accrue par le tir des volées. Quand elles se produisent dans plusieurs systèmes, associés à la schistosité, elles contribuent à réduire de beaucoup le volume rocheux unitaire, et par conséquent à poser des problèmes de stabilité du creusement.

Tandis que sur d'autres 5000 m du tunnel du Fréjus on a trouvé seulement rarement des bandes cataclastiques, même si parfois elles présentent une grande épaisseur (quelques-unes ont des dizaines de mètres), dans le tunnel Exilles on a trouvé des bandes milonitiques importantes, avec de l'eau et avec une très grande déformabilité de la formation; un exemple typique est la bande de plus de 200 m autour du point métrique 3150 (Tableau 4) qui a provoqué un fort ralentissement des travaux de creusement et a demandé la pose de lourds soutènements.

6.1.4. Influence de l'eau. Généralement les schistes lustrés du Fréjus ont manifesté une bonne imperméabilité, avec des venues d'eau limitées et des distillations locales, comme les prévisions l'avaient établie, en concordance avec la fracturation non élevée et avec de fortes charges lithostatiques (fractures fermées et/ou remplies par des matériaux imperméables). Viceversa, les tunnels Exilles et "delle Tanze" ont manifesté des venues d'eau abondantes, respectivement de $5 + 10 \text{ dm}^3/\text{s}$ sur le front et $20 + 40 \text{ dm}^3/\text{s}$ globalement. Ceci en rapport avec la fracturation de temps en temps très élevée, avec des fractures par moments encore ouvertes, et la possibilité donc d'une formation de "réservoirs d'eau" souterrains de forte capacité. Dans ces cas-là, toutefois, les venues d'eau ont montré une certaine tendance à s'épuiser dans un temps variant de 10 à 60 jours, si bien qu'aujourd'hui encore les débits globaux en eau (pour des tronçons de 1000 + 3000 m de tunnel) peuvent être pour le plupart attribués aux derniers 200 + 300 m creusés. Ceci paraît confirmer même dans ces cas-là, et en présence de couvertures très réduites, la perméabilité globale très basse des schistes lustrés, ce qui amène généralement à des temps de recharge longs et donc à l'épuisement rapide des venues d'eau qui s'y étaient peu à peu manifestées.

6.1.5 Tensions tectoniques résiduelles. D'après les résultats dérivant de l'ensemble des mesures "in situ" et du comportement de la roche à l'égard du creusement, il semble qu'il n'existe pas de tensions tectoniques résiduelles, conformément d'ailleurs à la déformabilité typique des calcschistes au moins le long des plans de schistosité.

6.1.6. Déformabilité dans le temps. Le problème d'un éventuel "fluage", exclu au niveau de l'éprouvette de la boratoire, n'est pas encore clairement défini au niveau de la formation rocheuse.

En ce qui concerne le tunnel du Fréjus, des essais effectués dans le tunnel ferroviaire et dans son revêtement (Bernede 1968), qui fut creusé lentement par élargissements successifs et revêtu par maçonnerie non reliée sous pression à la roche, semblent montrer une certaine déformation des calcschistes qui ont provoqué - pendant 100 ans - dans le revêtement une contrainte de 2 MPa environ.

Dans le tunnel Exilles aussi on note une grande déformabilité; par exemple au point métrique 3020, bien que les déformations du creusement aient été stabilisées par boulochage et béton projeté ($0,07 \text{ mm}/24 \text{ h}$), on enregistre maintenant (par des cellules dynamométriques hydrauliques placées au contact roche-béton projeté pour les contraintes radiales, et dans le revêtement pour les contraintes tangentielles) une augmentation croissante des contraintes avec des tensions dans le béton de l'ordre de 5 MPa.

6.2. Prévisions

6.2.1. En ce qui concerne les connaissances que l'on peut acquérir préliminairement pendant la phase de la conception du projet, on a constaté que, en présence de couvertures basses, l'étude géologique de surface peut fournir d'excellents renseignements sur la lithologie et la structure; avec des couvertures plus importantes au contraire, l'information est très difficile vu l'extrême variabilité de déformations et de fracturations dans le détail. D'autre part la photo-géologie peut fournir une aide limitée, sauf dans les cas d'informations générales sur le degré différent de fracturation de zones contigües.

