



Traforo Autostradale del Fréjus Tunnel Routier du Fréjus *costruzione galleria di sicurezza construction galerie de securite*

PRELIMINARE	PRELIMINAIRE	Х	DEFINITIVO	AVANT-PROJET		ESECUTIVO	PROJET	
PRELIMINARE PRELIMINAIRE X II Responsabile del progetto MUSI.NET S.p.A II Direttore Tecnico Dott. Ing. Bernardo Magrì Le Responsable du projet MUSI.NET S.p.A Le Directeur Technique Dott. Ing. Bernardo			DEFINITIVO Attività specialistic	AVANT-PROJET	etto per:	ESECUTIVO Activités spécialisées de	PROJET	our:

Relazione Geologica del tracciato della Galleria di Sicurezza Dossier Géologique du tracé de la galerie de sécurité				21R
				N°
CODICE - CODE	gs96RT18	gs96RT18 № FILE	REVISIONE - REVISION	30/09/2002

С			
В			
А			
0	30/09/2002	1° EMISSIONE	
rev.	data	descrizione della revisione description de la révision	visto - validé

Questo disegno è di proprietà riservata della MUSLNET S.p.A.; ne è vietata la riproduzione anche parziale, nonchè la presentazione a terzi senza esplicita autorizzazione. L'inosservanza è perseguibile ai termini di legge



MUSI.NET S.p.A.

Sede legale: via Lamarmora, 18 - 10128 Torino (TO) Uffici: via Legnano, 24 - 10128 Torino (TO) SITAF – Società Italiana Traforo Autostradale del Fréjus SFTRF – Société Française du Tunnel Routier du Fréjus

Traforo Autostradale del Fréjus - Costruzione Galleria di Sicurezza Tunnel Routier du Fréjus - Construction Galerie de Sécurité

PROGETTO PRELIMINARE PROJET PRELIMINAIRE

RELAZIONE GEOLOGICA DEL TRACCIATO DELLA GALLERIA DI SICUREZZA DOSSIER GEOLOGIQUE DU TRACE DE LA GALERIE DE SECURITE

INDICE

1.	Prém	nices	4
2.	ESQUISSE ET DEVELOPPEMENT DE L'ETUDE		
3.	CLAS	SSIFICATION SISMIQUE DU TERRITOIRE	9
4.	CAD	RE GEOLOGIQUE REGIONAL	10
4.′	1 3	Substratum pré-quaternaire	15
4	1.1.1	La Zone Piémontaise (Unité du Lago Nero)	15
4	1.1.2	Zone Briançonnaise	16
4	1.1.3	Brèches tectoniques	17
4.2	Eve	olution structurelle et néotectonique	19
5.	CADI	RE DE CONNAISSANCES OBTENU SUITE A LA R	EVISION DES
DON	NEES	GEOLOGIQUES-STRUCTURALES ET GEOTECNIQUES F	RELEVEES LE
LONG	g du t	TUNNEL DU FREJUS	22
5.1	Un	ités lithologiques-stratigraphiques du substratum	22

5.1.1 Evaporites et roches de couverture de la Zone Briançonnaise Externe23
5.1.2 Les calcschistes de la Zone Piémontaise
5.2 Assise géologique structurale28
5.3 Venues d'eau33
5.4 Opérations de manutention effectuées à l'intérieur du tunnel routier du Fréjus34
6. CAMPAGNE DE RECONNAISSANCES GEOTECHNIQUE
6.1 Sondages géognostiques
6.1.1 Boyau de demi-tour (PK 10+675)38
6.1.2 Secteur localisé aux abords du point kilométrique 7+64041
6.2 Sections de mesure de contraintes43
7 ANALYSE D'IMAGES SATELLITAIRES DE LA CRETE COMPRISE ENTRE LA
VALLEE DE SUSE ET LA VALLEE DE L'ARC45
7.1 Techniques d'analyse46
7.2 Critères d'identification et d'interprétation des linéaments47
7.3 Analyse statistique et interprétation des données47
8. LEVES GEOLOGIQUES-STRUCTURAUX DE SUPERFICIE
8.1 Aspects méthodologiques52
8.2 Procédure opérationnelle54
8.3 Résultats59
8.3.1 STATION FRJ-00159
8.3.2 STATION FRJ-00263
8.3.3 STATION FRJ-00366
8.3.4 STATION FRJ-00469
8.3.5 STATION FRJ-00572
8.3.6 STATION FRJ-00675
9 CONCLUSIONS
10 Documentation de référence100
10.1 Documents de projet100
10.1.1 Réalisation du Tunnel routier du Fréjus100
10.1.2 Interventions de maintenance et consolidation du Tunnel routier du Fréjus
100
10.2 Projet de la galerie de sécurité du Tunnel routier du Fréjus101
10.2.1 Cartographie et photographies aériennes101
10.2.2 Géologie et géomorphologie102
10.2.3 Géologie appliquée et géotechnique104

1. Prémices

Ce mémoire décrit le cadre géotechnique acquis lors des études géologiques et la campagne de reconnaissances géognostique effectuées pour la rédaction du *Projet préliminaire pour la réalisation de la Galerie de sécurité* au service du Tunnel Routier du Fréjus. Le Tunnel du Fréjus, situé le long de la ligne Bardonnèche (autoroute A32) – Modane (autoroute A43) constitue, avec le Tunnel du Mont Blanc, un des raccords routiers transalpins fondamentaux entre la France et l'Italie.

La tête du tunnel côté Italie se trouve légèrement en amont de Bardonnèche, à environ 200 m de distance du tunnel ferroviaire datant de la fin du 19^e siècle. Du côté France, il se trouve dans la Vallée de l'Arc, un peu en amont de la ville de Modane. Le projet concernant la galerie de sécurité prévoit la réalisation d'une galerie, parallèle au tunnel actuel, à une distance d'environ 30 m à l'Est de celui-ci, et sur des cotes analogues. La longueur totale du nouveau tunnel est de 13 km env. et le diamètre prévu est de 5,60 m (excavation) pour en permettre l'utilisation avec un diamètre fini de 4,80 m.

Ce *Mémoire* présente le modèle mis à jour des conditions d'assise géologique-structurale de la zone concernée par le projet des travaux, illustrant en détails tout le tronçon en souterrain, exception faite de la tête côté France, mais comprenant la zone de tête du côté italien. Cette étude a pour but d'intégrer et de compléter les données géologiques et géotechniques disponibles par le passé, afin de déterminer des solutions optimales pour la réalisation de la galerie en phase préliminaire du projet. Ceci a comporté :

- la consultation de la vaste documentation géologique et géotechnique collectée lors des études, puis des travaux du tunnel existant ;

- l'analyse du comportement des ouvrages en service, en se référant en particulier aux travaux de maintenance qui se sont imposés;

- l'examen de la littérature géologique et sa révision critique à la lumière des éléments fournis par la nouvelle Carte géologique d'Italie (1999) et des études récentes menées sur le versant français.

Le cadre des connaissances ainsi obtenu a permis une reconstruction assez représentative de l'assise géologique de la dorsale intéressée par les ouvrages, et a mis en évidence les aspects d'application liés à la réalisation de la nouvelle galerie ainsi que les secteurs les plus problématiques. Afin d'optimiser l'emploi des ressources disponibles et, évidemment, de respecter les délais prévus, la campagne de reconnaissances géognostique a été finalisée :

- aux exigences de caractériser des volumes significatifs de la masse rocheuse en profondeur, dans une zone –entre autres- à fortes limitations environnementales (cote, manque et difficultés de levé direct des affleurements, déformations superficielles, etc...) qui empêchent un emploi étendu des méthodes d'investigation habituelles;

 – au contrôle ponctuel de secteurs spécifiques du tracé (tête côté Italie, traversée d'importantes déformations tectoniques, présence de roches à caractéristiques mécaniques médiocres, …)

Au total, la campagne de reconnaissances a comporté:

- des levés géologiques et géomorphologiques directs et par photographie aérienne de tout le tracé et des secteurs les plus importants (tête côté Italie, etc.);

- l'interprétation d'images par satellite pour la corrélation à grande échelle des éléments géométriques (portions) du relief avec les principaux éléments structuraux caractérisant l'assise du massif rocheux;

- des relevés structuraux détaillés sur les affleurements particulièrement significatifs pour la caractérisation du comportement mécanique des lithotypes;

- des sondages géotechniques carottés profonds pour la caractérisation de la roche, l'exécution de reliefs en forages et l'installation d'outils de monitorage de la roche et des ouvrages concernant le tunnel actuel;

- des essais mécaniques in situ pour évaluer l'interaction entre le revêtement du tunnel existant et la roche environnante.

L'ensemble des éléments collectés a été regroupé dans le présent *Mémoire* et dans les tableaux généraux (énumérés ci-après) qui illustrent l'assise de tout le tracé:

- Profil Géologique du Tunnel Routier du Fréjus (document n° 73P);

- Localisation Investigations Géotechniques - Planimétrie (document n° 76P);

- Localisation Investigations Géotechniques - Coupes (document n° 77P);

- Carte des linéaments dérivés de l'analyse des images satellitaires (document n° 74P);

- Carte des stations de levé géostructural (document n° 75P);

- Inspection par caméra dans le sondage BH6 (document n° 86P).

Les problèmes liés aux méthodes de creusement envisagées et les aspects du projet liés à la caractérisation mécanique de la zone examinée sont expliqués dans les documents suivants:

- Mémoire - Mécanique (document n° 22R);

- Profil mécanique (document n° 78P).

Pour les secteurs les plus importants, comme la zone de tête Sud (côté Italie), une étude plus approfondie est fournie dans les documents suivants:

- Mémoire géologique et géotechnique (document n° 20R);
- Localisation investigations géognostiques échelle 1:1.000 (document n° 68P);

- Carte géologique et géomorphologique de la zone de tête côté Italie – échelle 1:2000 (document n° 69P);

- Profil géologique et géotechnique 1-1' échelle 1:200 (document n° 70P);
- Profil géologique et géotechnique 2-2' échelle 1:200 (document n° 71P);
- Profil géologique et géotechnique 3-3' échelle 1:200 (document n° 72P);
- Eléments géomorphologiques de la zone de tête côté Italie (document n° 84P);
- Eléments concernant l'activité du torrent Rochemolles (document n° 85P).

Ce Mémoire fait partie intégrante du Projet préliminaire de réalisation de la galerie de sécurité du Tunnel routier du Fréjus.

2. ESQUISSE ET DEVELOPPEMENT DE L'ETUDE

Il est difficile de donner dans l'immédiat un cadre de connaissances représentatif du tronçon alpin concerné par la nouvelle galerie, suffisamment détaillé en fonction des problématiques de l'ouvrage, malgré les éléments collectés lors de la réalisation du Tunnel routier et de la voie ferrée du Fréjus. La complexité de l'assise géologique et structurale reconnue dès le 19^e siècle, la configuration morphologique et altimétrique, ainsi que les grandes épaisseurs de couverture sur tout le tunnel, entraînent d'énormes difficultés de réalisation tant dans les investigations directes que dans l'interprétation et la corrélation des données en surface et en sous-sol.

Dans ce contexte, il a fallu recourir à toute une série d'activités de reconnaissances multidisciplinaires qui ont fait appel à géologues, ingénieurs et autres techniciens de projets industriels, menées dans des bureaux d'études, sur le terrain, en chantier, dans des Instituts de recherche, et dans les bureaux et les archives des sociétés concessionnaires d'exploitation. Afin d'utiliser au mieux les diverses compétences, en fonction aussi des limites de temps à disposition, l'étude a eu en grande partie un cheminement itératif. Sa structure logique, avec les principales phases d'acquisition et de traitement des données géologiques *sensu lato*, fournies individuellement sous forme de schéma par souci de simplification, est la suivante:

- analyse et intégration de la littérature géologique disponible pour le secteur italien et pour le secteur français;

- corrélation des connaissances géologiques sur les deux versants de la chaîne montagneuse et révision critique sur la base du nouveau modèle d'interprétation formulé dans le cadre de la réalisation de la nouvelle Carte géologique d'Italie;

- reconstruction de l'assise géologique-structurale globale de la chaîne à la lumière des connaissances scientifiques les plus récentes;

- acquisition et révision de la vaste mais fragmentaire documentation géologique et géotechnique produite par les techniciens français et italiens dans le cadre du projet du tunnel routier actuel et de sa réalisation;

- contrôle du comportement de l'ouvrage en phase d'exploitation et des interactions entre structure et massif rocheux en bordure. La période écoulée depuis l'entrée en fonction du tunnel, il y a à peu près 20 ans, permet, par l'examen des travaux d'entretien devenus nécessaires et des résultats obtenus par des monitorages encore en cours, de collecter des données significatives sur les effets de l'ouverture de la voûte.

Afin d'obtenir le cadre le plus complet possible des données disponibles sur le tunnel existant, nous avons, en même temps que la recherche de documents publiés, :

- effectué des recherches systématiques dans les archives de la Société SITAF de documents originaux du projet, de mémoires sur les activités de chantier, de documentation concernant les travaux d'installation et de maintenance successifs, de rapports sur les systèmes de monitorage et de résultats obtenus;

- consulté les géologues qui ont suivi l'ouverture de l'excavation en relevant directement les caractères du massif rocheux avant la mise en place du revêtement (en particulier, M. R. POLINO du CNR – Institut de sciences et de ressources géologiques – Section de Turin) et des ingénieurs qui ont participé aux travaux;

 - élaboration d'un cadre global des connaissances sur le tronçon de la chaîne alpine traversée, avec reconstruction détaillée de l'assise géologique et structurale correspondant au tracé des deux ouvrages;

- définition, sur la base des données obtenues lors de la réalisation du tunnel et des travaux de maintenance en cours d'exploitation, des secteurs les plus problématiques pour les caractéristiques mécaniques des lithotypes présents, de la présence de discontinuités significatives et du comportement de la masse, d'où on orientera les activités spécifiques d'investigation directes ou par télédétection;

- interprétation d'images via satellite pour la corrélation sur large échelle des éléments géométriques relevables dans la configuration du relief, avec les principaux éléments structuraux marquant l'assise du massif rocheux;

- levés géologiques et géomorphologiques directs et par photographie aérienne de tout le tracé et des secteurs les plus intéressants (tête côté Italie, etc.);

- relevés structuraux détaillés sur les affleurements particulièrement significatifs pour la caractérisation du comportement mécanique des lithotypes;

- sondages géotechniques par carottage continu pour la caractérisation du massif rocheux, l'exécution de relevés en puits et l'installation d'équipements de monitorage de la roche et des ouvrages concernant le tunnel existant;

- essais mécaniques in situ pour l'évaluation de l'interaction entre le revêtement du tunnel existant et la roche environnante.

3. CLASSIFICATION SISMIQUE DU TERRITOIRE

La classification sismique en vigueur, émise par le Conseil supérieur des Travaux publics italiens, attribue à tout le territoire national des valeurs différentes de degré de sismicité.

Les territoires communaux classés comme sismiques ont été répartis sur la base de la valeur de leur coefficient de sismicité (S). En détail, il y a trois valeurs (S = 12, S = 9, S = 6) auxquelles correspond respectivement une sismicité ?Intense?, ?moyenne? et ?faible?. Par conséquent, les critères de projet des structures rentrant dans cette zonation résultent différenciés sur la base du degré d'exposition au risque sismique.

Le tracé de l'ouvrage en projet se développe, sur le versant italien, à travers le territoire communal de Bardonecchia dans la partie haute de la Vallée de Suse. Ce site n'intéresse aucune des zones classées comme sismiques.

Le secteur français est classé lb (classification sismique nationale).

4. CADRE GEOLOGIQUE REGIONAL

La partie des Alpes comprise entre la Vallée de Suse et la Vallée de l'Arc (sur le versant français) présente quelques-uns uns des principaux domaines structuraux partageant le côté interne de la portion de chaîne à vergence européenne. Les grandes unités paléogéographiques structurales intéressées comprennent, -selon la dénomination géologique classique- l'austro-alpin, le Pennique, et les ophiolites associés (Fig. 4.1). Le secteur Bardonecchia – Modane, en particulier, se situe dans le cadre de la zone de suture et d'épaississement de la croûte le plus important ("Pennique" in Fig. 4.2), comprise entre les anciennes marges continentales européennes au Nord-Ouest et africaine au Sud-Est.

Sur la base des caractères des unités lithostructurales et de leur disposition géométrique actuelle, on peut comprendre l'évolution suivie par les différentes unités et les mécanismes qui ont marqué la déformation alpine. L'assise générale reconnue est schématisée en Fig. 4.2. Dans les Alpes occidentales, les diverses unités structurales se sont chevauchées d'Est en Ouest, par un sens de mouvement correspondant à la trajectoire du déplacement de la plaque africaine vers la plaque européenne. Le mouvement convergent entre les deux plaques continentales, datant du Crétacé (il y a env. 130 millions d'années), a déterminé la fermeture du bassin océanique liguro-piémontais qui s'était formé auparavant. Les restes de cet océan disparu (unités océaniques, ophiolites) sont englobés parmi les unités lithostructurales présentes dans la zone de suture.



Figure 4.1 - Distribution des grands domaines paléogéographiques-structuraux dans les Alpes selon la littérature classique: helvético-jurassien, Pennique, Alpes méridionales, Monferrato (MF), Colline de Turin (CT) et Bassin Tertiaire Piémontais (BTP). Le carré indique l'emplacement de l'ouvrage en projet.



Figure 4.2 - Modèle d'évolution convergente des deux marges continentales (a), entraînant la disparition de l'océan interposé (b) et la formation d'une chaîne de collision (c) qui a suivi.

Les études régionales les plus récentes, basées sur les résultats des profils sismiques CROP/ECORS (ROURE ET ALII 1990, 1996; PFIFFNER ET ALII, 1997), ont mis en évidence une structuration interne de la chaîne relativement simple à petite échelle et homogène tout le long de l'arc des Alpes occidentales. Les Alpes constituent une chaîne double, "européenne" pour le secteur externe et "insubrienne" ou "apulienne" pour le massif interne, où l'on peut distinguer trois grands domaines structuraux reproduisant en partie les conceptions paléogéographiques des modèles précédents (Fig. 4.3). On a donc:

- un domaine interne, appartenant à la plaque supérieure du mécanisme de collision, qui correspond au domaine subalpin des anciens auteurs;

- un domaine externe correspondant à l'avant-pays, ou à sa partie impliquée dans la portion la plus extérieure de la chaîne, qui correspond au domaine dauphino-helvétique des anciens auteurs;

- une partie axiale, délimitée par deux surfaces de discontinuité principales à l'échelle crustale (ligne insubrique à l'intérieur et front pennique à l'extérieur), dans laquelle sont comprises les unités océaniques et les nappes penniques et austro-alpines de la littérature précédente.



Figure 4.3 - Stéréogramme des Alpes Occidentales montrant les trois grands domaines structuraux (d'après DELA PIERRE ET ALII, 1999). Le côté antérieur correspond à peu près au profil sismique CROP/ECORS (ROURE ET ALII, 1990, 1996) qui a traversé la chaîne le long des vallées de l'Isère et de l'Orco. Le côté droit du schéma correspond au tronçon de la Plaine du Pô aux alentours de Turin. Dans les zones extérieures (côté gauche du schéma), sont indiquées, par des traits horizontaux les couvertures de l'avant-pays, par des traits verticaux les nappes helvétiques, tandis qu'en blanc est représentée la zone axiale de la chaîne, correspondant à la chaîne de collision proprement dite, et la partie réactivée de la marge européenne. Les structures principales ductiles et fragiles de l'empilement de nappes sont schématisées à l'intérieur de la zone axiale, les ophiolites les plus importants sont représentés en noir.