6.2.2. Par le relevé des ondes élastiques, bien que l'on ne puisse pas encore établir une échelle de comportement de la roche à travers des corrélations avec les données techniques du creusement et avec les caractéristiques techniques des zones, on peut actuellement observer que:

- la vitesse des ondes élastiques supérieure à $2500 - 2800 \text{ m/s}$ caractérise une roche stable qui nécessite de l'explosif pour l'abattage et consent le creusement à section pleine sans aucun soutènement provisoire (autour des 3000 m/s) ou avec un soutènement léger partiel par des boulons d'ancrage ponctuel dans les autres cas;
- les vitesses comprises entre 2000 et 2500 m/s caractérisent une roche qui nécessite, pour le creusement à section pleine, un soutènement systématique de l'excavation par des boulons et du béton projeté ou encore par des cintres; dans de telles conditions l'emploi d'explosif peut aussi augmenter pour les situations considérées à cause de la mauvaise réaction de la roche aux actions dynamiques;
- les vitesses inférieures à 2000 m/s dénotent une roche intensément fracturée ou à comportement plastique qui exige un soutènement systématique et qui peut demander l'organisation à section divisée du creusement; la convergence dans ce cas arrive à des valeurs élevées (supérieure à 100 mm) ce qui explique la nécessité d'une dilatation importante pour atteindre les conditions de stabilité.

6.2.3. Dans le but de constater le degré d'approximation que l'on peut obtenir par analogie, sur la base d'observations géostructurales précises, même dans les roches à forte anisotropie, pour les prévisions des difficultés de creusement et des nécessités d'ouvrages de soutènement, on a effectué une classification technique des conditions de la roche sur plusieurs points métriques dans les différents tunnels. A cet effet on a utilisé les classifications proposées par Bieniawski (Bieniawski 1976), Wickham (Wickham 1974) et Barton (Barton 1974), qui comptent parmi les plus récentes et les plus complètes, et on en a tiré pour plusieurs points métriques les indices de qualité du massif rocheux et par ces derniers on est remonté jusqu'aux soutènements provisoires conseillés. Sur le Tableau 6 on a reporté les résultats obtenus, mis en corrélation, pour y être comparés, avec les systèmes de soutènement provisoire utilisés en réalité. On remarquera comment, des 3 classifications prises en considération, la plus détaillée et la plus appropriée aux situations réelles est de loin celle de Barton, tandis que Wickham et surtout Bieniawski restent beaucoup plus vagues (et par conséquent plus pessimistes) dans leurs conclusions. On fait aussi remarquer qu'il y a des variations qualitatives importantes pour un même point métrique entre les classifications, et qu'on arrive même parfois à une inversion de "qualité" entre deux points métriques différents. Ce phénomène, qui peut au premier abord laisser perplexes, trouve son explication logique dans la diversité de certains facteurs considérés, et dans l'importance différente que l'on attribue aux autres dans les diverses classifications. Il faut en particulier attribuer cette excellente concordance avec la situation réelle obtenue par la classification de Barton à la forte influence qu'exerce sur la stabilité du creusement la schistosité de la roche dans laquelle sont réalisés les tunnels examinés; Barton, par la distinction détaillée qu'il propose entre les systèmes de fractures et l'état des surfaces relatives (ce qui

Tab. 6 - Classifications techniques du massif rocheux

Dénomination	Tunnel	Point métrique m	n° index	Classification de Bieniowski		Classification de Wickom		Classification de Barton		Situation réelle	
				classe	soutènements provisoires	R S R	Poids de roche en calotte M P a	Poids de roche en calotte M P a	Q		Soutènements provisoires
Tunnel routier du Fréjus		5.165 5.171 5.600	57	3	S (10 cm) + R (3 m ²) + R	56	S (7 cm) + B (1,5 m ²)	2,4	0,08	S (5 cm) + Bnt (1 m ²) + R	S (10 cm) + B t (0,5 m ²)
			45	4	S (15 cm) + R (1,5 m ²) + R	36	S (15 cm) + B (0,4 m ²)	0,17	0,27	S (20 cm) + R	S (10 cm) + Bt (0,5 m ²) + C 180 (1,5 m)
			67	3	S (10 cm) + B (4 m ²) + r	60	S (6 cm) + B (2 m ²)	1,54	0,20	S (7 cm) + Bnt (1 m ²) + R	S (10 cm) + Bt (1 m ²)
Galerie d'essais du Fréjus		310	78	2	S (5 cm) + b + r	78	b	42,5	0,01	b n t	R t (1 m ²)
Tunnel du chemin de Fer Exilles		E - 3.750 W - 1.000	57	3	S (10 cm) + R (3 m ²) + r	45	S (8 cm) + B (0,5 m ²)	0,20	0,25	S (10 cm) + R t (1 m ²) + R	S (10 cm) + Bt (1 m ²) + R
			48	4	S (15 cm) + B (2 m ²) + R	35	S (15 cm) + B (0,3 m ²)	0,08	0,33	S (10 cm) + R t (1 m ²) + R	S (20 cm) + Bt (1 m ²) + R
Tunnel du chemin de Fer "delle Tanze"		370 700 720 1.100	60	3	S (10 cm) + B (3 m ²) + r	58	S (6 cm) + B (2 m ²)	0,99	0,15	S (7 cm) + R t (1 m ²)	S (10 cm) + b t
			58	3	S (10 cm) + R (3 m ²) + r	38	S (12 cm) + B (0,4 m ²)	0,10	0,30	S (25 cm) + R R	R t (1 m ²)
			65	3	S (10 cm) + B (3 m ²) + r	53	S (8 cm) + B (0,7 m ²)	1,08	0,13	S (7 cm) + R t (1 m ²)	R t (1 m ²)
			74	2	S (5 cm) + b + r	69	S (5 cm) + B (5 m ²)	20,0	0,02	b n t	b t