Le traitement des relevés géologico-structuraux effectués pour la réalisation de la nouvelle feuille "Bardonecchia" (SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA, 1999; DELA PIERRE ET ALII, 1999) a suivi ce nouveau schéma d'interprétation. Pour le versant français, au contraire, la cartographie officielle (Feuille n° 775 "MODANE" de la Carte Géologique de France à l'échelle 1:50.000; DEBELMAS, 1989) fournit les unités géologico-structurales en suivant encore la terminologie précédente. Dans la corrélation de la littérature géologique, indispensable pour la reconstruction de l'assise globale de la chaîne, il est important de tenir compte de cet aspect, afin d'éviter des incohérences ou de mauvaises interprétations.

Sur le versant français, en particulier, si l'on suit le schéma paléogéographique traditionnel (Fig. 4.4), on distingue:

- une Zone briançonnaise externe, dite aussi Zone Houillère;
- une Zone briançonnaise interne;
- une Zone piémontaise constituée de Roches Vertes ou "Schistes lustrés".



Figure 4.4 - Schéma structural simplifié des Alpes franco-italiennes (d'après DEBELMAS, 1980). 1) - Chaînes subalpines septentrionales; 2) - Chaînes subalpines méridionales; 3) - Massifs cristallins externes et bassins permocarbonifères; 4) - Zone ultradauphinoise; 5) - Zone Valaisane; 6) - Zone subbriançonnaise; 7) - Zone briançonnaise (Carbonifère-permien Axial); 8) - Zone Vannoise Mt. Pourri (Briançonnais métamorphique, âge: Carbonifère-permien); 9) – Briançonnais (âge: Mésozoïque); 10) - Massifs cristallins internes piémontais; 11) - Zone des calcschistes(Zone Piémontaise); 12) - Flysch néo-crétacés (Flysch à Helminthoïdes, Flysch de la Simme s.l.); 13) - Zone Sesia Dent-Blanche; 14) - Zone du Canavais et d'Ivrée; 15) - Jura; 16) – Bassins molassiques péri-alpins.

L'étude géologique générale pour le Projet préliminaire de la Galerie de sécurité s'est développée à la lumière du nouveau cadre d'interprétation qui représente l'ouvrage d'art le plus récent sur la structure des Alpes occidentales. Par conséquent, dans le *Mémoire* et sur les *Plans* généraux, nous suivrons le modèle proposé dans la nouvelle feuille géologique "Bardonecchia". En utilisant le concept d'?unité tectonostratigraphique?, on distingue ainsi une série d'unités définies, respectivement, ?de marge continentale?, "océaniques" et "ophiolitiques" (DELA PIERRE ET ALII, 1999; SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA, 1999).

Les "unités tectonostratigraphiques " sont définies comme des "volumes rocheux délimités par des contacts tectoniques et caractérisés par une succession stratigraphique et/ou une sur-

empreinte métamorphique et/ou une assise structurale significativement différente de celles des volumes rocheux adjacents " (DELA PIERRE ET ALII, 1997).

Les "unités de marge continentale" comprennent un socle cristallin pré-triasique mono- et polimétamorphique (représenté respectivement par les groupes d'Ambin et de Clarea) et une succession autochtone de méta sédiments mésozoïques de couverture, constituée par des calcschistes, des marbres et des quartzites. A celle-ci s'ajoute un groupe d'unités tectonostratigraphiques de couverture, essentiellement constituées de roches carbonatées mésozoïques et localement de calcschistes (Unités des Rois Mages, du Chaberton-Grand Hoche-Grand Argentier, de Valfredda, de Gad et du Vallonetto).

Les "unités océaniques", entendues dans l'acception d'unités déposées sur de la croûte océanique, sont représentées par les unités de l'Albergian et du Lac Noir. Les successions respectives sont surtout constituées par des calcschistes et localement par des marbres, quartzites et roches vertes. Les "unités ophiolitiques" comprennent surtout des successions de calcschistes et ophiolites (unités de la Roche de l'Aigle, du Vin Vert et de Cerogne-Ciantiplagna); leur déposition sur croûte océanique n'est pas sûre.

Nous avons enfin distingué les principales masses de gypses et cargneules que l'on trouve associées aux brèches tectoniques principales, séparant les unités océaniques e ophiolitiques de celles de marge continentale. L'assise géologico-structurale globale du secteur italien de la portion de chaîne observée est illustrée à la Fig. 4.5.



Figure 4.5 - Schéma géologico-structural à l'échelle 1:200.000 tiré des Feuilles n° 132-152-153 "Bardonecchia" de la Carte Géologique d'Italie à l'échelle 1:50.000 (SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA, 1999).

4.1 Substratum pré-quaternaire

La description des unités tectonostratigraphiques, ainsi que leurs complexes, est tirée des Notes explicatives de la Feuille n° 153 "Bardonecchia" (DELA PIERRE ET ALII, 1999), tandis que pour la géologie du versant français, nous nous référons à la cartographie géologique officielle et à la bibliographie récente, avec une définition des unités géologiques selon l'approche paléogéographique.

4.1.1 La Zone Piémontaise (Unité du Lago Nero)

Elle est constituée d'un fond océanique formé de serpentinites et ophicalcites, où s'appuie une succession sédimentaire d'affinité ligurienne comprenant des brèches de serpentinites et de basaltes, de radiolarites, de marbres à patine d'altération claire, de phyllades s'alternant à des schistes carbonatés à bords silicifiés, de phyllades noires en faciès de *black shales* et de schistes carbonatés "arénacés" alternés à pélites carbonatées. L'unité est caractérisée par la présence d'intercalations détritiques et d'olistolites, d'origine ophiolitique et continentale, répandues à tous les niveaux stratigraphiques, mais surtout dans la portion sommitale de la succession.

Dans le site du projet, n'affleurent que les lithotypes appartenant au Complexe du Lago Nero, comprenant les successions formées principalement de calcschistes, qui représentent, pense-ton, la portion de Crétacé de la couverture d'ophiolite. Dans ce secteur, le Complexe est représenté par une prédominance de calcschistes carbonatés et par des phyllades, avec intercalations de calcschistes.

Les calcschistes carbonatés à patine d'altération ocre, riches en ankerite, constituent des bancs massifs d'épaisseur métrique. Interprétables comme des dépôts détritiques, ils sont rapportables au Crétacé supérieur par cadre stratigraphique et par comparaison avec des faciès analogues présents dans toute la chaîne alpine (DEVILLE ET ALII, 1992). A l'intérieur, se trouvent, intercalées, des masses mineures de phyllades noires (dorsale en aval de la Croix Chabrière). Les phyllades dériveraient du métamorphisme de sédiments riches en substance organique. Ces lithotypes sont répandus dans toute la zone d'affleurement de l'unité, du Col de l'Assiette à la Pierre Menue.

Les phyllades, d'aspect luisant et de couleur noirâtre, sont associées à des intercalations mineures de calcschistes carbonatés et marbrés. Présentes elles aussi dans toute la zone d'affleurement de l'unité, elles représentent généralement des intervalles de quelques mètres d'épaisseur qui soulignent la disposition de plans de cisaillement internes. Dans la Haute vallée de Suse, sur le versant méridional du Jafferau, entre les cotes 2500 ÷ 2600 m env., les phyllades constituent une structure couchée à vergence Est de dimensions hectométriques.

Ces méta sédiments sont interprétés comme des dérivés de sédiments riches en substance organique, et sont reliés à l'épisode anoxique répandu à l'échelle du bassin de la Thétys datant de la limite entre le Crétacé Inférieur et le Crétacé Supérieur.

On observe localement des intercalations subordonnées de schistes quartzeux gris-verdâtres à niveaux décimétriques, et des marbres noir et ocre fortement repliés.

4.1.2 Zone Briançonnaise

La Zone Briançonnaise forme une vaste bande partagée en deux zones bien distinctes, décollées au niveau évaporite des cargneules inférieures:

a) - Une zone interne, constituant le substratum paléozoïque, connue comme ?Permocarbonifère axiale?,

b) – Une zone externe de couverture, de structure très compliquée, articulée en diverses unités tectoniques mineures; elle comprend des roches d'époque mésozoïco-éocène, en faciès briançonnais, c'est à dire avec la lacune caractéristique dans le cadre du Lias.

La zone interne, ou zone de la Vanoise méridionale, est constituée de deux bandes de terrains disposées à peu près en parallèle: vers l'Est elles accomplissent des lithologies non métamorphiques d'âge carbonifère, auxquelles font suite –toujours vers l'Est- un ensemble de terrains d'âge permo-carbonifère, métamorphosés lors de l'orogenèse alpine. Le substratum ne semble pas concerné par une tectonique de nappes, tandis que la couverture présente un style de déformation essentiellement par plis, avec développement de nombreux anticlinaux à failles.

Dans la zone externe, ou zone de Houillère, la succession lithostratigraphique se présente presque partout décollée du substratum et repliée sur elle-même, s'articulant en petites écailles rapprochées. La portion inférieure d'âge triasique (épaisseur 300 ÷ 1000 m) comprend:

- des quartzites de milieu continental qui se sont déposés en continu sur le Verrucano sousjacent ;

- des schistes, des cargneules et des gypses, constituant un niveau de décollement régional, responsable du glissement de la couverture lors des phases tectoniques plissées;

- des calcaires et dolomies de milieu marin, de plate-forme carbonatée, d'épaisseurs élevées. La sédimentation, interrompue lors du Lias par l'émersion générale du domaine, reprend avec des calcaires de mer profonde (âge: Crétacée-Paléocène), suivis de dépôts détritiques à granulométrie fine (âge: Eocène Moyen-Supérieur).

La couverture se caractérise par une assise tectonique remarquablement compliquée et diversifiée. Le caractère le plus intéressant est la "disposition en éventail" des différentes unités qui ont une vergence Ouest ou Sud-Ouest sur le côté occidental, se disposent vers le Nord dans le secteur central, pour assumer ensuite une vergence Est ou Nord-Est sur le bord interne. C'est dans cette zone que les unités briançonnaises, disposées en succession inverse, glissent vers les unités piémontaises. Cette assise particulière qui a entraîné les unités géométriquement supérieures de l'édifice structural briançonnais à se déplacer vers l'Est, dérive de mouvements succédant à la première mise en place des nappes briançonnaises à vergence externe (vers l'Ouest). Le style de déformation, connu sous le nom de rétrocharriage,

représente probablement la réaction superficielle et passive de la couverture, déjà repliée sur elle-même, à des mouvements du socle liés aux phénomènes de subduction qui se sont vérifiés au contact avec la zone Piémontaise.

Dans les zones les plus internes du domaine briançonnais, on a aussi reconnu un léger métamorphisme en *faci*ès de schistes verts, dû à une phase déformatrice d'intensité supérieure.

4.1.3 Brèches tectoniques

Les brèches tectoniques soulignent l'"accident" de Chavière comprenant des gypses et cargneules avec des fragments de calcaires et dolomies du Massif de la Tête Noire. Ces termes affleurent derrière la plaine et sur le Col de Chavière et dans le bassin de Modane. L'accident de Chavière montre un important contact tectonique à l'échelle régionale, qui sépare le secteur le plus externe de la Zone du Briançonnais de celui de la Vanoise méridionale, plus interne. Les brèches à matrice carbonatée, contenant des clastes subanguleux carbonatés (marbres, dolomies) et des sous-ordres de clastes de calcschistes et de micaschistes, sont localisés en correspondance de l'importante discontinuité tectonique qui sépare la Zone Briançonnaise de la Zone Piémontaise.

Pour ces dépôts, généralement indiqués dans la littérature géologique comme ?cargneules?, plusieurs interprétations et collocations chronologiques ont été proposées. Par le passé, le terme ?cargneule? a été utilisé pour regrouper différents lithotypes, interprétés dans l'ensemble comme des évaporites d'âge triasique, en disposition secondaire sur les principaux plans de mouvement tectonique, où ils auraient joué le rôle de ?lubrifiant tectonique?. Les études effectuées au cours des trois décennies dans l'arc alpin occidental ont, elles, mis en évidence que ces roches, tant par leur composition, que par leur disposition, doivent avoir un âge beaucoup plus récent. (DELA PIERRE ET ALII, 1999).

Dans le cadre de la Haute Vallée de Suse, trois typologies principales de litho faciès ont été individualisés: brèches résiduelles, brèches détritiques, calcirudites, calcarénites et calcilulites. La formation des brèches date en tout cas d'après toute l'évolution structurale en régime ductile de la portion de chaîne en examen. La distribution des dépôts et leurs rapports avec le substratum s'insèrent dans le modèle proposé par CARRARO & MARTINOTTI (1993) et repris par GIARDINO (1995). Les brèches résiduelles dériveraient d'imposants phénomènes de karsification qui se sont développés en conditions chimiques-physiques particulièrement favorables (intense fracturation des contacts tectoniques, basse température, agressivité élevée des eaux circulant en profondeur, etc.). Les brèches détritiques constitueraient le produit de la réélaboration superficielle des brèches de dissolution, comme le confirment leurs rapports géométriques avec le substratum. Calcirudites, calcarénites et calcilutites représenteraient au contraire le produit

de la sédimentation détritique provoquée par les eaux circulant dans des milieux hydriques en surface (lits, mares, petits bassins). La composition des brèches et les rapports morphostratigraphiques avec le substratum et les dépôts quaternaires suggèrent un âge Pliocène (?) – Pléistocène supérieur pour cette unité (DELA PIERRE ET ALII, 1999).

4.2 Evolution structurelle et néotectonique

La vallée de l'Arc, ainsi que la Moyenne et la Haute Vallée de Suse, se développent à l'intérieur d'un secteur de la chaîne alpine intéressé par une longue et compliquée histoire de déformation, qui n'est pas encore complètement achevée, caractérisée par d'anciennes phases avec des styles déformatifs de type ductile et des phases plus récentes (période tardive orogénique alpine) de type fragile.

Le cadre structurel ductile des calcschistes appartenant au domaine piémontais a été analysé en détails par plusieurs auteurs que l'on peut consulter pour de plus amples détails (ALLENBACH, 1982; ALLENBACH & CARON 1986). Dans le site de la Vallée de Suse, en particulier, on ne reconnaît que par endroits la phase de plissement la plus ancienne (F1) qui a produit une schistosité pervasive et de transposition (S1), généralement conservée dans les lithotypes les plus compétents (gneiss, marbres). Dans les lithotypes plus riches en mica et plus ductiles, au contraire, la schistosité originaire est peu conservée, tandis qu'une seconde schistosité S2 se développe de façon pervasive, liée à une phase de plissement F2. La première phase de plissement (F1) ne survit que dans certains cas, comme charnière intrafoliaire en plis isoclinaux. Ces deux discontinuités planaires peuvent, selon les circonstances, se présenter comme des schistosités principales (à valence ?régionale?), et dans des conditions favorables d'observation, elles peuvent être discriminées sur la base des rapports d'intersection et de chevauchement. Dans le site qui nous intéresse, par rapport à la présence importante de phyllosilicates dans la composition de la roche, la schistosité principale correspond à S2, elle se dispose avec immersion au SW ÷ WSW avec inclinaison variable entre 20 ÷ 30°. En ce qui concerne la phase déformatrice S1, celle-ci est rarement préservée, et elle n'est observable que dans le faciès de calcschistes carbonatés sous forme de micro-plis à l'intérieur des microlithons.

L'évolution structurale récente de la chaîne est caractérisée par une intense déformation de type fragile, qui se manifeste par une série de discontinuités mécaniques présentes à toutes les échelles conditionnant soit les principaux traits morphologiques de tout le secteur, soit le comportement mécanique du massif rocheux. On distingue trois systèmes principaux de failles dont l'orientation médiane, sur la base de la plus haute fréquence des valeurs de la direction des plans, est de N60°, N100°/N140° et subméridienne (DELA PIERRE ET ALII, 1999).

Le système direct N60°, avec distribution des valeurs de direction comprise entre N40° et N70°, présente des systèmes conjugués de type étiré avec des plans immergents au NO et SE et de nettes évidences de mouvements passants sénestres.

Le système direct N100°/N140° montre un faible caractère passant dextre et des évidences de distension avec abaissement prédominant des côtés méridionaux.

Le système subméridien, dont les valeurs de direction des plans sont comprises entre N160° et N10°, est caractérisé par des mouvements de type étiré.

Les systèmes fragiles reconnus trouvent une claire correspondance tant dans l'orientation de failles régionales signalées dans d'autres secteurs limitrophes au Massif d'Ambin (DELA PIERRE

ET ALII, 1999), que dans le développement des principaux sillons de vallée et, donc, dans la configuration globale du réticule hydrographique et du relief. En particulier, entre les discontinuités à direction N60°, rappelons la faille "Modane-Termignon-Ruisseau de la Chavière" se développant le long du tronçon supérieur de la Vallée de l'Arc, à la frontière NO du Massif de l'Ambin (FUDRAL, 1998). Cette incision est parallèle au tronçon de la Vallée de la Suse comprise entre Chiomonte et Oulx, correspondant exactement à une zone de déformation tectonique de disposition analogue. Cette dernière structure N60°, quoique peu évidente comme structure individuelle, se montre très répandue autant dans le Massif d'Ambin que dans les ophiolites et les unités océaniques (DELA PIERRE ET ALII, 1999). La haute Vallée de Suse sur le tronçon Oulx-Bardonecchia et l'incision parallèle de la Vallée Fredda (sur le versant gauche, juste au nord de la dorsale M. Jafferau-M. Viv Vert), assument une orientation analogue au système de failles N100°/N140° tandis que la vallée du T. Fréjus se dispose avec direction subméridienne. L'étroite coïncidence entre la "texture" du système hydrographique principal, c'est à dire le développement érosif à l'échelle de tout le relief, et les systèmes de discontinuité définis montre la diffusion et la pénétration de ces derniers sur le site du projet, et leur empreinte profonde dans le comportement mécanique de la roche à de plus grandes profondeurs aussi.

Dans le site examiné, un rôle fondamental est joué par la ?Néotectonique? pour la compréhension de l'assise structurale, à savoir l'étude de l'évolution géodynamique récente étendue à un intervalle de temps suffisant pour bien situer la tectonique en cours et permettre des estimations sur les taux de déformation crustale actuels. L'évolution tectonique des Alpes occidentales, malgré son histoire de déformations longue et compliquée, n'est toujours pas terminée et les mouvements d'origine tectonique, quoique de très faible intensité, sont encore à même de déterminer des effets importants, comme:

- l'activité sismique de la basse Vallée de Suse et du Pinérolais ;

- les grandes déformations gravitaires présentes sur les versants de la Haute vallée de Suse et de la Vallée de l'Arc semblent être guidées par de plus récents mouvements de la croûte terrestre présents dans cette zone..

L'étude de l'activité néotectonique menée dans le cadre de la nouvelle Feuille géologique "Bardonecchia" s'est basée sur l'analyse structurale des déformations tectoniques intéressant les formations superficielles ou présentant des indicateurs cinématiques à caractère superficiel, et sur l'étude d'éléments morphologiques ayant enregistré des événements de déformation. Des évidences structurales, stratigraphiques et morphologiques relatives à l'évolution tectonique récente ont été relevées le long d'une vaste bande de plusieurs kilomètres en direction N60°E, qui comprend des secteurs de la Vallée de Suse et de Chisone et de leur crête (Fig. 4.6). Dans cette bande sont présentes des déformations superficielles différemment orientées et des failles subverticales à différente échelle, avec direction prédominante N60°E et N120°E (DELA PIERRE ET ALII, 1999). Dans le substratum rocheux, ces failles coupent toutes les autres discontinuités structurales relevables, elles intéressent parfois aussi les couvertures superficielles et, dans certains cas, il est évident qu'elles ont interagi avec le modelage de l'érosion. Les systèmes de discontinuité fragiles les plus fréquents définissent les sites à concentration majeure de dépôts quaternaires et délimitent beaucoup d'accumulations gravitaires. En particulier, l'incision parcourue par la Doire, à tendance généralement géométrique, correspond à une succession de failles passantes situées entre Suse et Oulx, Oulx et Beaulard, Beaulard et Bardonecchia. Le secteur en senestre de la vallée est, de plus, disloqué par rapport à d'importants éléments de distension à cheminement N120°E.

Ces évidences laissent supposer que ce secteur alpin a connu des épisodes récents de déformation. La concentration de glissements et déformations gravitaires profondes qui caractérisent le secteur Suse-Chisone pourrait aussi démontrer que le principal champ d'efforts identifié, la zone de cisaillement en transtension orientée au N60°E, interagit avec la morphogenèse actuelle (GIARDINO & POLINO, 1997). Sur la base de ces éléments, on peut imaginer, raisonnablement, que le même champ d'efforts influence fondamentalement le comportement mécanique du massif rocheux tant en superficie qu'en profondeur.



Figure 4.6 - Schéma néotectonique et principales unités litho-structurales (modifié par DELA PIERRE ET ALII, 1999). 1) - socle pré-triasique indifférencié; 2) - unités de calcschistes du domaine piémontais, indifférencié; 3) - unités tectonostratigraphiques inférieures de couverture carbonatée; 4) - unités tectonostratigraphiques supérieures de couverture carbonatée; 5) – principales masses de gypses et anhydrites; 6) – importantes accumulations de glissements; 7) – principales masses d'alluvions; 8) – déformations gravitaires profondes de versant (DGPV); 9) – limites stratigraphiques; 10) – glissements; 11) – contacts tectoniques et faillles (certains, présumés); 12) – principaux systèmes de failles passantes; 13) - secteur en extension de la Zone de coupe Suse-Chisone; 14) – secteurs en forte subsidence ou surrection.

5. CADRE DE CONNAISSANCES OBTENU SUITE A LA REVISION DES DONNEES GEOLOGIQUES-STRUCTURALES ET GEOTECNIQUES RELEVEES LE LONG DU TUNNEL DU FREJUS

5.1 Unités lithologiques-stratigraphiques du substratum

Les études menées dans le cadre du projet du tunnel existant et les levés effectués lors de sa réalisation, tant le long du tunnel même, que dans la galerie de reconnaissance ouverte sur le versant italien, ont permis l'acquisition d'une quantité impressionnante de données géologiques et structurales en correspondance du tracé. Toutefois, leur présentation est dispersée dans de nombreux Mémoires et Rapports rédigés selon différents critères, tant en ce qui concerne les différentes phases de réalisation du projet que pour les deux versants examinés. Grâce à leur intégration et à une révision critique, à la lumière du modèle d'interprétation formulé dans la nouvelle Carte géologique d'Italie, on peut dresser un tableau de connaissances suffisamment détaillé et représentatif du volume rocheux concerné par le nouvel ouvrage. Les conditions structurales et de disposition des lithologies, ainsi que la distance limitée (environ 30 m) font en effet penser que les caractéristiques principales influençant le comportement de la roche autour du tunnel existant et de la galerie de sécurité sont identiques.

Dans l'ensemble, la quasi totalité du Tunnel routier est ouverte dans les unités du substratum pré-quaternaire représenté par l'unité des calcschistes, et, en moindre mesure, par des lithologies appartenant à la zone briançonnaise externe. Exception faite du premier tronçon sur le versant français, le tunnel est en effet entièrement inséré dans du calcschiste presque jusqu'aux environs de la tête côté Italie.

Si l'on se déplace de Modane vers Bardonecchia, après avoir dépassé le site d'entrée inséré dans des terrains quaternaires, le substratum rocheux est constitué, sur un premier tronçon, de gypses et anhydrites et de roches de couverture (dolomies, quartzites et schistes séritiques) probablement d'âge triasique et attribués traditionnellement à la Zone briançonnaise externe. En continuant vers le sud, ces lithotypes sont juxtaposés, à travers un contact de nature tectonique, à une succession de calcschistes représentant la plus grande partie de l'ossature rocheuse le long de laquelle se développe le tunnel actuel. Ces roches, traditionnellement attribuées par les auteurs italiens à la Zone piémontaise ou Nappe des calcschistes à Roches Vertes, (correspondant à la nappe des *Schistes lustrés*), ont été attribuées, dans la nouvelle carte géologique officielle réalisée sur le versant italien, à l'unité ophiolitique du Lago Nero.

On relève des calcschistes en continu jusqu'aux abords de la tête côté Italie (P. Km 12+743), où, à travers une superficie d'érosion, ils sont en contact latéral avec des dépôts morainiques

du glacier de la Vallée du Torrent Rochemolles. La dernière partie du Tunnel se développe sur 143 m à l'intérieur de ces dépôts quaternaires à granulométrie grossière (graviers, galets et sables), bien comprimés et par endroits cémentés.

Pour une description détaillée de l'assise géologique-structurale et géomorphologique du site de la tête côté Italie, se référer au *Mémoire géologique-géotechnique* (document n° 20R) et aux tableaux:

- Localisation investigations géognostiques - échelle 1:1.000 (document n° 68P),

- Carte géologique et géomorphologique du site de la tête côté Italie – échelle1:2000 (document n° 69P);

- Profil géologique-géotechnique 1-1' - échelle 1:200 (document n° 70P);

- Profil géologique-géotechnique 2-2' échelle 1:200 (document n° 71P);
- Profil géologique-géotechnique 3-3' échelle 1:200 (document n° 72P);
- Eléments géomorphologiques du site de la tête côté Italie (document n° 84P);
- Eléments concernant l'activité du Torrent Rochemolles (document n° 85P).

Ci-dessous seront décrits la succession lithostratigraphique et les principaux éléments structuraux, comme la schistosité, les failles et les joints, rencontrés lors de la réalisation du Tunnel routier actuel.

La plupart des éléments décrits sont rapportés, sous forme de schéma, dans le *Profil géologique du Tunnel routier du Fréjus – échelle 1:10.000* (document n° 73P) qui représente le tableau de synthèse des caractères géologiques-structuraux des lithotypes rencontrés au cours de la réalisation du tunnel du Fréjus.

5.1.1 Evaporites et roches de couverture de la Zone Briançonnaise Externe

Cette portion de la succession est caractérisée par la présence d'une série de petites écailles secondaires constituées d'un groupe de lithologies très hétérogènes comprenant des calcaires dolomitiques, des schistes phylladiques, des quartzites, des gypses et des cargneules. Ces dernières, en particulier, présentent des caractères de massif rocheux extrêmement variables, dont la structure peut être massive ou bréchique, avec des brèches dont les clastes sont constituées surtout de calcaires dolomitiques à cargneules terreuses. Localement, la roche est altérée à du ciment argilo-limoneux.

La description synthétique des principaux lithotypes de la séquence d'écailles tectoniques appartenant à la Zone Briançonnaise Externe, rencontrés durant la construction du tunnel routier actuel sur le tracé français, est fournie dans le Tab. 5.1. A partir de la tête, après une épaisseur limitée de dépôts quaternaires (8 m), on traverse un secteur constitué principalement d'anhydrites non altérés de structure massive (jusqu'au P.K. 0+362). Des portions de roche fortement fracturée, avec évidences de développement de phénomènes de dissolution et hydratation ayant déterminé le passage de la phase anhydre en gypse, sont localisées entre les

points km 0+008 \div 0+025. Suivent des bancs d'anhydrites à structure plus homogène, avec à l'intérieur des cavités de dissolution avec de rares venues d'eau (pk 0+025 \div 0+362).

Dans la partie suivante, l'excavation a rencontré, jusqu'au P.K. 0+412, une couche de cargneules à caractères très variables, de roche tendre à structure bréchique et consistance friable (pk 0+362 \div 0+372), à massive localement fissurée (pk 0+372 \div 0+412). A l'intérieur, se trouvent des zones de suintement et venues d'eau très limitées. Le contact avec les lithotypes appartenant au groupe de calcschistes est marqué par la présence d'une zone d'environ 40 m où paraissent des schistes verts quartziques (pk 0+412 \div 0+448).

Point (km)	Description lithologique
0+000 ÷ 0+008	Dépôts quaternaires.
0+008 ÷ 0+025	Anhydrites fracturées avec formation de gypse.
0+025 ÷ 0+070	Anhydrites massives avec 2 ou 3 cavités de dissolution à
	rares venues d'eau.
0+070 ÷ 0+362	Anhydrites saines et compactes.
0+362 ÷ 0+376	Cargneules terreuses, friables à structure bréchique.
0+376 ÷ 0+412	Cargneules massives, tendres, fissurées et caillouteuses
	avec venues d'eau possibles.
0+412 ÷ 0+448	Schistes verts quartziques.

Tableau 5.1 – Principaux lithotypes rencontrés lors du creusement du Tunnel routier du Fréjus actuel, du côté français dans le tronçon compris entre les points km 0+000 ÷ 0+448.

La zone comprise entre les pk 0+480 ÷ 1+480 se développe entièrement à l'intérieur d'un banc de calcschistes noirs très fracturés avec de fréquentes venues d'eau (Tab. 5.2). En avançant vers le Sud, le tunnel a de nouveau rencontré de l'anhydrite sur une longueur d'env. 230 m, représentant une écaille tectonique appartenant probablement à l'unité du Briançonnais Externe. Dans ce secteur, les anhydrites présentent une structure massive, avec intercalations de portions bréchiques constituées de clastes de dolomies et de calcaires (Tab. 5.2).

Point (km)	Description lithologique
0+448 ÷ 1+480	Calcschistes noires intensément fracturées; venues d'eau
1+480 ÷ 1+700	Anhydrites massives avec éléments bréchiques de dolomies
	et calcaires.

Tableau 5.2 – Principaux lithotypes rencontrés lors de l'excavation du Tunnel du Fréjus actuel, du côté français dans la zone comprise entre les P.K. 0+448 ÷ 1+700.



Figure 5.1 - Relevé géologique sur les parois et sur la voûte du tunnel du Fréjus actuel, dans la zone P.K. 1+600 ÷ 1+802 (d'après AMAT-CHATHOUX, 1978).

5.1.2 Les calcschistes de la Zone Piémontaise

En poursuivant au-delà du P.K. 1+710, l'excavation se développe entièrement à l'intérieur des calcschistes de la Zone Piémontaise attribuables, sur le versant italien, à l'unité tectonostratigraphique du Lago Nero.

Cette unité est représentée par une succession monotone de paraschistes calcaires, intercalés à des schistes argileux et/ou arénacés, constitués en grande partie de calcites et de quartz (80-90%) et en second lieu de muscovites et de chlorites. Lors de la construction du tunnel actuel, à l'intérieur de la formation des calcschistes, trois types principaux de faciès ont été rencontrés:

- calcschistes carbonatés à schistosité peu pervasive, compactes en bancs de l'ordre du décimètre (jusqu'à quelques mètres), à l'intérieur desquels on a recensé des enclaves de calcite et/ou de quartz en correspondance des systèmes de fracture;

- calcschistes phylladiques à schistosité marquée, lithologiquement constitués d'abondants micas et graphites. Ils sont souvent feuilletés avec de rares enclaves calcitiques;

- calcschistes bordés à schistosité évidente, généralement riches de couches à calcite prédominante; ce lithotype est caractérisé par la présence de plis fréquents à rayon court et par l'enclave d'éléments calcito-quartzeux en pourcentage supérieur par rapport aux faciès précédents.

Ces trois types lithologiques, auxquels correspondent évidemment des caractéristiques mécaniques très différentes, s'alternent à l'intérieur de l'Unité du Lago Nero très fréquemment et de façon peu ordonnée, donnant à l'ensemble un aspect extrêmement hétérogène à petite échelle.

Le calcschiste est très déformé (on note trois phases déformatrices principales) avec des charnières de plis déracinés et de nombreux phénomènes de *boudinage* observables en correspondance des couches plus compétentes (constituées surtout de carbonate).

La texture fortement schisteuse confère à la roche une fissilité élevée, favorisant la subdivision du calcschiste le long de plans parallèles, en bancs de dimensions variant de centimétrique à décimétrique. Cet aspect, particulièrement évident dans le *faciès* le plus phylladique, est accentué lors des volées; les sollicitations transmises par l'utilisation de l'explosif déterminent en effet une augmentation de la fissilité primaire de la roche, favorisant le détachement de portions de calcschiste surtout le long des plans de schistosité principale.

Le massif rocheux est caractérisé par un degré de fracturation variable. L'excavation a en effet fait apparaître des secteurs où le calcschiste est faiblement fracturé et des zones où la roche est intensément fracturée. Localement, on a observé des bandes cataclastiques avec des portions de calcschiste en écailles lenticulaires immergées dans une matrice très déformée (cataclasites ou brèches de différents calibrages, et *gouges*).

En général, le comportement mécanique de la roche est marqué par la texture fortement schisteuse qui confère au calcschiste une fissilité élevée. La roche tend à se fragmenter, le long de plans parallèles, en écailles de dimensions variant de centimétrique à décimétrique. La

schistosité principale est caractérisée par une réorientation des micas se disposant, pour leurs dimensions principales, parallèlement à la superficie de schistosité.

La fracturation est irrégulièrement distribuée, avec alternance de zones peu fracturées et de zones très fracturées. Lorsque la roche est fortement fracturée, la masse est constituée d'un ensemble d'écailles lenticulaires immergées dans une matrice fine d'aspect mylonitique. En raison de leur extension limitée, le Tunnel actuel n'a pas rencontré de problèmes particuliers de stabilité lorsqu'il a traversé cette zone.

A l'échelle de la galerie, de nombreuses veines s'intercalent dans les calcschistes, en général constituées de calcites et de quartz en quantité variable, qui, dans certains cas et localement, atteignent des pourcentages de 20-30%. On recense trois générations de veines:

1) – veines à calcite et quartz, contenant des quantités variables de mica blanc, de chlorite, de pyrite et de substances carbonées; épaisses de quelques centimètres à quelques décimètres; elles se présentent fréquemment en faisceaux épais correspondant avec la disposition des calcschistes et fortement repliés avec eux; à l'intérieur, au moins deux phases de déformation par plis ont été recensées;

2) - veines à calcite contenant des quantités variables de quartz, de mica blanc et de chlorite; leur disposition coupe celle des calcschistes et des veines de la phase 1), et sont elles aussi pliées;

 veines à calcite prédominant, à sens de mouvement rectiligne et continuité limitée (quelques centimètres en largeur, quelques mètres maximum en longueur); elles représentent le remplissage de diaclases ou de fractures de contrainte tardive.

5.2 Assise géologique structurale

Ce paragraphe décrit les principaux éléments structuraux observés lors de la réalisation du Tunnel actuel, facteurs fondamentaux pour une caractérisation mécanique des différents lithotypes à grande échelle.

Les levés structuraux effectués pendant l'avancement de l'excavation ont révélé la présence de différents systèmes de discontinuité comme des schistosités, des failles, des joints, qui, de façons différentes et selon les différentes orientations, ont influé sur la stabilité de l'excavation même et sur le comportement de la masse.

L'assise structurale des différents lithotypes est caractérisée principalement par la schistosité régionale immergente en moyenne vers NW avec inclinaisons variables de sub-horizontales à un maximum de 70° env. En particulier, sur la base des données bibliographiques et des observations directes effectuées en tunnel (Campagne de reconnaissances géognostique – MUSI.NET, 2002) et à l'extérieur (relevé structural de terrain), on note que l'inclinaison moyenne de la schistosité régionale, en se déplaçant le long de l'axe du tunnel dans le sens Italie-France, montre une augmentation considérable des valeurs de correspondance du contact avec les Unités Briançonnaises affleurant dans la partie basse du versant français, passant de 25° (valeur moyenne observée à l'intérieur des calcschistes) à 70° (valeur mesurée en correspondance du contact entre calcschistes et anhydrites à l'intérieur du tunnel - pk 1+710). La schistosité présente un caractère pervasif à l'échelle régionale avec espacement de millimétrique à centimétrique à l'intérieur des calcschistes, tandis qu'elle est moins évidente dans les lithotypes appartenant à l'Unité Briançonnaise, comme les gypses, les anhydrites et les cargneules.

En plus de la schistosité, les principaux systèmes de discontinuité sont représentés généralement par des failles, des fractures diaclases et cataclasites. Sur la base des observations effectuées lors des opérations de creusement, on a recensé différents systèmes de discontinuité respectivement dans le chantier français et dans l'italien, avec une orientation comparable.

La Fig. 5.1 fournit le schéma récapitulatif des orientations moyennes des discontinuités rencontrées le long du tronçon français pendant l'avancement, et l'interférence de leurs directions avec l'axe du tunnel routier (orienté en moyenne en direction Nord-Sud). Le sens d'avancement de l'excavation est du Nord vers le Sud, tandis que les parois dénommées "droite" et "gauche", se réfèrent respectivement aux directions Ouest et Est.

Dans l'ensemble, on a observé quatre familles de discontinuité (représentées en Figure 5.1):

- discontinuité n° 1. Elle correspond à la schistosité régionale. Les plans immergent en moyenne vers l'Ouest, causant des phénomènes d'instabilité qui, selon l'inclinaison, peuvent intéresser une grande partie de la voûte (basses valeurs d'inclinaison des plans de schistosité) ou de façon limitée, le secteur de raccord entre la paroi de droite et la voûte (valeurs d'inclinaison des plans de schistosité élevées);

- discontinuité n° 2. Elle comporte une famille de diaclases en direction Est-Ouest (disposées perpendiculairement à l'axe du tunnel) et immergentes vers le Sud avec une inclinaison de 45°;

 discontinuité n° 3. Il s'agit d'une famille de fractures disposées, comme les précédentes, perpendiculairement à l'axe du tunnel (Est-Ouest). Les plans de discontinuité immergent vers le Nord (immersion opposée à celle de la famille n° 2) avec inclinaison de 45°;

- discontinuité n° 4. Cette famille de discontinuité se développe selon la direction de développement du tunnel (Nord-Sud), et est caractérisée par des plans subverticaux (inclinaison moyenne 50°÷70°) immergentes vers l'Est.



Figure 5.1. Orientation des principaux systèmes de discontinuité par rapport à la direction d'avancement de l'excavation, relevés le long du tronçon français lors de la construction du tunnel (d'après BEAU ET ALII., 1980).