S = béton projeté

B = boulonnage systématique

R = grillage systématique

C = cintres

b = boulonnage sporadique

RR = grillage systématique renforcé

t = boulons pré-tendus

r = grillage sporadique

nt = boulons non pré-tendus

permet de quantifier facilement les effets des surfaces de schistosité effective, à savoir assimilable à une discontinuité, permet d'attribuer à cette influence la juste importance qui lui est due, et d'obtenir ainsi les excellents résultats que l'on a vus).

Références bibliographiques

- ARMANDO E., PELIZZA S., PIOVANO G. (1969): "Metodi topografici per la misurazione di deformazioni connesse a scavi in roccia", Boll. Ass. Mineraria Subalpina, VI, 2, 1969.
- ARMANDO E., INNAURATO N., PELIZZA S., STRAGIOTTI L. (1978): "Contrôles géophysiques des caractéristiques géomécaniques de structures rocheuses, lors du percement des tunnels", en cours d'impression sur le Bulletin de l'A.I.G.I.
- BARTON N., LIEN R., LUNDE J. (1974): "Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support". Rock Mechanics, 6/4, 1974
- BERNEDE J., HABIB P., PLOUVIEZ P., STRAGIOTTI L. (1968): "Mesure des contraintes dans le revêtement d'un tunnel alpin", Symp. Int. de Mécanique des Roches, Madrid 1968.
- BLADEGO G.B. (1906): I grandi trafori alpini. Hoepli, Milano 1906
- BIENIAWSKI Z.T. (1976): "Classification system is used to predict rock mass behaviour". World Construction, may 1976.
- COTZA R., PELIZZA S., PIGA P., RATTI G., RIBACCHI R., STRAGIOTTI L. (1970): "Recherches de mécanique des roches dans des chantiers miniers et de creusement de tunnels", VI Congr. Int. de l'Industrie Minière, Madrid 1970.
- CREMONINI F. (1978): "La bullonatura della roccia nella galleria ferroviaria Exilles", Gior. di Studio su "La bullonatura in sotterraneo", Torino 1978.
- DEL GRECO O., PELIZZA S., VIARO T. (1978): "Controlli tecnici in situ del comportamento di bulloni di armatura", Not. Ass. Mineraria Subalpina, IV, 1, 1978.
- DEL GRECO O., PELIZZA S., STRAGIOTTI L. (1978): "Saggi di controllo in situ della bullonatura", Gior. di Studio su "La bullonatura in sotterraneo", Torino 1978.
- MANCINI R., PELIZZA S. (1969): "Previsioni dei consumi di esplosivo e di lavoro di perforazione nello scavo di gallerie", 1° Conv. Int. sui problemi tecnici nella costruzione delle gallerie, Torino 1969.
- Note sulla costruzione del Traforo Autostradale del Fréjus (1977), Boll. Ass. Mineraria Subalpina, XIV, 1, 1977.
- PERETTI L. (1969): "Studi di geologia applicata per la progettazione del Traforo autostradale del Fréjus con particolare riguardo al versante italiano", 1° Congr. naz. Problemi di Geologia Applicata, Verona 1969.
- PLOUVIEZ P., VECCO L. (1969): "Le tunnel routier du Fréjus", 1° Conv. Int. sui problemi tecnici nella costruzione delle gallerie, Torino 1979.
- POLINO R. (1978): "Osservazioni geologiche nel Traforo Autostradale del Fréjus (lato Italia) sino alla progressiva 4000", en cours d'impression sur le Boll. della Ass. Mineraria Subalpina.
- STRAGIOTTI L., CANOBBIO L., SCAVIA U., LUNARDI P., PELIZZA S. (1979): "Fréjus motorway tunnel: italian side", Int. Symp. "Tunneling '79, London 1979.
- VENTOSI U., PESSINA A. (1977): "Il nuovo Fréjus", Gal-lerie e grandi opere sotterranee, 3, luglio 1977.
- WICKHAM G.E., TIEDEMANN H.R., SKINNER H. (1974): "Ground support prediction model RSR concept". North American Rapid Escavation and Tunneling Conference, San Francisco 1974.
- ZIGNOLI V. (1971): "Sul progetto della Galleria Autostradale del Fréjus", Ingegneria Ferroviaria, 7-8, 1971.