L'interférence entre les différentes familles de discontinuité observées et la direction de développement du tunnel, détermine des conditions d'instabilité de l'excavation au niveau de la voûte et des parois (voir Fig. 5.2), causant le détachement de portions de roche de dimensions variant entre quelques dm³ et quelques m³. Les principaux problèmes de stabilité doivent s'attribuer à la disposition moyenne des plans de schistosité (discontinuité n° 1) qui interfèrent dans la direction de l'axe du tunnel, entraînant des décollements de portions considérables de matériau entraînant un recul du gabarit essentiellement au niveau de la calotte. Ce phénomène revêt un relief particulier là où l'excavation intercepte les discontinuités appartenant à la famille n° 4. L'interférence entre ces superficies, immergentes à l'Est avec des inclinaisons de moyennes à élevées, et les plans de schistosité (discontinuité n° 1), provoque en effet une augmentation de l'instabilité de la paroi Est et de la voûte, comme on le voit dans la coupe transversale de la Fig. 5.2. D'autres phénomènes d'instabilité peuvent s'attribuer à l'interaction entre les discontinuités appartenant aux familles n° 2 et n° 3, comme on le voit dans la coupe longitudinale fournie elle aussi à la Fig. 5.2. Dans ce cas, les plans de discontinuité immergents vers le Nord (discontinuité n° 2) et vers le Sud (discontinuité n° 3) avec inclinaison de 45°,

causent l'isolement de blocs de dimensions variables entre quelques dm³ et quelques m³, avec décollement de matériau au niveau de la voûte.



Figure 5.2. Orientation des principaux systèmes de discontinuité par rapport à la section d'excavation et problèmes de stabilité relatifs rencontrés lors de la construction du tunnel (chantier français) (d'après BEAU ET ALII., 1980).

Les données structurales obtenues de l'analyse de la documentation concernant les levés effectués sur le tronçon italien (direction d'avancement du Sud vers le Nord), font apparaître la présence, dans ce secteur également, de quatre systèmes principaux de discontinuité (Fig. 5.3). En particulier, on observe la présence d'un système de discontinuité défini comme "principal", comprenant une série de failles généralement très étendues et ouvertes avec une fréquence de l'ordre d'une centaine de mètres, qui, en relation avec leur immersion et inclinaison par rapport à la direction de développement de la voûte, déterminent des phénomènes d'instabilité particulièrement intenses à l'échelle locale. Les failles principales sont indiquées dans le *Profil géologique du Tunnel routier actuel* (échelle 1:10.000) et distinguées en failles compressives et failles distensives. Ces structures s'étendent en moyenne vers l'Est-Ouest, en pénétrant soit vers le Nord soit vers le Sud, avec inclinaisons variant de 30° à 80°

(coupe n° 4, Figure 5.3). En ce qui concerne l'orientation, ces plans peuvent être comparés, dans l'ensemble, avec les familles de discontinuité observées dans le chantier français, même s'ils présentent, par rapport à celles-ci, des inclinaisons en général supérieures. Localement, on a recensé des discontinuités orientées au Nord-Sud, pénétrant vers l'Est et vers l'Ouest avec des inclinaisons élevées, comparables à la famille de discontinuité n° 4 précédemment décrite (coupes n° 2 et n° 3, Figure 5.3). Dans ce cas également, comme on l'a observé le long du tronçon français, les principaux problèmes de stabilité rencontrés au cours de l'excavation, sont liés à l'interférence entre l'immersion des plans de schistosité et la direction de développement du tunnel. La disposition de la schistosité régionale (immergente en moyenne en direction NW) détermine le décollement de portions de roche au niveau de la voûte et de la partie haute de la paroi de gauche. Les principaux phénomènes d'instabilité entraînent des volumes de matériau de l'ordre de plusieurs dm³÷m³, avec une augmentation considérable dans les zones où la schistosité intercepte les principaux systèmes de discontinuité, causant des ?sfornellamenti? avec des formations de hors-gabarit au niveau de la voûte et des parois latérales (coupes n° 2 et n° 3, Figure 5.3).



Figure 5.3. Orientation des principaux systèmes de discontinuité par rapport à la section d'excavation et problèmes relatifs de stabilité rencontrés lors de la construction du tunnel (chantier italien) (D'après LUNARDI, 1980).

En particulier, l'analyse détaillée des discontinuités des plans effectuée par POLINO (1978) sur le tronçon compris entre les points km 9+868÷10+868, révèle que dans ce secteur prévalent trois familles de discontinuité constituées surtout de failles et de fractures dont les orientations sont indiquées dans le diagramme de projection des pôles de la Figure 5.4. L'auteur reconnaît une famille nommée A (Fig. 5.4) correspondant à un groupe de plans d'immersion comprise entre 160°÷225° et d'inclinaisons comprises entre 60°÷90°, une seconde famille dénommée B (Fig. 5.4) caractérisée par des plans d'immersion compris entre 345°÷30° et d'inclinaisons entre 50° et 85°, et une troisième famille (C) à plans d'immersion entre 250°÷315° et d'inclinaisons variant de 30° à 80°. Ce dernier groupe présente un maximum bien évident avec immersion autour de 300° et inclinaison de 80° env.



Figura 5.4. Projection polaire d'env. 200 pôles de fractures et failles relevées en souterrain entre les pk 9+868 et 10+868. S représente la projection du pôle correspondant à la schistosité moyenne de ce tronçon de galerie, A-B-C représente les concentrations principales de pôles des discontinuités des plans observées (d'après POLINO, 1978).

5.3 Venues d'eau

Lors de la réalisation de l'excavation, aucune venue d'eau d'importance n'a été signalée. D'habitude, la présence d'eau est indiquée par un suintement pouvant être fin ou répandu ou par de petites venues caractérisées par de faibles débits, concentrées essentiellement au niveau des zones où la masse est plus fracturée. En particulier, les venues d'eau les plus importantes sont localisées dans les secteurs où le tunnel rencontre les principales discontinuités tectoniques; la présence d'eau est signalée le long des plans de failles à ouverture élevée, le long des joints, au niveau des bandes cataclastiques ou de contacts tectoniques.

Dans le Profil géologique du Tunnel routier du Fréjus (échelle 1:10.000; tableau 73P) sont indiqués les points où est signalée la présence d'eau, sur la base des quelques données disponibles provenant des observations effectuées lors des phases d'excavation du tunnel POLINO (1978), en ce qui concerne la partie italienne, et par AMAT-CHANTOUX (1978), pour la partie française. Dans les deux cas, il s'agit de notes préliminaires décrivant sous forme synthétique les caractéristiques des lithotypes rencontrés pendant l'avancement, mettant en évidence de façon schématique, les principaux problèmes géologiques-structuraux et hydrogéologiques concernant la masse rocheuse traversée. Les données provenant du chantier italien ne se réfèrent qu'aux 4000 premiers mètres d'excavation (zone correspondant à l'actuel pk 8+868), tandis que le rapport français décrit le chantier jusqu'au pk 1+800 km. Dans le Profil géologique du Tunnel routier du Fréjus (échelle 1:10.000; tableau 73P) les venues d'eau sont indiquées avec comme symbole, un rectangle bleu (placé sous le tracé du tunnel) avec, lorsqu'elles étaient disponibles, les valeurs de débit, exprimées en m³ ou l/s. A partir de la tête côté France, on recense la présence de suintements fins ou répandus, localisés au niveau des pk 0+930 km (à la venue d'eau s'associe la formation de dépôts ferrugineux sur la paroi W), 1+200 km et 1+280 km. Des manifestations hydriques répandues ont été relevées dans la partie suivante, à proximité et à quelques centaines de mètres au-delà du contact tectonique, entre les anhydrites et les calcschistes au point 1+710 km. Les relevés géologiques-structuraux détaillés effectués dans cette zone du tracé font apparaître la présence de phénomènes de percolation et des traces diffuses d'humidité le long des principales surfaces de discontinuité, sans jamais signaler de venue d'eau à débit important. En continuant le long du tunnel, après la Frontière, on rencontre des venues d'eau de suintement répandu aux pk 7+338, 8+468 et 8+598. D'autres zones de suintement diffus généralement en extension limitée se rencontrent entre les pk 8+918 ÷ 8868, au pk 9+428, entre les pk 9+518 ÷ 9+568 et aux abords du pk 10+218. Il faut mentionner les venues d'eau localisées dans le tronçon compris entre les pk 10+038 ÷ 10+078, où l'on relève la présence d'une bande cataclastique orientée parallèlement à l'axe du tunnel. Les venues d'eau s'interrompent brusquement au point où la cataclasite intercepte une discontinuité ayant une direction orthogonale par rapport à l'axe du tunnel. Le débit massique global des venues d'eau enregistrées dans ce secteur est de 9 l/, se stabilisant en l'espace de quelques mois à 1-2 l/s. Du pk 10+558 au pk 10+611 on relève, associées à un

suintement diffus, de petites venues d'eau (tarissant en quelques mois), au niveau des orifices pratiqués en calotte pour l'installation des boulons, pour un débit total de 4-5 l/s. Enfin, au pk 11+718, lors des opérations d'excavation, on rencontre une poche d'eau d'environ 300 m³, épuisée en quelques heures.

Les descriptions concernant la typologie et la quantité d'eau estimée au cours de l'avancement dans les deux chantiers sont fournies dans le tableau descriptif annexé *Profil géologique du Tunnel routier du Fréjus* (échelle 1:10.000; tableau 73P). Les données disponibles indiquent pour le tracé italien un débit total d'eau d'env. 7 l/s.

Dans l'ensemble, la circulation hydrique souterraine est influencée et directement contrôlée par l'orientation des principaux systèmes de discontinuité concernant le massif rocheux.

5.4 Opérations de manutention effectuées à l'intérieur du tunnel routier du Fréjus

Dès le début des années '90, on recense, sur le tronçon central du tunnel, entre les pk 7+618+7+968, des phénomènes de déformation impliquant directement le revêtement de la chaussée. Afin d'évaluer les conditions de stabilité et de définir la nature de la déformation, la société SITAF engage une campagne de reconnaissances géognostiques, dans la zone comprise entre les pk 6+798 et 7+968; le long de ce secteur, la déformation se manifeste par un lent soulèvement du plan routier causant la formation de longues fissures longitudinales qui endommagent la chaussée et provoquent la rupture des tuyaux d'incendie au pk 7+886. En mai 1994, on réalise 9 sondages géognostiques à carottage continu (indiqués sur la carte Localisation investigations - planimétrie - échelle 1:10.000 - document n° 76P), disposés par groupes de trois au niveau d'autant de sections le long du tunnel, localisées aux pk 6+844 (section 3), 7+676 (section 2) et 7+888 (section 1). Sur chaque section, ont été effectués :un sondage vertical le long de la voie de circulation, dénommé SV, et deux sondages subhorizontaux en correspondance des parements latéraux du revêtement, dénommés SE (parement Est) et SW (parement Ouest). Les sondages sont équipés d'inclinomètres. Les schémas récapitulatifs des sections avec leurs sondages relatifs sont indiqués sur la carte Localisation investigations - coupes - échelle 1:200 (document n° 77P).

La campagne de reconnaissances comprend de plus les activités suivantes:

- mesures de convergence;
- nivellement plano-altimétrique de précision sur repères topographiques;
- mesures en forages avec extensomètre incrémentiel;
- mesure de déplacement en puits du système de drainage;
- mesures de déplacement sur fissures en piédroit et en calotte;
- lecture de bases de trois extensomètres situés en calotte pk 7+696;
- exécution de 9 essais au vérin plat, répartis sur trois sections points 7+888, 7+676 et 6+845 dénommés MP. (indiqués sur la carte *Localisation investigations – planimétrie – échelle 1:10.000 –* document n° 76P).

Les mesures effectuées le long du tronçon, en 1994-1995, montrent globalement la progression du phénomène de déformation se manifestant par des mouvements de type distensif sous le revêtement le long du parement Est, comme l'indiquent les mesures faites sur les extensomètres EE2 et EE3 installés dans les sondages SE2 et SE3, qui enregistrent des décollements à la profondeur de 3-4 m. On recense aussi de légères anomalies à 14 m de profondeur (extensomètre EE2) et dans la zone comprise entre 12÷17 m (extensomètre EE3). D'autres décollements de faible entité (0.2÷0.6 mm) sont enregistrés dans les tubes extensométriques verticaux installés dans les sondages SV1, SV2 et SV3, ce qui confirme la présence d'un phénomène de type distensif à des profondeurs variant de 4-5 m (extensomètres EV2 et EV3) jusqu'à 8 m (extensomètre EV1). Enfin, les mesures de l'état de tension du revêtement montrent une augmentation de pression le long du parement Est au niveau du vérin MPE2 situé à la base du piédroit.

A la lumière des résultats obtenus, dès l'été 1995, on a d'abord projeté puis mis en place une intervention de stabilisation afin de contraster le phénomène déformateur en cours. Lors de cette nouvelle campagne, on a placé des tirants au niveau des piédroits, dans les secteurs du tunnel compris entre le P.K. 6+669÷7+049 et entre 7+414÷8+034. L'intervention prévoit l'utilisation de tirants avec éléments de 450kN, longs de 12 m, insérés avec pas de 5 m dans la première partie (P.K. 6+669÷7+049) et pas de 2.5 m dans la seconde (pk 7+414÷8+034). Les mesures effectuées sur les instrumentations géotechniques (juin 1996), au cours de la période successive à l'installation des tirants, indiquent la présence de phénomènes déformateurs à l'extrados du tunnel sous le damier de transit. En particulier, dans cette zone, à 7 m de profondeur, on décèle des mouvements de type distensif à composante verticale (3.2 mm en l'espace de 16 mois), avec des mouvements associés à composante horizontale (max 13 mm), et des décollements légers sous les piédroits jusqu'à 18 m de distance de la voûte. Le suivi des instrumentations géotechniques (contrôle en juillet 1996), indique une sensible réduction des décollements, même si on enregistre des mouvements distensifs à composante verticale et horizontale selon la typologie observée durant les précédentes campagnes de reconnaissances. Les contrôles sur la structure relèvent une augmentation de la contrainte du revêtement et de la dalle dans les gaines de ventilation, ce qui confirme une reprise des phénomènes compressifs suite à l'interruption enregistrée au mois de juin (1996). La campagne de contrôle faite en avril 1998 confirme la progression des phénomènes déformateurs (augmentation des charges, mouvement lent mais graduel du massif rocheux aux abords de la voûte), montrant que le placement de tirants précédemment effectué ne peut être considéré comme définitif, malgré les améliorations apportées aux conditions de stabilité de la structure.

Dans la période mars-septembre 1999, une nouvelle campagne d'investigations est entreprise, comprenant deux sondages géognostiques à carottage continu, une série d'essais in situ et de mesures de contrôle des instrumentations en place. Les deux sondages, réalisés à partir du plan routier en direction verticale (sondage Sv1; pk 7+703) et avec inclinaison de 30° à la base du piédroit (sondage So1; pk 7+693), sont équipés (les deux sondages sont indiqués sur les

cartes *Localisation investigations – planimétrie – échelle 1:10.000 –* document n° 76P e *Localisation investigations – coupes – échelle 1:200 –* document n° 77P).

La dernière mise à jour du suivi des instrumentations géotechniques datant de septembre 1999, confirme la tendance évolutive des phénomènes déformateurs selon un gradient analogue à celui observé lors des précédentes campagnes. Quoique l'on relève de légers décollements aux abords de la voûte (mouvements compressifs sur les bases des extensomètres, augmentation des charges sur les tirants à certains endroits, fermeture des bases extensométriques installées dans les regards du caniveau des eaux, etc.), on observe une augmentation des charges sur le revêtement et sur les dalles du plan routier et de la gaine de ventilation.

L'analyse et la comparaison des données fournies dans les différents mémoires de mise à jour publiés par SITAF au cours de la période 1994-1999, sont recueillies en détail dans le *Mémoire géotechnique - mécanique* (document n° 23R).
6. CAMPAGNE DE RECONNAISSANCES GEOTECHNIQUE

La campagne de reconnaissances géotechnique effectuée dans le cadre du projet préliminaire de construction de la galerie de sécurité du tunnel routier du Fréjus, en juillet-août 2002, peut être subdivisée en deux phases distinctes: la première concerne l'étude en détails du site de la tête côté Italie, la seconde consiste en l'analyse des problèmes rencontrés à l'intérieur du tunnel routier du Fréjus.

Dans l'ensemble, on a réalisé 10 sondages géognostiques à carottage continu, partagés en 5 sondages à l'intérieur du tunnel existant et 5 sondages dans le site de la tête côté Italie. La description détaillée de la campagne de reconnaissances menée sur le site extérieur et un développement des résultats obtenus par l'analyse de la succession stratigraphique observée sont présentés dans le *Mémoire géologique-géotechnique* (document n° 20R) et dans les cartes thématiques s'y rapportant, énumérées ci-après:

- Localisation investigations géognostiques - échelle 1:1.000 (document n° 68P),

- Carte géologique et géomorphologique du site de la tête côté Italie – échelle 1:2000 (document n° 69P),

- Profil géologique -géotechnique 1-1' - échelle 1:200 (document n° 70P);

- Profil géologique -géotechnique 2-2' échelle 1:200 (document n° 71P),
- Profil géologique -géotechnique 3-3' échelle 1:200 (document n° 72P);
- Eléments géomorphologiques du site de la tête côté Italie (document n° 84P);
- Eléments concernant l'activité du Torrent Rochemolles (document n° 85P).

Ce chapitre décrit la phase de la campagne de reconnaissances géotechniques effectuée à l'intérieur du tunnel du Fréjus, comprenant 5 sondages à carottage continu (dénommés BH.; deux d'entre eux ont été équipés de tubes extensométriques) et une série d'essais au vérin plat, réalisés sur le revêtement en béton, afin d'évaluer l'état de contrainte de la roche dans certains secteurs du tracé. L'emplacement des sondages et des sections le long duquel les essais au vérin plat ont été effectués est indiqué sur la carte *Localisation investigations géotechniques – planimétrie* (document n° 76P).

Pour garantir une compréhension détaillée et une analyse des méthodes d'exécution utilisées au cours de la récente campagne de reconnaissances géotechnique, nous avons réalisé la carte *Localisation investigations géotechniques – coupes* (document n° 77P), contenant une série de coupes représentant la structure du tunnel existant, avec les profils stratigraphiques obtenus par les sondages à carottage continu. On y trouve également les sondages géognostiques effectués pendant les campagnes de reconnaissances précédentes pour les études menées par SITAF à l'intérieur du tunnel dans la période 1994-1999.

La représentation de la disposition spatiale des reconnaissances par rapport à la section de la voûte permet de mettre en évidence les principaux caractères lithologico-structuraux de la

portion de massif rocheux concernée par le tunnel routier actuel et par la nouvelle galerie de sécurité

Les fiches des stratigraphies, les photos des caisses d'échantillonnage des carottes provenant des sondages, les fiches d'installation des instrumentations à l'intérieur des forages de sondage et la documentation concernant les essais au vérin plat sont recueillis dans le document *Investigations géotechniques in situ* (document n° 23R).

6.1 Sondages géognostiques

A l'intérieur du tunnel, les zones où ont été réalisés les sondages à carottage continu sont les suivantes:

- demi-tour au niveau du PK 10+675;

- secteur localisé aux abords du PK 7+640.

6.1.1 Boyau de demi-tour (PK 10+675)

Dans le boyau servant à faire demi-tour (PK 10+675), des sondages dénommés BH6 et BH9 (Fig. 6.1) ont été effectués.

Le sondage BH6 (longueur : 23.5 m), situé sur la paroi de fond du boyau, à une hauteur de 3.5 m du plan routier, a été effectué avec une inclinaison de 20° env. vers le haut par rapport à l'horizontale, en direction sub-parallèle à l'orientation moyenne de la schistosité régionale.

Le sondage BH9 (longueur 30.0 m), a été réalisé aux abords de la paroi latérale du boyau avec une inclinaison de 75° env. vers le bas par rapport à l'horizontale, en direction perpendiculaire à l'orientation moyenne de la schistosité régionale. En raison des valeurs de l'angle d'avancement et des difficultés de manœuvre de la foreuse, il a fallu commencer le forage à partir du plan routier du boyau.

Dans les deux forages de sondage, le contrôle optique s'est fait par des caméras avec enregistrement des images sur bande magnétique (remis avec le document n° 23R – *Investigations géotechniques in situ*). Pendant les reprises, nous avons pu observer en détail les principales discontinuités caractérisant le massif rocheux aux abords de la plate-forme de demi-tour.

Les reprises dans le sondage BH9 ont été compliquées par la présence de l'eau de forage dans l'orifice, empêchant de relever l'orientation moyenne des principales discontinuités (l'orifice a été complété peu avant le début de l'inspection). Comme les reprises le montrent, la présence de matériau fin en suspension et d'un niveau d'huile lubrifiante, provenant de la foreuse et qui s'est déposée sur la surface de l'eau, n'ont pas permis de déterminer l'orientation des principales discontinuités présentes. Malgré cette très mauvaise visibilité, on a pu observer, à 23 m de profondeur, une fracture ouverte disposée perpendiculairement aux plans de

schistosité principaux, orientée à peu près en direction E-W et immergeant à angle élevé vers le Sud (l'orientation et l'immersion sont indicatives).



Fig. 6.1. Schéma de réalisation des sondages dans le boyau de demi-tour (PK 10+685). Sondage BH6 (paroi de fond du boyau; inclinaison 20° vers le haut); sondage BH9 (paroi latérale; 75° vers le bas).

Dans le sondage BH6, la caméra a permis de relever la présence de plusieurs plans de discontinuité et d'en définir les caractéristiques principales. Les résultats de l'analyse sont fournis schématiquement, dans le tableau *Inspection par caméra dans le sondage BH6* (document n° 86P), où sont représentées la coupe du sondage et son inclinaison par rapport à l'horizontale (env. 20°). Sur le sondage, sont projetés les principaux plans de discontinuité observés à l'intérieur du sondage, avec indication de l'orientation moyenne par rapport au Nord. La valeur, indiquée en correspondance des photos des structures rencontrées, doit être considérée comme indicative de l'orientation des plans, mais constitue en tout cas un outil valable d'évaluation de la prédominance d'un système de discontinuité par rapport aux autres et

permet d'observer l'état réel de fracturation du massif rocheux, parfois difficile à estimer sur la base des conditions des carottes extraites, à cause des perturbations infligées au matériau par la foreuse.

Dans le sondage BH6, on recense des séries de discontinuités reconductibles à trois systèmes principaux. Le premier est caractérisé par des plans généralement fermés ou, localement, scellés par de la calcite, subparallèles à la schistosité principale (immergents donc à angle bas vers l'W) avec espacement de décimètres en mètres. Le deuxième système comprend quelques discontinuités, bien visibles sur les premiers mètres du sondage, caractérisées par des surfaces subverticales, orientées en direction NW-SE, à ouverture millimétrique et espacement de décimètres en centimètres. Le troisième système est représenté par une discontinuité subverticale avec direction ENE-WSW, faiblement ouverte (En correspondance des discontinuités appartenant aux différentes familles, aucune présence d'eau n'a été relevée). La masse rocheuse présente des valeurs de RQD très variables selon la direction suivant laquelle on la mesure (tableau 6.1). Dans le sondage BH6 orienté parallèlement à l'orientation des plans de schistosité la roche présente des caractéristiques de bonnes à excellentes, avec des valeurs de RQD d'élevées à très élevées, tandis que dans le sondage BH9 orienté perpendiculairement aux plans de foliation, la masse peut être de discrète à médiocre avec des portions métriques (niveau compris entre 21÷26 m) très médiocres (RQD= 0%).

Sondage BH6		Sondage BH9				
RQD		RQD				
Profondeur (m)	Valeur (%)	Profondeur (m)	Valeur (%)			
0-1	0	0,3 - 1,45	19			
1 - 2	45	1,45 - 3	59			
2 - 3	72	3 - 4	29			
3 - 4	35	4 - 5,7	53			
4 - 5	29	5,7 - 7	42			
5 - 6,6	97	7 - 8,6	73			
6,6 - 8	93	8,6 - 10	48			
8 - 9	75	10 - 11	45			
9 - 10,8	80	11 - 12,6	64			
10,8 - 12,6	91	12,6 -14,3	55			
12,6 - 14	44	14,3 -15,4	47			
14 - 15,5	88	15,4 - 16,8	55			
15,5 - 17	77	16,8 - 18,4	23			
17 - 18,5	85	18,4 - 20	54			
18,5 - 20	87	20 - 21,6	56			
20 -23,5	89	21,6 -23	0			
	1	23 - 24,6	14			
		24,6 - 26	0			
		26 - 27	65			
		27 - 28,6	68			
		28,6 - 30 21				

Tableau 6.1. Valeurs de RQD dans les sondages BH6 et BH9 (PK 10+675).

6.1.2 Secteur localisé aux abords du point kilométrique 7+640

Au PK 7+640, deux sondages à carottage continu de 30 m de longueur ont été effectués en correspondance de la base des piédroits (BH7 et BH8), et un sondage à carottage continu (BH10; longueur 19.0 m) sur la voie de circulation dans le sens Italie - France.

Les forages ont suivi des sens d'avancement différenciés par rapport à l'orientation moyenne des éléments structuraux caractérisant le massif rocheux. En particulier, le sondage BH7, situé à la base du piédroit de la bande de circulation France – Italie, a été effectué avec une orientation de 15° vers le bas par rapport à l'horizontale (Fig. 6.2), en suivant l'avancement moyen des principaux plans de schistosité.

Le sondage BH8 a été réalisé en position symétrique au BH7, par rapport à l'axe du tunnel, en correspondance de la base du piédroit du côté du couloir de circulation Italie – France. Ces deux sondages étaient équipés d'extensomètre à base longue, dont les caractéristiques techniques sont fournies dans le document *Investigations géotechniques in situ* (document n° 23R).

Le sondage BH10 (longueur 19.0 m), a été réalisé sur la voie de circulation en sens Italie – France avec une inclinaison d'environ 75° vers le bas par rapport à l'horizontale (sens perpendiculaire aux principaux plans de schistosité). Il a fallu effectuer ce sondage à cause des difficultés techniques rencontrées pour réaliser le sondage BH8.



Fig. 6.2. Schéma de réalisation des sondages BH7 et BH8 en correspondance du point kilométrique 7+640. Dans la coupe, orientée dans le sens Italie – France, est indiquée l'orientation de 15° vers le bas (par rapport à l'horizontale) des forages.



Fig. 6.3. Schéma de réalisation du sondage BH10 en correspondance du PK 7+645. La coupe, orientée dans le sens Italie – France, indique l'orientation de 75° vers le bas (par rapport à l'horizontale) du forage.

Dans ce cas également, l'analyse des carottes montre, comme on l'a vu dans les sondages BH6 et BH9, la relation existant entre l'état de fracturation de la roche et la direction le long de laquelle est réalisé le carottage (Tableau 6.2). Dans le sondage BH7, orienté parallèlement aux plans de schistosité principale, les valeurs de RQD sont très variables, avec des portions d'épaisseur métrique, caractérisées par des valeurs faibles (RQD=20÷30%). Dans l'ensemble, la roche peut être classée comme médiocre-discrète avec des niveaux métriques dont l'indice de qualité dépasse 80% (roche de bonnes caractéristiques). En analysant les morceaux de carotte provenant du sondage BH10 (réalisé perpendiculairement aux plans de schistosité) on obtient des valeurs de RQD inférieurs par rapport aux mesures obtenues dans le sondage BH7. Dans ce cas, la roche se présente très fracturée avec des valeurs moyennes de RQD comprises entre 0÷30%. La masse rocheuse est classable comme très médiocre à médiocre, avec des couches d'épaisseur métrique moins fracturés (RQD=45÷68%). Enfin, l'analyse du sondage BH8, réalisé transversalement aux plans de schistosité, montre des valeurs de RQD intermédiaires entre ceux relevés dans les deux sondages précédemment décrits (BH7 et BH10).

A l'intérieur des deux sondages BH7 et BH8 ont été installés deux extensomètres à base triple. Les trois batteries de cannes, terminées par une base d'ancrage constituée d'une barre d'acier (dénommées A, B et C), ont été ancrées a des profondeurs différentes à l'intérieur du sondage. La base A se trouve à -27 m tandis que les bases B et C ont été cémentées respectivement à – 21 m et –7 m (les profondeurs sont mesurées à partir de la bouche du sondage).

Sondage BH7		Sondage BH8		Sondage BH10			
RQD		RQD		RQD			
Profondeur (m)	Valeur (%)	Profondeur (m)	Valeur(%)	Profondeur (m)	Valeur)		
0 - 1,7	0	1,5 - 4	20	0,5 - 1,3	0		
1,7 - 3,5	20	4 - 5	70	1,3 - 2,8	18		
3,5 - 4,5	70	5 - 6	23	2,8 - 4	19		
4,5 - 6	27	6 - 8	0	4 - 5	23		
6 - 7	25	8 - 9	52	5 - 6,3	8		
7 - 8,5	97	9 - 10	0	6,3 - 7,7	40		
8,5 - 10	83	10 - 10,7	59	7,7 - 9,2	7		
10 - 11,6	51	10,7 - 11,35	100	9,2 - 11,3	0		
11,6 - 12,6	37	11,35 - 12,35	62	11,3 - 12,6	30		
12,6 - 14	65	12,35 - 13,25	28	12,6 - 14,1	29		
14 - 15	57	13,25 - 14,34	23	14,1 - 15,2	33		
15 - 15,7	36	14,35 - 15	15	15,2 - 15,6	45		
15,7 - 17,2	35	15 - 16	71	15,6 - 16,9	62		
17,2 - 18	31	16 - 16,8	0	16,9 - 18,1	68		
18 - 19	33	16,8 - 17,8	50	18,8 - 19	0		
19 - 20	65	17,8 - 18,8	35				
20 - 20,7	26	18,8 - 19,5	86				
20,7 - 22	32	19,5 - 20,4	0				
22 - 23	22	20,5 -21	17				
23 - 24,5	45	21 -22,8	10				
24,5 - 26	15	22,8 - 24	28				
26 - 27	41	24 - 25,5	0				
27 - 28	83	25,5 - 26,8	14				
28 - 29	20	26,8 -28	0				
29 - 30	54		1	1			

Tableau 6.2. Valeurs de RQD dans les sondages BH7, BH8 et BH10 (PK 7+640).

6.2 Sections de mesure de contraintes

A l'intérieur du tunnel, ont été effectuées les mesures de contrainte du massif rocheux en correspondance de 6 sections, au moyen d'un vérin plat. Les sections sont localisées aux points km 3+000, 4+970, 5+235, 7+860, 8+000 et 9+000 (voir *Localisation investigations géotechniques – planimétrie*).

Pour chaque section, 6 essais au vérin plat ont été réalisés, dont les résultats sont indiqués dans le document n° 23R - *Investigations géotechniques in situ*.

Pour un commentaire de ces résultats, voir le *Mémoire géotechnique et mécanique* (document n° 22R).

7 ANALYSE D'IMAGES SATELLITAIRES DE LA CRETE COMPRISE ENTRE LA VALLEE DE SUSE ET LA VALLEE DE L'ARC

De nombreuses applications effectuées en différents contextes géologiques ont montré de bons caractères de corrélation entre la distribution des éléments structuraux relevés sur le terrain et les systèmes de linéaments détectables sur images satellitaires, permettant d'utiliser ces derniers pour représenter l'assise du massif rocheux même sur petite échelle (WISE, 1976; BODIN & RAZACK, 1999).

Pour une première analyse à l'échelle régionale de l'état de fracturation de la roche, nous avons donc effectué une analyse d'images satellitaires pour intégrer les relevés géostructuraux classiques avec de nouveaux éléments de connaissance que l'on ne peut tirer qu'à l'échelle de la donnée relevée. La procédure de repérage des linéaments a été effectuée visuellement, selon les deux méthodes de reconnaissance formulées : morphologique et spectrale.

Le critère morphologique utilisé dans l'analyse interprétative classique est essentiellement basé sur la reconnaissance sur l'image satellitaire des expressions concernant les éléments morphologiques et hydrographiques spécifiques, qui peuvent fournir des indices tectonicostructuraux, comme par exemple: vallées rectilignes, socles et crêtes bien développés en ruptures de pente, morceaux de lit à avancement rectiligne, cours d'eau à méandres alignés, etc., ou alignements composés coïncidant avec plusieurs indices morphologiques et hydrographiques alignés.

Le critère basé directement sur l'analyse spectrale se base sur la détermination des différences de tonalités, contraste, *pattern* etc., entre des zones adjacentes de l'image. La distribution de ces "discordances" permet de repérer des directions bien déterminées comme, par exemple, des variations de tonalité induites par une couverture végétale différente, la composition lithologique, le degré d'humidité du terrain, la circulation hydrique, l'hétérogénéité dans les propriétés des roches etc., ou des limites correspondant à plusieurs éléments spectraux de nature différente. Toutes ces formes linéaires peuvent fournir des indications indirectes sur les éléments géologiques dont elles représentent l'expression morphologique (O'LEARY & POHN, 1976).

L'identification des linéaments comme éléments de discontinuité réels sur le territoire est, en tout cas, fonction de la capacité de l'opérateur de discriminer parmi l'ensemble des données relevées, et sur la base de sa propre sensibilité vis à vis de l'assise du milieu physique exploré,

les systèmes linéamentaires effectifs de nature géologique-structurale. Afin de limiter dans l'interprétation, le rôle d'éventuels facteurs subjectifs, la caractérisation de la donnée télédétectée a été vérifiée par l'analyse des correspondances géométriques et hiérarchiques

entre la distribution statistique des linéaments et celle des éléments structuraux à valence régionale

7.1 Techniques d'analyse

L'analyse a été faite au moyen d'une caméra Landsat 5 TM en période d'hiver, lorsque la couverture végétale est inférieure. Avant l'analyse au sens propre, les images ont subi plusieurs phases de pré-traitement et de traitement, suivant les méthodes estimées les plus valables et fiables internationalement pour le repérage d'éléments à signification structurale.

Les procédures de pré-traitement sont résumées ci-dessous, (pour les principes théoriques, voir RICHARDS (1986)):

calibrage atmosphérique, (ou suppression des "effets de brouillard"). On a supposé que les *pixels* à valeur minimale, comme de fortes zones d'ombre, ou des miroirs d'eau, ont une radiance zéro, en considération du fait que les valeurs des *pixels* sont majorées par l'effet de diffusion atmosphérique (SABINS, 1987).

Géocodification du type *Map to Image* avec30 GCP (*ground control point*). A chaque point, sont associées deux coordonnées tirées des planchettes IGM 1:25.000. La correction de ces données a mené à un RMS (*Root Mean Square error*) moyen de 1 *pixel*, égal donc aux 30 x 30 mètres comme valeur de résolution à terre du système de reprise des images utilisées. Il y a eu rééchantillonnage de l'image de type bilinéaire.

Pour l'interprétation de l'image Landsat, nous avons affiché chaque bande dans les tons de gris afin de détecter celles qui pouvaient fournir le plus d'informations. Parmi les sept différentes bandes, les suivantes ont été analysées:

La bande 7 (infrarouge $2.08 \div 2.35\mu$). Elle se caractérise par le meilleur contraste, une plus grande netteté et richesse de détails morphologiques, mis en évidence par des variations de tons et de textures. Cette bande a aussi été choisie pour son aptitude à détecter des différenciations lithologiques et morphologiques.

La bande 5 (infrarouge 1.55÷1.75µ). Positionnée dans l'intervalle de l'infrarouge proche de celui de la bande précédente, elle aussi est significative pour la clarté de l'image. Sa dépendance élevée du contenu d'humidité est utilisée pour la discrimination sol-corps hydrique et l'évaluation de l'humidité des terrains comme élément indirect pour la caractérisation des lithologies.

La bande 4 (infrarouge proche 0.76÷0.90µ), positionnée dans l'intervalle du pic d'émissivité infrarouge de la végétation, conserve la plupart des informations la concernant. Le choix d'utiliser cette bande vient du fait que dans toutes les bandes utilisées, la végétation constitue toujours un obstacle, et un signe clair et net que dans ce cas-ci, l'interprétation directe dérange moins. La végétation, influencée directement par la nature et par l'assise des terrains où elle se

développe, peut de plus fournir des indications indirectes sur les caractéristiques lithologiques et morphologiques du site.

Après un examen des bandes les plus aptes à l'identification de structures géologiques, nous avons procédé à la réalisation et à l'analyse de combinaisons (ou *composites*) des trois bandes indiquées. Pour obtenir une image plus riche d'"informations" de chaque bande monochromatique, on combine les groupes de trois bandes afin d'intégrer l'information provenant de trois régions différentes du spectre électromagnétiques.

La méthode suivie a consisté à utiliser la "synthèse additive" des couleurs (SABINS, 1987), à savoir, en représentant en même temps les trois différentes bandes spectrales (7, 5, 4), affichées comme intensités de rouge, vert et bleu. L'image obtenue (*composite 754 RGB*) est la plus significative pour la finalité de l'étude, destinée au repérage et à l'analyse de structures géologiques. D'ultérieurs traitements de l'image ont été effectués en phase d'interprétation, comme l'application de *stretch* du contraste de type linéaire, logarythmique et gaussien et l'application de filtres spatiaux bidimensionnels de type isotropique (*sharpen filters*) pour renforcer les variations de tonalité ou les brusques changements de contraste entre les différentes zones.

7.2 Critères d'identification et d'interprétation des linéaments

La méthode d'analyse adoptée -*Geometrical Lineament detection* (MORELLI, 2000), se base sur l'examen des paramètres géométriques des linéaments, comme l'orientation, la longueur, l'espacement et le type de terminaison. Son application permet de détecter et interpréter les éléments linéaires comme faisant partie de familles de linéaments homogènes et bien représentées. Cette procédure, basée sur des filtres géométriques, permet de regrouper en phase d'identification déjà, les linéaments par familles, sans qu'aucune implication géologico-structurale y soit associée. Dans le cadre de cette étude, son utilisation sert à:

- identifier les directions préférentielles des éléments géologico-structuraux;

- caractériser le cadre général de l'état de fracturation;

- intégrer la donnée de terrain avec des éléments linéaires, morphologiques et/ou spectraux, non détectables par le relèvement géologique.

7.3 Analyse statistique et interprétation des données

Les linéaments repérés ont d'abord été analysés statistiquement, puis, comparés avec le modèle géologique-structural fourni par la nouvelle feuille géologique n° 153 "Bardonecchia".

Les procédures d'analyse statistique sont utilisées systématiquement dans le domaine de la télédétection pour les applications géologico-structurales, et, en particulier, elles sont adoptées pour discriminer d'éventuels mouvements tectoniques préférentiels à échelle régionale (GUPTA, 1977). Pour chaque linéament repéré et numérisé, un *data base* a été créé comprenant les coordonnées spatiales, l'orientation et la longueur, représentant la base de calcul pour l'analyse statistique.

Sur la base de l'analyse effectuée, on peut mettre en évidence, dans un alentour significatif de la zone faisant l'objet des investigations, quatre systèmes de linéaments, indiqués sur la planche *Carte des linéaments détectés par l'analyse des images satellitaires– échelle 1:100.000* (document n° 74P):

- un premier système, à direction ESE-WNW, représenté en jaune;

- un second système, à direction ENE-WSW, représenté par des lignes de couleur violette;

- un troisième système à peu près sub-méridien, assez dispersé par rapport à la direction moyenne N-S, représenté en vert;

- un quatrième système, à direction E-W, représenté en rouge.

Le regroupement des linéaments tracés en quatre systèmes principaux se vérifie dans la distribution que l'on observe sur le diagramme de la fréquence azimutale et sur le diagramme des longueurs cumulatives des linéaments, illustrés à la Figure 7.1. Dans le diagramme de la fréquence azimutale, on observe un maximum principal correspondant au système de direction ENE-WSW, tandis que la fréquence des trois autres systèmes détectés est nettement inférieure. Une distribution analogue se note aussi dans le diagramme des longueurs cumulatives.



Figure 7.1 – *a* – *b*:diagrammes de la fréquence azimutale des longueurs cumulatives des linéaments. *c* – *d*- *e*: diagrammes de la fréquence azimutale des linéaments partagée en trois classes de longueur sur la base de leur distribution statistique; (% *f*: L<3400m, % *f*: \leq 3400m L \leq 5400m, % *f*: L>5400m).

Si on analyse la fréquence azimutale des linéaments subdivisés par classes de longueur, il en ressort une distribution des maximums de fréquence variable selon l'échelle considérée. Les aspects les plus significatifs qui résultent de l'analyse des trois diagrammes *d*, *e*, et *f* de la planche *Carte des linéaments détectés par l'analyse des images satellitaires – échelle 1:100.000* (document n° 74P) – fournissant les fréquences azimutales des linéaments respectivement de longueur inférieure à 3400 m, comprise entre 3400 et 5350 m, et supérieure à 5350 m – sont les suivantes:

- le système de direction N-S se compose surtout de linéaments caractérisés par une longueur faible ou moyenne. Ce système représente en effet l'un des deux maximums principaux indiqués sur le diagramme de la fréquence azimutale des linéaments de longueur inférieure à 3400 m (diagramme *c*), et un maximum secondaire évident dans le diagramme de la fréquence azimutale des linéaments de longueur comprise entre 3400 m et 5400 m (diagramme *d*). Inversement, ce système n'est pas significativement représenté sur le diagramme de la fréquence de la fréquence azimutale des linéaments de longueur supérieure à 5400 m;

- le système de direction ENE-WSW se compose en moyenne de linéaments de longueur plus élevée par rapport au système précédemment décrit. A ce système correspond toujours un évident maximum dans les trois diagrammes de la fréquence azimutale relatifs aux trois classes de longueur considérée. En particulier, si l'on considère la classe de longueur inférieure à 3400 m, le système ENE-WSW représente un maximum secondaire, tandis que pour la classe de longueur intermédiaire il constitue, en même temps que le système de direction ESE-WNW, l'un des deux maximums principaux. Enfin, à ce système appartiennent la plupart des linéaments de longueur supérieure à 5400 m.;

le système de direction ESE-WNW est également représenté à l'intérieur des classes de longueur inférieure (valeurs inférieures à 3400 m) et intermédiaire (valeurs comprises entre 3400 m et 5400 m). A ce système correspond, dans les diagrammes *c* et *d* un évident maximum principal. Inversement, ce système n'est pas significativement représenté sur le diagramme de la fréquence azimutale des linéaments de longueur supérieure à 5400 m;

- le système de direction E-W est également représenté dans les trois classes de longueur considérées, sans jamais représenter le système dominant (comme on le voit dans les diagrammes *c*, *d* et *e*.

La distribution spatiale des quatre systèmes de linéaments le long de l'axe du tracé de la Galerie de sécurité en projet, n'est cependant pas homogène. Le système de direction E-W est en effet représenté en correspondance de l'axe de la Vallée d'Arc, sur le versant français de l'ouvrage en projet. Les trois autres systèmes, bien que représentés le long de toute la longueur du tracé, ne présentent pas une distribution homogène. Sur le versant italien, on observe en effet une prédominance de linéaments de direction ESE-WNW, alors que du côté français, il y a plus de linéaments de direction ENE-WSW. Enfin, on recense deux bandes d'ampleur kilométrique, correspondant à peu près, respectivement, à la crête de frontière et au versant

senèstre de la Vallée d'Arc, où sont particulièrement répandus les linéaments appartenant au système de direction N-S

En ce qui concerne le versant italien, les motifs géométriques, hiérarchiques et de statistique et de distribution du linéament s'appliquent bien au cadre géométrique relatif aux principales structures fragiles (de direction prédominante ESE-NNW, ENE-WSW et N-S) illustrées dans la feuille 132-152-153 – "Bardonecchia" de la nouvelle "Carte Géologique d'Italie" au 1:50.000. Au niveau du tronçon français, la comparaison entre la donnée linéamentaire et le cadre

géométrique des principales structures fragiles (de direction N-S, E-W et ENE-WSW), illustrées dans la feuille 775 – Modane de la "Carte Géologique de France" au 1:50.000, montre à nouveau une bonne correspondance.

Sur la base de la correspondance entre les motifs géométriques, hiérarchiques et de statistique et de distribution du linéament et le cadre géométrique relatif aux principales structures fragiles mises en relief par la cartographie géologique, la distribution des linéaments fournis par l'image satellitaire peut être considérée comme représentative de l'état de fracturation du massif rocheux à l'échelle régionale.

8. LEVES GEOLOGIQUES-STRUCTURAUX DE SUPERFICIE

8.1 Aspects méthodologiques

Une caractérisation géologique bien représentative des systèmes de linéaments détectés exige la comparaison avec des levés géologiques-structuraux servant à vérifier les correspondances géométriques et statistiques des systèmes linéamentaires et celles des structures géologiques relevées aux différentes échelles.

Les données acquises avec les tunnels ferroviaires et routiers existants permettent de localiser les discontinuités principales et les zones de majeur contrainte de la roche. Toutefois, pour la caractérisation d'ensemble du comportement de la masse, aussi en relation avec les nouvelles méthodes d'excavation supposables, il est souhaitable d'avoir une classification précise du massif rocheux tout le long de l'axe du tunnel.

Les méthodes traditionnelles de relèvement structural applicables dans ce but présupposent une continuité d'affleurement impossible à rencontrer sur le terrain; une étude détaillée sur des érosions aréolaires aussi grandes (30-40 km²) que celle qui nous est nécessaire pour avoir une vision objet, présente des difficultés objectives tant pour la discontinuité d'affleurement que pour les difficultés logistiques. Il est donc utile de recourir à des méthodes semi-quantitatives qui permettent de définir les associations structurales caractéristiques.

Comme on l'a vu auparavant, les caractéristiques de disposition d'ensemble des calcschistes sont assez homogènes à l'échelle régionale. Une variable importante est par contre constituée par les discontinuités fragiles (failles, zones de cisaillement et joints), qui représentent des facteurs importants pour la détermination des caractéristiques géomécaniques. Une campagne de relevés géostructuraux détaillés a donc été menée en correspondance du tracé du projet comprenant 6 stations de mesure, (3 sur le versant italien et 3 sur le versant français) afin de caractériser, par domaines structuraux homogènes, les familles de discontinuité ayant une influence sur la classification du massif rocheux.

Pour l'objectif envisagé, il faut effectuer des mises au point. Les "Recommandations ISRM (1978)" sur les méthodes de description quantitative des discontinuités des massifs rocheux indiquent comme modalité "objective" de l'échantillonnage, le relèvement le long d'un étirement linéaire de longueur adéquate, en tout cas de l'ordre des dizaines de mètres au moins, des caractéristiques saillantes de toutes les discontinuités se recoupant. Cette façon de procéder, basée sur la description systématique de chaque discontinuité et des données s'y rapportant, comporte le désavantage opérationnel de nécessiter des délais importants, de plus elle se base sur la supposition que le site d'application des observations soit de fait une bande limitée à l'alentour de l'étirement linéaire. Il est évident que, pour obtenir une représentation adéquate du massif rocheux il est indispensable de disposer d'un nombre élevé d'étirements différemment orientés.

La méthode adoptée se base, ici, sur l'analyse préalable du cadre structural global, finalisée à la localisation des grandes unités géométriques, pour procéder enfin à la caractérisation de l'état de fracturation des principaux systèmes de discontinuité et à la reconnaissance ainsi qu'à la description des éventuelles singularités structurales. C'est ainsi que l'?expert du domaine?, par l'observation directe, obtient à priori une subdivision du massif rocheux en familles de systèmes de fracture. Les données sur la disposition restent en relation avec chaque discontinuité, tandis que les caractéristiques géométriques et mécaniques sont associées cumulativement au système de fracturation. On peut donc recueillir toutes les informations que l'on retient nécessaires pour définir au mieux chaque système, en dépassant les limites spatiales liées à l'emploi d'un mètre à ruban qui se rapporte à une zone d'investigation plus vaste. Dans ce cas, c'est le géologue responsable du levé qui établit, sur la base de la connaissance du site et de la finalité du projet, les dimensions et la représentativité du secteur d'investigation auquel associer les données de relèvement. Cette approche est valable pour l'échelle moyen-grande (par ex. pour classifier le massif rocheux à l'échelle de tout un versant morphologique) et se prête bien, dans le cas spécifique de la prévision des caractéristiques structurales pour la nouvelle galerie, à la compréhension des processus génétiques ayant engendré les principales familles de discontinuité.

La connaissance des processus génétiques en général (ou des principaux paramètres les gouvernant) permet de regrouper les discontinuités en ensembles simples, appelés associations structurales, c'est à dire des ensembles de structures déformatrices, comprenant différents éléments et aussi de dimension (échelle) différente, qu'ils soient reconductibles à un seul événement déformateur, ou qu'ils soient génétiquement congruents (corrélables). Plus généralement, les associations structurales sont définies comme des combinaisons de structures et de lithotypes se répétant dans différents contextes géographiques et dans des roches d'âge différent (HOBBS ET AL., 1976).

En plus de l'analyse des fractures entendues comme systèmes géométriques de discontinuité, nous avons décidé d'effectuer une analyse calibrée sur les associations structurales caractérisant le volume rocheux considéré.

L'association structurale (ou les associations structurales) caractérisantes définies par cette analyse peuvent donc être:

- répétées mathématiquement (modèles fractaux, processus itératif; HOBBS, 1993; modèles avec "règles"; STONE, 1984) jusqu'à génération d'un pattern de fractures occupant tout le volume rocheux considéré (de cette manière, on peut aussi générer les discontinuités difficiles à localiser, en raison par ex. de leurs dimensions ou de leur espacement, par une récolte le long de l'étirement ou d'un boyau pilote)

- utilisées pour interpréter les secteurs où l'analyse directe du volume rocheux (interprétations et corrélations de données sismiques locales et de données géoélectriques, corrélations de sondage) n'est pas possible

- utilisées comme clé interprétative pour la mécanique du problème, dans le cas où on estime que le problème mécanique est prépondérant par rapport au problème géométrique, c'est à dire que les relations génétiques entre les structures sont plus importantes que les structures géométriques.

Comme on l 'a déjà dit plus haut, une méthode utile pour étendre les observations de détail à l'échelle de tout le projet est de comparer les fractures relevées directement sur le terrain dans les stations de mesure avec les linéaments détectés par images satellitaires, en exploitant la propriété de *scale invariance* des phénomènes (ou des éléments) géologiques (MANDELBROT, 1967; TURCOTTE, 1992). Les linéaments ainsi localisés ne sont considérés comme représentatifs des structures géologiques réelles qu'après avoir établi, pour chaque cas examiné, les règles et le degré de correspondance linéament/structure géologique. Dans ce cas, il existera alors la possibilité d'élaborer des modèles de l'état de fracturation sur des vastes zones et dans des délais assez rapides. On peut également faire la comparaison entre failles et fractures cartographables (par ex. à une échelle comprise entre 1:5000 et 1:50000) et des systèmes de fracture à l'échelle mésoscopique.

8.2 *Procédure opérationnelle*

La caractérisation mécanique des massifs rocheux s'effectue normalement suivant les normes ISRM (1978), lesquelles proposent la linéation d'étirement, matérialisé par un mètre ruban de longueur opportune, le long duquel sont mesurées et caractérisées toutes les discontinuités structurales croisées.

Selon les normes ISRM, les résultats d'un étirement sont représentatifs de tout le massif. Cette approche présente toutefois l'inconvénient de généraliser une donnée ponctuelle à une zone beaucoup plus vaste et qui n'a pas nécessairement les mêmes caractéristiques mécaniques de la portion étudiée. Comme on le dit dans le paragraphe précédent, au cours de cette étude, la caractérisation géomécanique a été effectuée au moyen d'une approche alternative nécessitant un processus préliminaire de type interprétatif, pendant lequel se fait la reconnaissance des surfaces mesurées et, lorsque c'est possible, leur regroupement en un nombre limité de familles. Le critère de regroupement des discontinuités en familles est essentiellement de type géométrique. Etant donné ce type particulier d'approche utilisée, le développement des données acquises en campagne sera de type statistique: les caractéristiques géométriques et mécaniques relevées ne se référeront en effet pas à la discontinuité individuelle mais à toute une famille de discontinuités. Le nombre de données recensées sur les planches relatives à chaque station structurale ne sera donc pas égal au nombre de mesures effectuées, mais représente le nombre minimum de valeurs retenues nécessaires pour définir la distribution de chaque paramètre concourant à caractériser chaque système de discontinuité. Par exemple, si

l'espacement d'un système de discontinuités est constant, il suffira d'une valeur pour le définir complètement.

Pendant la campagne de relèvements géologico-structuraux, nous avons recueilli des données servant à caractériser soit le massif rocheux dans sa totalité, soit chaque système de discontinuité reconnu.

Les paramètres nécessaires pour la caractérisation du massif rocheux dans sa totalité peuvent être ainsi résumés:

- formation, complexe et unité d'appartenance du lithotype constituant le massif rocheux;

- immersion et inclinaison de la paroi;

- nombre de systèmes de discontinuités reconnus, en indiquant l'éventuelle présence de discontinuités non géométriquement corrélables à celles-ci (ex: "n° systèmes de discontinuités: 5 + random"); le système individuel de discontinuité est indiqué par la lettre K suivie d'un chiffre progressif (ex., système K1, K2, K_{random}); les familles de plans, caractérisées par des orientations comparables mais ayant une signification géologique différente ou bien représentant des rapports d'intersection définis et constants, sont regroupées dans des systèmes de discontinuités séparés;

- nombre volumétrique des discontinuités (J_v), considéré comme étant la somme du nombre de discontinuités au mètre que l'on compte le long de trois directions perpendiculaires entre elles, mesuré au moyen d'une tige télescopique graduée;

- valeurs de R, mesurés au scléromètre Original Schmidt mod. L9 en donnant cinq coups au même endroit afin d'éliminer la patine d'altération présente sur la roche, et en effectuant la lecture au sixième coup;

- évaluation de l'ampleur des rugosités à l'échelle métrique, effectuée avec une tige télescopique graduée pour mesurer la longueur du profil de référence, et une équerre pour évaluer l'ampleur des rugosités.

Les paramètres nécessaires pour caractériser complètement chaque système de discontinuités peuvent être ainsi résumés:

- type de discontinuité, indiquant exclusivement celles pouvant isoler un bloc potentiel; on les distingue en joints, failles et *shear-zones*;

- immersion et inclinaison des discontinuités;

- espacement des discontinuités, c'est à dire la distance entre des discontinuités adjacentes mesurée en direction orthogonale aux discontinuités, exprimée en cm ; ce paramètre contrôle les dimensions de chaque bloc de roche intacte: si l'espacement est très petit, on aura des conditions de basse cohésion du massif rocheux;

 ouverture, c'est à dire la distance entre les bords visibles d'une discontinuité, exprimée en mm; dans le cas d'une bande cataclastique, on indique comme ouverture la largeur de la bande elle.même ; - *persistance*, ou la longueur de la trace de la discontinuité observée dans un affleurement, mesurée le long de la direction, de l'immersion ou le long d'une trace générique de la discontinuité, exprimée en m ;

- type de remplissage;

- *JRC*, mesuré au profilographe (peigne de Barton), de 10 cm de longueur et avec des dents de maximum 1 mm de diamètre, le long de l'immersion du plan de discontinuité ; le profil obtenu grâce au peigne de Barton est ensuite comparé avec celui des classes de rugosité proposées par BARTON (1973) et BARTON & CHOUBEY (1977);

- valeurs de R mesurées au scléromètre Original Schmidt mod. L9, en faisant au moins deux essais pour chaque surface de discontinuité;

- *type de terminaison*, ou la façon dont se terminent les extrémités d'une discontinuité ; les sigles suivants ont été utilisés : "K_i" (terminaison contre le système "i"), "roche" (terminaison en roche), "couverture" (terminaison non visible);

- conditions hydriques.

Afin de vérifier l'exactitude de la subdivision des discontinuités en systèmes effectuée au cours de la campagne, les pôles des plans mesurés ont été projetés sur des diagrammes équiaréolaires de Schmidt par l'intermédiaire d'un logiciel spécial. Ce même logiciel a permis d'obtenir des diagrammes de densité relative, un pour chaque station structurale effectuée.

L'analyse de certains de ces diagrammes met en relief la présence de systèmes de discontinuités différents avec des maximums de densité relative proches entre eux. Si on utilise des critères purement statistiques, ces systèmes devraient être regroupés dans un seul système de discontinuité. Le regroupement de ces discontinuités en systèmes différents est au contraire basé non seulement sur des considérations de type géométrique mais aussi sur des considérations de nature géologique, il nous est donc semblé important de séparer des familles de discontinuité à orientation similaire mais à signification géologique différente. On peut citer comme exemple la station n° FRJ001: quoique les deux maximums de densité K1 et K4 de cette station ne soient pas clairement distinguables d'un point de vue statistique, les pôles K1 se rapportent aux joints parallèles à la foliation régionale, tandis que les pôles K4 se réfèrent à des joints et des failles coupant systématiquement la foliation. Le chevauchement partiel des deux systèmes est dû à la variation de leur disposition dans des portions différentes du massif rocheux considéré.

Une fois que l'analyse statistique des dispositions des systèmes de discontinuités reconnus était terminée, nous avons procédé au calcul des paramètres géotechniques à partir des informations recueillies pendant la campagne de terrain. Les opérations effectuées au cours de cette phase sont les suivantes :

- correction des valeurs de R mesurées au scléromètre: la valeur d'impulsion mesurée au scléromètre est minime lorsque, à parité de résistance de la superficie mesurée, le marteau est

utilisé verticalement vers le bas, elle est maximale lorsqu'on l'utilise verticalement vers le haut ; il est donc nécessaire de corriger les valeurs mesurées en fonction de l'orientation du scléromètre pendant la mesure, en conformité aux normes ISRM (1978)

- conversion des valeurs de R en valeurs de résistance uniaxiale: les valeurs de R corrigées au moyen du tableau de la fig. 5 sont indiquées sur un diagramme de corrélation entre la densité de la roche, la valeur d'impulsion et la résistance à compression (MILLER, 1965); on obtient ainsi la valeur de résistance uniaxiale de la roche

- calcul du RQD en partant de la valeur de J_v : l'indice RQD, proposé par DEERE (1964), représente le rattrapage pour cent d'un carottage en tenant compte de chaque pièce de carotte de longueur supérieure à 10 cm; la valeur de RQD s'obtient par la relation

 $RQD = 115 - 3.5J_v$

- calcul du JRC à l'échelle métrique: l'ampleur des aspérités, mesurée avec une équerre, et la longueur du profil de référence, sont indiquées sur un diagramme où elles sont mises en corrélation avec le JRC correspondant.

Sur la base des résultats de la caractérisation du massif rocheux, une première évaluation de l'indice de qualité du massif rocheux a été faite en utilisant la méthode proposée par BIENIAWSKI (1974, 1976, 1979, 1989).

L'indice de qualité **RMR** (Rock Mass Rating) de Bieniawski est évalué en tenant compte de cinq paramètres :

- résistance à la compression uniaxiale de la roche intacte C_o , obtenue par la formule $log_{10} C_o = 0.00088 \ g R + 1.01$

où γ est la densité de la roche (en kN/dm³) et R le coup du marteau de Schmidt corrigé

- indice RQD

- espacement des joints

- condition des joints (rugosité, altération des parois, ouverture, matériau de remplissage)

- conditions hydriques

A chaque paramètre est attribué un coefficient numérique, en accord ave le tableau ci-dessous (BIENIAWSKI, 1974). La somme algébrique des cinq coefficients obtenus du tableau représente l'indice total RMR du massif rocheux envisagé.

Paramètres de la classification de Bieniawski et leurs coefficients numériques (d'après BIENIAWSKI, 1976):

D^	DADAMETRES									
PARAMETRES										
	Résistance	Charge ponctuelle (kg/cm2)	> 80	40-80	20-40	10-20	Non applicabile			
1	roche	Compression uniaxiale	>2000	1000-2000	500-1000	250-500	100-	30-	10-30	
	intacte	(kg/cm2)					250	100		
	INDICE		15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD		90-100%	75-90 %	50-75 %	25-50 %	< 25 %			
	INDICE		20	17	13	8	3			
3	Espacement joints		> 3 m	1-3 m	0.3-1 m	50-300 mm	< 50 mm			
	INDICE		30	25	20	10	5			
4	Conditions joints		Surfaces très	Surfaces	Surfaces	Superfici	Remplissages d'argile molle			
			rugueuses,	rugueuses,	rugueuses,	lisses ou à	de puissance > 5 mm ou			
			non	ouverture<1	ouverture	remplissages	discontinuités reliées et à			
			continues,	mm, parois	<1mm,	argileux de	ouverture > 5 mm			
			parois	humides	parois	puissance				
			sèches		mouillées	<5mm ou				
						disc. reliées				
						et à				
						ouverture de				
						1-5 mm				
	INDICE		25	20	12	6	0			
		Venues d'eau sur 10 m de								
		galerie	rien	< 10	10-25	25-125	> 125			
	Conditions (I/min)									
	bydrau-	Press. eau dans les								
5	liques discontinuités / contrainte principale maximum Conditions générales de la		0	0.0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	> 0.5			
			Càcha	I la constata	Mauilláa	Suinte-	Vanue d'aqui			
		roche	Secne	Humide	woullee	ments	venue	i eau		
	INDICE		15	10	7	4	0			

8.3 Résultats

L'emplacement exact des stations de levé géostructural est indiqué à la planche *Carte des stations de levé géostructural- échelle 1:25.000* (document n° 75P). La planche contient les tableaux résumant les principaux systèmes de discontinuité relevés sur les affleurements rocheux et les diagrammes des stations suivantes :

8.3.1 STATION FRJ-001

Le volume rocheux étudié est constitué d'alternances de bancs massifs de marbre, d'épaisseur allant du dm au cm, et de couches phylladiques très profondément feuillées d'épaisseur comparable. Ce lithotype, définissable dans son ensemble comme calcschiste, est connu dans la littérature sous le nom de *Formation de la Replatte* et *Schistes à ?Palombini?* La foliation observable dans les étages phylladiques, caractéristiquement anostomosatée, est normalement non disjonctive et présente un espacement millimétrique. Les couches de marbre tendent au contraire à être boudinés et donnent lieu, en même temps qu'aux étages phylladiques, à des structures de type *"pinch and swell"*.

Le volume rocheux montre l'évidence d'une intense déformation en régime ductile, témoignée par la présence de charnières de plis serrés ou isoclinaux transportés qui déforment les bancs de marbre. La déformation en régime plasto-frictionnel, qui a de plus grandes retombées pour cette étude, semble au contraire être moins intense.

On recense 4 systèmes principaux de discontinuité (Tableaux 8.1 et 8.2; Figure 8.1; Photo 8.1, 8.2, 8.3 et 8.4):

- un premier système, dénommé k1, parallèle à la foliation régionale;
- deux systèmes conjugués, k2 et k3, à strike ESE-WNW;
- un quatrième système, k4, à strike NE-SW.

Les systèmes k1 et k4 sont ceux qui concourent le plus à déterminer l'assise géométrique du massif rocheux. Les structures les plus complexes observables en correspondance de la station peuvent elles être attribuées au système k2. Malheureusement, l'orientation de la paroi n'est pas idéale pour la caractérisation du système k4. En ce qui concerne la caractérisation cinématique, les rares indicateurs observables sur les plans de faille, constitués surtout par des foliations charriées et de fibres de calcite, mettent en évidence une distension générale du volume envisagé.

Il est important de souligner que le nombre de discontinuités par unité de volume est plutôt bas $(Jv = 6 \text{ m}^{-3})$, n'atteignant des valeurs de 8-10 m⁻³ que dans les portions les plus déformées, ce qui représente 10% environ du total du massif.

Sur la base de ces données, on peut supposer des valeurs de RQD assez élevées (RQD = 94%, qualité excellente), pouvant descendre légèrement en correspondance des portions les plus déformées (RQD = 80%, bonne qualité).

Les valeurs de résistance uniaxiale déduites des valeurs de ricochet du scléromètre varient d'un maximum de 52.7 ± 25 MPa à un minimum de 18.9 ± 10 MPa, avec des valeurs moyennes de 34.8 ± 20 MPa.

système k1

Le système de discontinuité k1 est représenté par des joints parallèles à la foliation régionale situés surtout à l'interface entre les niveaux pélitiques et les niveaux marbrés. Elles immergent à angle bas moyennement vers W et présentent un espacement généralement compris entre 20 et 50 cm, mais pouvant dépasser localement le mètre là où les bancs de marbre sont plus puissants. Ces joints, qui présentent des valeurs de rugosité moyennes (8-10) à l'échelle décimétrique, ne sont pas matérialisés par des surfaces discrètes, mais par des horizons centimétriques en correspondance desquels la foliation devient disjonctive à l'échelle sub-millimétrique. Leur persistance est en moyenne de 2-3 mètres, mais elle peut localement dépasser les 10 mètres, tandis que les valeurs de JRC à l'échelle métrique sont moyennement élevées. Ces joints tendent tant à se renfermer dans la roche qu'à s'achever en correspondance des trois autres systèmes de discontinuité à angle haut recensés. Les valeurs mesurées au scléromètre le long des plans sont proches ou au-dessous de la limite de l'échelle. Aucune présence d'eau ni de suintement n'ont été signalés dans le système examiné.

Système k2

Le système de discontinuité k2 est représenté surtout par des failles et, en moindre mesure, par des joints et par des *shear-zones*, à *strike* ESE-WNW et immergents à angle haut vers SSW. Les discontinuités attribuables à ce système présentent un espacement normalement supérieur à 20 m et persistance plurimétrique pouvant localement dépasser les 10 m. Les zones de faille sont géométriquement assez complexes, avec la présence de plans Riedel localement rapprochés et à basse persistance. La complexité de ces structures se dénote aussi par la variabilité des ouvertures observées, comprises entre quelques millimètres et plusieurs décimètres, et par la variété des remplissages observés. On reconnaît en effet autant des failles à *gouge* que des brèches de faille à calibrage centimétrique, et localement des horizons d'épaisseur décimétrique caractérisés par une foliation disjonctive à échelle sub-millimétrique bordés extérieurement de couches de *gouge*.

Les discontinuités du système k2 présentent des valeurs moyennes de rugosité à l'échelle décimétrique (10-14), mais sont caractérisées par des valeurs de JRC extrêmement variables, de très basses à très élevées, à l'échelle métrique. Leur terminaison est souvent masquée par la couverture quaternaire; là où elle est observable, ces plans semblent s'interrompre de préférence en correspondance de discontinuités attribuables au système k1 ou d'autres discontinuités du système k2.

Les valeurs mesurées au scléromètre le long de discontinuités du système k2 sont toujours sous la limite de l'échelle. Aucune présence d'eau ni de suintement n'ont été recensés en correspondance de ce système.

Système k3

Le système de discontinuités k3 est représenté surtout par des failles, et en mesure nettement inférieure, par des joints, à *strike* ESE-WNW et immergents à haut angle vers NNE. Elles représentent un espacement de plurimétrique à pluridécamétrique et une persistance de 4-6 m. Elles sont constituées de plans individuels, avec une ouverture de quelques millimètres, souvent caractérisés par un remplissage de gouge. Ces discontinuités présentent des valeurs de rugosité moyennes (8-10) à l'échelle décimétrique mais elles sont caractérisées par des valeurs de JRC extrêmement variables, de très basses à très élevées, à l'échelle métrique.

Leur persistance dépasse normalement les 4 m, mais elle est difficilement évaluable à cause des dimensions réduites de l'affleurement. En effet, la terminaison de ces discontinuités est souvent masquée par la couverture quaternaire; là où elle est observable, ces plans semblent s'interrompre en correspondance de discontinuités attribuables au système k1.

Les valeurs mesurées au scléromètre le long des plans sont toujours sous la limite de l'échelle. Aucune présence d'eau ni de suintement n'ont été recensés en correspondance de ce système.

Système k4

Le système de discontinuités k4, comme le système k1, est celui qui participe le plus à définir l'assise géométrique du massif rocheux étudié.

Il est représenté par des failles et des joints à *strike* NE-SW et immergents à angle moyen vers NW. Les discontinuités attribuables à ce système présentent un espacement compris en général entre 1 et 4 m, et des persistances de métriques à pluri-décamétriques. Malheureusement, l'orientation de la paroi rocheuse n'est pas idéale pour la caractérisation du système. On peut en tout cas définir les plans de faille du système k4 comme des plans individuels avec ouverture de millimétrique à centimétrique, avec un remplissage constitué de gouge et présentant des fibres de calcite indiquant des mouvements normaux. Au contraire, les joints ne présentent pas de remplissage.

Les discontinuités du système k4 présentent des valeurs de rugosité à l'échelle décimétrique de moyennes à élevées (10-18), mais elles sont caractérisées par des valeurs de JRC à l'échelle

métrique de moyennes à basses (6-8). Leur terminaison est souvent masquée par la couverture quaternaire; là où elle est observable, ces plans semblent s'interrompre de préférence en correspondance de discontinuités attribuables au système k1.

Les valeurs mesurées au scléromètre le long des discontinuités du système k4 sont toujours sous la limite de l'échelle. Aucune présence d'eau ni de suintement n'ont été recensés en correspondance de ce système.

8.3.2 STATION FRJ-002

Le volume rocheux étudié est constitué de calcschistes marbrés massifs caractérisés par une foliation principale tendanciellement planaire et normalement non disjonctive, qui présente un espacement millimétrique. On observe les évidences d'une intense déformation en régime ductile, témoignée par la présence de nombreuses charnières de plis transposés déformant un *fabric* planaire plus vieux défini par des couches de marbres blanchâtres d'épaisseur centimétrique. La foliation principale correspond à la foliation de plan axial de ces plis transposés et tend à envelopper les zones de charnière en prenant localement un aspect anostomosaté.

Le volume rocheux montre de plus l'évidence d'une formation ultérieure en régime plastofrictionnel.

On recense 4 systèmes principaux de discontinuités (Tableaux 8.3 et 8.4; Figure 8.2; Photos 8.5 et 8.6):

- un premier système, k1, parallèle à la foliation régionale;

- deux systèmes conjugués, k2 et k3, à strike E-W;

- un quatrième système, k4, à strike N-S.

Les systèmes k1 et k4 sont ceux qui concourent le plus à déterminer l'assise géométrique du massif rocheux. En correspondance du système k2, particulièrement persistant dans un alentour significatif de la station de mesure, se trouvent les principaux couloirs observables sur la paroi et de fortes ruptures de pente.

Les nombreux indicateurs cinématiques observables sur les plans de faille des deux systèmes conjugués k2 et k3, constitués surtout par des fibres de calcite, mettent en évidence une extension en direction N-S du volume rocheux considéré.

Il est important de souligner que le nombre de discontinuités par unité de volume est extrêmement bas ($Jv = 1-2 \text{ m}^{-3}$), n'atteignant des valeurs de 5-6 m⁻³ que dans les portions les plus déformées, ce qui représente 30% environ du massif rocheux considéré.

Sur la base de ces données, on peut supposer des valeurs de RQD élevés sur tout le massif rocheux (qualité excellente selon la classification en cours). Les valeurs de résistance uniaxiale déduites des valeurs de ricochet du scléromètre varient d'un maximum de 119.4 ± 50 MPa à un minimum de 40.4 ± 20 MPa, avec des valeurs moyennes de 70.2 ± 30 MPa, et sont donc sensiblement plus élevées que les valeurs estimées pour les Schistes à ?palombini? de la station FRJ001.

Système k1

Le système de discontinuités k1 est représenté par des joints à espacement généralement plurimétrique parallèles à la foliation régionale, immergents donc à angle bas vers les quadrants sud-occcidentaux. Ces joints, qui présentent des valeurs de rugosité à l'échelle décimétrique assez variables, ne sont pas matérialisés par des surfaces discrètes, mais par des horizons centimétriques en correspondance desquels la foliation devient disjonctive à l'échelle millimétrique. Leur persistance est en moyenne de 3-5 mètres, mais peut dépasser une dizaine de mètres. Les valeurs de JRC à l'échelle métrique sont elles de moyennes à basses. La persistance de ces joints est tendanciellement supérieure aux dimensions de l'affleurement. Là où leur terminaison est observable, ces joints tendent à fermer contre les plans k2 et, en moindre mesure, contre les plans k4 ou dans la roche. Les valeurs de ricochet mesurées au scléromètre le long des discontinuités sont normalement basses (<25) et sont souvent sous la limite de l'échelle. Aucune présence d'eau ni de suintement n'ont été recensés en correspondance de ce système.

Système k2

Le système de discontinuités k2, comme le système k1, est celui qui participe le plus à définir l'assise géométrique du massif rocheux étudié.

Il est représenté surtout par des failles, et en moindre mesure par des joints à *strike* E-W et immergents à angle haut vers S. Les discontinuités attribuables à ce système présentent un espacement normalement supérieur à 20 m et une persistance plurimétrique. Les zones de faille du système k2 sont géométriquement assez complexes, avec des plans à haut angle, souvent curvilignes, raccordés par les plans à angle plus bas (système k2*). Parmi les différents types de discontinuités reconductibles à ce système, les joints présentent en moyenne des valeurs d'espacement et de persistance plus basses par rapport aux failles. La complexité de ces structures se dénote aussi par la variabilité des ouvertures observées, comprises entre quelques millimètres et plusieurs décimètres, et par la variété des remplissages. On reconnaît en effet autant des remplissages de type *gouge* que des brèches de faille à calibrage centimétrique. Certains plans de faille, caractérisés au contraire par des remplissages de calcite d'épaisseur centimétrique, sont ?anostomosatés? et enveloppent des lithons décimétriques ou métriques peu déformés mais caractérisés par la présence de nombreuses veines d'extension.

Les discontinuités du système k2 présentent des valeurs moyennes de rugosité à l'échelle décimétrique (10-14), mais sont caractérisées par des valeurs de JRC à l'échelle métrique assez variables, mais jamais élevées. Leur terminaison est souvent masquée par la couverture quaternaire; là où elle est observable, ces plans semblent s'interrompre de préférence en correspondance de discontinuités attribuables au système k1.

Les valeurs mesurées au scléromètre le long de discontinuités du système k2 sont toujours proches ou sous la limite de l'échelle. Aucune présence d'eau ni de suintement n'ont été recensés en correspondance de ce système.

Système k3

Le système de discontinuités k3 est représenté par des failles espacées (>10m) à *strike* E-W immergents à angle haut vers N. II s'agit de plans individuels, avec une ouverture de quelques millimètres et souvent sans remplissage, avec une persistance de quelques mètres. Ces plans présentent des valeurs de rugosité à l'échelle décimétrique moyennes (8-10), mais sont caractérisés par des valeurs de JRC basses à l'échelle métrique. La nature de leur terminaison n'est pas évaluable dans l'affleurement désigné.

Les valeurs mesurées au scléromètre le long de discontinuités du système k2 sont toujours proches ou sous la limite de l'échelle. Aucune présence d'eau ni de suintement n'ont été recensés en correspondance de ce système

Système k4

Le système de discontinuité k4, peu représenté dans cette station structurale, est représenté par des failles très espacées (>10m) à *strike* N-S immergents à angle moyen vers W. Celles-ci constituent des plans discrets avec une ouverture de millimétrique à centimétrique et remplissage constitué de cataclasite ou brèche de faille à calibrage centimétrique, et des horizons caractérisés par une foliation disjonctive à l'échelle pluri-millimétrique. La persistance de ces plans est généralement pluri-métrique.

Les discontinuités du système k4 présentent des valeurs de rugosité à l'échelle décimétrique moyenne (8-10), mais sont caractérisées par des valeurs de JRC basses à l'échelle métrique (3-4). Leur terminaison est en général masquée par la couverture quaternaire; là où elle est observable, ces plans semblent s'interrompre de préférence en correspondance de discontinuités attribuables au système k2*, ou dans la roche. Les valeurs mesurées au scléromètre le long de discontinuités du système k4 sont toujours sous la limite de l'échelle. Aucune présence d'eau ni de suintement n'ont été recensés en correspondance de ce système

8.3.3 STATION FRJ-003

Le volume rocheux étudié est constitué de calcschistes de marbre dont le *fabric* est défini par une alternance de couches de marbre latéralement discontinus d'épaisseur centimétrique et de couches plus riches en phyllosilicate d'épaisseur comparable et visiblement foliés. La foliation typiquement anostomosatée enveloppe les charnières de plis déracinés définis par les couches les plus marbrées, qui témoignent de l'intense déformation de ces roches en milieu ductile. Normalement non disjonctive, la foliation assume toutefois ce caractère le long d'horizons d'épaisseur pluridécimétrique, où elle devient disjonctive à l'échelle millimétrique et sub-millimétrique.

On a recensé 4 systèmes principaux de discontinuités (Tableaux 8.5 et 8.6; Figure 8.3; Photos 8.7 et 8.8):

- un premier système, dénommé k1, parallèle à la foliation régionale;

- deux systèmes, k2 et k4, à strike ENE-WSW;

- un quatrième système, dénommé k3, à strike NW-SE.

Les systèmes k1 et k2 sont ceux qui concourent le plus à déterminer l'assise géométrique du massif rocheux. Le système k2 n'est cependant pas uniformément distribué dans l'érosion aréolaire de la station structurale, mais est bien représenté exclusivement en correspondance de l'incision du Ruisseau Pian dell'Acqua. Les parois délimitant le couloir sont par contre caractérisées par un faible nombre de discontinuités par unité de volume, discontinuités attribuables essentiellement au système k1.

Il faut souligner que le nombre de discontinuités par unité de volume est généralement bas (Jv = 1-4 m⁻³), n'atteignant des valeurs de 6-7 m⁻³ que dans les portions les plus déformées, correspondant à l'axe d'incision du ruisseau. Sur la base de ces données, on peut supposer des valeurs de RQD élevés sur tout le massif rocheux (qualité excellente selon la classification en cours). Les valeurs de résistance uniaxiale déduites des valeurs de ricochet du scléromètre varient d'un maximum de 70,4 ± 30 MPa à un minimum de 28,4 ± 15 MPa, avec des valeurs moyennes de 52,2 ± 25 MPa.

Système k1

Le système de discontinuités k1 est représenté par des joints à espacement de pluridécimétrique à plurimétrique parallèles à la foliation régionale, immergents donc à angle bas vers les quadrants sud-occcidentaux. Ces joints, qui présentent des valeurs de rugosité à l'échelle décimétrique de moyennes à basses, ne sont pas matérialisés par des surfaces discrètes, mais par des horizons décimétriques en correspondance desquels la foliation devient disjonctive à l'échelle sub-millimétrique ou millimétrique. Leur persistance est en moyenne de 5-10 mètres, mais elle peut dépasser une vingtaine de mètres Les valeurs de JRC à l'échelle

métrique sont presque toujours basses. La persistance de ces joints est tendanciellement supérieure aux dimensions de l'affleurement mais une de leurs terminaisons est localement observable dans la roche. Les valeurs mesurées au scléromètre le long de discontinuités sont normalement basses (<25) et sont souvent sous la limite de l'échelle. Aucune présence d'eau ni de suintement n'ont été recensés en correspondance de ce système.

Système k2

Le système de discontinuités k2, comme le système k1, est celui qui participe le plus à définir l'assise géométrique du massif rocheux étudié.

Il est représenté par des joints et des failles normaux, subverticaux à *strike* ENE-WSW et immergents vers des quadrants opposés. Les discontinuités attribuables à ce système présentent un espacement métrique, mais ne sont pas uniformément distribuées dans l'érosion aréolaire de la station structurale. Leur persistance peut dépasser une dizaine de mètres.

L'ouverture de ce système de discontinuités est assez variable. On observe en outre des plans sans remplissage ainsi que des plans caractérisés par la présence de brèches à calibrage décimétrique.

Les plans k2 présentent des valeurs de rugosité basses à l'échelle décimétrique (06-08), mais ils sont caractérisés par des valeurs de JRC à l'échelle métrique assez variables, quoique jamais élevées. Leur terminaison est souvent masquée par la couverture quaternaire; là où ils sont observables, ces plans semblent s'interrompre de préférence en correspondance de discontinuités attribuables au système k1, ou contre d'autres plans du système k2.

Les valeurs mesurées au scléromètre le long des discontinuités du système k2 sont toujours proches de la limite d'échelle. Aucune présence d'eau ni de suintement n'ont été recensés en correspondance de ce système.

Système k3

Le système de discontinuités k3 est représenté par des joints différemment espacés, et secondairement par des failles à *strike* NW-SE immergents à haut angle généralement vers NE. Il s'agit de plans individuels, souvent fermés et sans remplissage, avec une persistance variable de quelques mètres à plus de dix mètres. Ces plans présentent des valeurs de rugosité à l'échelle décimétrique moyenne (8-10), mais sont caractérisés par des valeurs de JRC basses à l'échelle métrique. La nature de leur terminaison n'est pas clairement évaluable dans l'affleurement choisi.

Les valeurs mesurées au scléromètre le long des discontinuités du système k3 sont proches de la limite d'échelle. Aucune présence d'eau ni de suintement n'ont été recensés en correspondance de ce système.

Système k4

Le système de discontinuité k4 est représenté essentiellement par des failles à espacement métrique ou plurimétrique à *strike* ENE-WSW immergents à angle moyen vers les quadrants septentrionaux. Elles constituent des horizons décimétriques caractérisés par une foliation disjonctive à l'échelle millimétrique. La persistance de ces plans est généralement plurimétrique, dépassant souvent une dizaine de mètres.

Les discontinuités du système k4 présentent des valeurs de rugosité à l'échelle décimétrique moyennes (8-10), mais sont caractérisées par des valeurs de JRC basses à l'échelle métrique (3-4). Leur terminaison est souvent masquée par la couverture quaternaire; là où elle est observable, ces plans semblent s'interrompre de préférence en correspondance de discontinuités attribuables aux systèmes k1 et k2. Les valeurs mesurées au scléromètre le long de discontinuités du système k4 sont toujours proches ou sous la limite de l'échelle. Aucune présence d'eau ni de suintement n'ont été recensés en correspondance de ce système.

8.3.4 STATION FRJ-004

Le volume rocheux étudié est constitué de calcschistes de marbre massifs devenant localement du marbre. Ce lithotype est caractérisé par une foliation planaire non disjonctive et peu profonde, définie par des couches d'épaisseur sub-millimétrique latéralement discontinus dans lesquels se concentre la fraction phyllosilicatique.

Contrairement aux trois stations précédentes, on n'observe guère de claires évidences de l'histoire des déformations du massif rocheux en milieu ductile. L'assise géométrique du massif rocheux a par contre été déterminée par la déformation en régime plasto-frictionnel.

On recense 4 systèmes de discontinuités principaux (Tableaux 8.7 et 8.8; Figure 8.4; Photos 8.9 et 8.10):

- un premier système, k1, parallèle à la foliation régionale;

- deux systèmes conjugués, k2 et k3, à strike E-W;
- un quatrième système, k4, à strike N-S.

Le système k4 est celui qui concourt le plus à déterminer l'assise géométrique du massif rocheux. Le système k2 a également une grande importance, étant plus espacé par rapport au précédent, le long duquel se place dans ce secteur l'incision du R. de St. Antoine. Les discontinuités parallèles à la foliation régionale ont une importance mineure et tendent à se terminer contre les deux systèmes de discontinuités décrits plus haut.

Le nombre de discontinuités observées par unité de volume est moyennement bas ($Jv = 4-5m^{-3}$, localement 2-3 m⁻³), n'atteignant des valeurs de 10-11 m⁻³ que dans les portions les plus déformées, ce qui représente 20% environ du total du massif rocheux.

Sur la base de ces données, on peut supposer des valeurs de RQD assez élevés (RQD = 97,5 %, qualité excellente), qui peuvent descendre légèrement en correspondance des portions les plus déformées (RQD = 76,5%, bonne qualité). Les valeurs de résistance uniaxiale déduites I des valeurs de ricochet du scléromètre varient d'un maximum de 69.2 ± 30 MPa à un minimum de 18.1 ± 10 MPa, avec des valeurs moyennes de 27.3 ± 15 MPa.

Système k1

Le système de discontinuités k1 est représenté par des joints à espacement variable, de décimétrique à plurimétrique, parallèles à la foliation régionale, immergents donc à angle bas vers les quadrants occcidentaux. Ces joints, qui présentent des valeurs de rugosité à l'échelle décimétrique extrêmement variables, sont caractérisés par des valeurs basses d'ouverture et n'ont pas de remplissage. Leur persistance est généralement de quelques mètres, car ces plans se terminent surtout contre les discontinuités à angle haut du système k4 et, localement,

du système k2. Les valeurs de JRC à l'échelle métrique sont presque toujours basses, comme les valeurs de ricochet mesurées au scléromètre sont souvent sous la limite de l'échelle. Aucune présence d'eau ni de suintement n'ont été recensés en correspondance de ce système.

Système k2

Le système de discontinuités k2 est représenté surtout par des joints, et localement par des failles, à *strike* E-W et immergents vers N. Les discontinuités attribuables à ce système présentent un espacement métrique ou plurimétrique, et une persistance élevée qui dépasse souvent une quinzaine de mètres.

L'ouverture de ces discontinuités est généralement inférieure au centimètre et les plans sont normalement sans remplissage, même si l'on observe localement des couches de brèches à calibrage centimétrique.

Les plans k2 présentent des valeurs de rugosité basses tant à l'échelle décimétrique (04-08) qu'à l'échelle métrique (1-4). Leur terminaison est souvent masquée par la couverture quaternaire; là où elle est observable, ces plans semblent s'interrompre de préférence en correspondance de discontinuités attribuables au système k1. Les valeurs mesurées au scléromètre le long des discontinuités du système k2 sont assez basses (13,6-26,9). Aucune présence d'eau ni de suintement n'ont été recensés en correspondance de ce système.

Système k3

Le système de discontinuités k3 est représenté par des failles espacées à *strike* NNW-SSE immergents à angle bas vers ENE. Il s'agit de plans individuels caractérisés par une ouverture inférieure au centimètre, sans remplissage ou le long desquels de la calcite a précipité, avec une persistance supérieure à 5 mètres. Ces plans présentent des valeurs moyennes de rugosité à l'échelle décimétrique (8-10), mais ils sont caractérisés par des valeurs basses de JRC à l'échelle métrique. La nature de leur terminaison n'est pas clairement évaluable dans l'affleurement sélectionné.

Les valeurs de ricochet mesurées au scléromètre le long des discontinuités du système k3 sont proches de la limite de l'échelle. Aucune présence d'eau ni de suintement n'ont été recensés en correspondance de ce système.

Système k4

Le système de discontinuité k4 est représenté par des joints et des failles à orientation ENE-WSW, immergents à haut angle vers les quadrants méridionaux, qui définissent des bandes subverticales très fracturées, d'épaisseur pluridécimétrique et espacement plurimétrique. Dans les secteurs les moins déformés, on observe des systèmes conjugués de plans à *strike* analogue mais immergents à angle moyen vers des quadrants opposés (système k4*). La persistance des plans k4 est généralement plurimétrique, et dépasse souvent une dizaine de mètres. La complexité de ces structures se dénote tant par la variabilité des ouvertures observées, comprises entre quelques millimètres et plusieurs décimètres, que par la variété des remplissages observés. On reconnaît en effet autant des remplissages de type gouge que des brèches de faille à calibrage centimétrique ou décimétrique et des couches de foliation profondément disjonctive.

Les discontinuités du système k4 présentent des valeurs de rugosité à l'échelle décimétrique moyennes/élevées (8-16), et des valeurs de JRC à l'échelle métrique intermédiaires (8-10). Leur terminaison est normalement masquée par la couverture quaternaire.

Les valeurs de ricochet mesurées au scléromètre le long des plans sont proches ou sous la limite de l'échelle. Aucune présence d'eau ni de suintement n'ont été recensés en correspondance de ce système.

8.3.5 STATION FRJ-005

Le volume rocheux étudié est constitué de calcschistes de marbre généralement massifs alternés à des horizons faiblement foliés d'épaisseur centimétrique et espacement pluridécimétrique ou métrique. La texture de la roche est de type plan-schisteux, la foliation est disjonctive à l'échelle décimétrique ou supérieure.

De même que pour la station FRJ004, on n'observe guère de claires évidences de l'histoire des déformations du massif rocheux en milieu ductile. L'assise géométrique du massif rocheux étudié est en effet déterminée principalement par la déformation en régime plasto-frictionnel.

On recense 4 systèmes de discontinuités principaux (Tableaux 8.9 et 8.10; Figure 8.5; Photos 8.11 et 8.12):

- un premier système, dénommé k1, parallèle à la foliation régionale;

- un système, k2, à strike NW-SE;

- un système de discontinuités à bas angle et à orientation NNW-SSE, (k3);

- un système de discontinuités à haut angle et de plans conjugués à angle moyen à *strike* ENE-WSW, dénommé k4.

L'assise géométrique du volume étudié est déterminée principalement par les plans du système k3, beaucoup plus fréquents par rapport à la station FRJ004, et par ceux du système k4. Ces derniers définissent des bandes sub-verticales très fracturées, d'épaisseur pluri-décimétrique et espacement plurimétrique. Dans les secteurs moins déformés, on observe des systèmes conjugués de plans à *strike* analogue mais immergents à angle moyen vers des quadrants opposés (système k4*). Par rapport à la station adjacente FRJ004, le système de discontinuités parallèle à la foliation régionale revêt une plus grande importance et coupe localement les plans du système k4. En ce qui concerne la caractérisation cinématique, les nombreux indicateurs, constitués surtout par des fibres de calcite, indiquent des mouvements généralement normaux le long des plans de faille localisés.

Le nombre de discontinuités par unité de volume est plutôt bas ($Jv = 5-6 \text{ m}^{-3}$), n'atteignant des valeurs de 8-9 m⁻³ que dans les portions les plus déformées, ce qui représente 20% environ du total du massif considéré.

Sur la base de ces données, on peut supposer des valeurs de RQD assez élevées (RQD = 94,0%, qualité excellente), pouvant légèrement descendre en correspondance des portions les plus déformées (RQD = 83,5%).

Les valeurs de résistance uniaxiale déduites des valeurs de ricochet du scléromètre varient d'un maximum de 37.5 ± 20 MPa à un minimum de 18.1 ± 10 MPa, avec des valeurs moyennes de 26.9 ± 15 MPa.
Système k1

Le système de discontinuité k1 est représenté par des joints à espacement variable, de décimétrique à plurimétrique, parallèles à la foliation régionale et immergents ainsi à angle bas vers les quadrants occidentaux. Ces joints, qui présentent des valeurs de rugosité à l'échelle décimétrique assez variables (8-16), sont caractérisés par de faibles valeurs d'ouverture et sont privés de remplissage. Leur persistance est généralement de quelques mètres, mais elle peut dépasser localement une vingtaine de mètres. L'importance de ce système dans le cadre de la géométrie de l'affleurement est plus grande que dans la station précédente (FRJ004). En effet, bien que les plans du système k1 se terminent surtout contre les discontinuités à angle élevé du système k4, ils coupent localement celles-ci et sont caractérisés par conséquent par des persistances plus élevées. Les valeurs de JRC à l'échelle métrique sont presque toujours basses, de même que les valeurs de ricochet mesurées au scléromètre le long des discontinuités, normalement inférieures à 20 et souvent sous la limite de l'échelle. Aucune présence d'eau ni de suintement n'ont été recensés en correspondance de ce système.

Système k2

Le système de discontinuités k2 est représenté par des joints très espacés et peu persistants à *strike* NW-SE et immergents vers SW. Les discontinuités attribuables à ce système sont en général fermées, et présentent des valeurs de rugosité assez basses tant à l'échelle décimétrique (8-10) qu'à l'échelle métrique (3-4). Leur terminaison est souvent masquée par la couverture quaternaire; là où c'est observable, ces plans semblent s'interrompre de préférence en correspondance de discontinuités attribuables au système k4. Les valeurs mesurées au scléromètre le long des discontinuités du système k2 sont assez basses. Aucune présence d'eau ni de suintement n'ont été recensés en correspondance de ce système.

Système k3

Le système de discontinuités k3 est représenté par des failles à mouvement normal à *strike* NNW-SSE immergents à angle bas vers ENE. Il s'agit de plans individuels à espacement métrique caractérisés par des ouvertures inférieures au centimètre et remplissage de gouge ou de calcite. La persistance de ces plans, qui se terminent de préférence contre les discontinuités du même système, peut dépasser une vingtaine de mètres.

Les discontinuités du système k3 présentent des valeurs de rugosité à l'échelle décimétrique très variables (10-20) et de faibles valeurs de JRC à l'échelle métrique. Les valeurs mesurées au scléromètre le long des plans sont en général proches ou au-dessous de la limite d'échelle. Aucune présence d'eau ni de suintement n'ont été recensés en correspondance de ce système.

Système k4

Le système de discontinuités k4 est représenté par des joints et des failles à orientation ENE-WSW, immergents à angle haut vers les quadrants septentrionaux, qui définissent des bandes subverticales très fracturées, d'épaisseur pluridécimétrique et espacement plurimétrique. Dans les secteurs moins déformés on observe des systèmes conjugués de plans à *strike* analogue mais immergents à angle moyen vers des quadrants opposés (système k4). La persistance des plans k4 est généralement plurimétrique. Ces discontinuités présentent une ouverture variable, comprise entre quelques millimètres et plusieurs décimètres. Elles sont souvent privées de remplissage, mais sont parfois caractérisées par des brèches de faille à calibrage centimétrique ou décimétrique.

Les plans du système k4 présentent des valeurs de rugosité à l'échelle décimétrique moyennes/basses (6-10), et des valeurs de JRC à l'échelle métrique basses. Leur terminaison est normalement masquée par la couverture quaternaire, mais on observe localement leur terminaison en correspondance de joints du système k1.

Les valeurs de ricochet mesurées au scléromètre le long des plans sont en général proches ou au-dessous de la limite de l'échelle. Aucune présence d'eau ni de suintement n'ont été recensés en correspondance de ce système.

8.3.6 STATION FRJ-006

Le volume rocheux étudié est constitué de calcschistes de marbre présentant une foliation fortement pervasive. Cette foliation, caractéristiquement anostomosatée, est définie par des couches phylladiques latéralement continues d'épaisseur millimétrique qui enveloppent des couches de marbres latéralement continues d'épaisseur plurimillimétrique ou centimétrique, et prend des caractères disjonctifs à échelle pluridécimétrique ou métrique.

Le volume rocheux montre les évidences d'une intense déformation en régime ductile, témoignée par la présence de charnières de plis isoclinaux transposés qui déforment les couches de marbre. La foliation régionale est de plus déformée par de faibles plis ouverts non schistogènes.

La déformation en régime plasto-frictionnel a réutilisé amplement le *fabric* ductile. Les plans de discontinuité qui déterminent l'assise géométrique du volume rocheux sont en effet, presque exclusivement, les plans parallèles à la foliation régionale, dénommés plus bas système k1.

A part le système k1, deux autres systèmes de discontinuité d'importance nettement inférieure ont été distingués: le système k2, à orientation EW, et le système k3, à orientation NNW-SSE (Tableaux 8.11 et 8.12; Figure 8.6; Photos 8.13).

Le nombre de discontinuités observées par unité de volume est assez bas (Jv = $3-4 \text{ m}^{-3}$), n'atteignant des valeurs de 5 m⁻³ que dans les portions les plus déformées, ce qui représente 20% environ du total du massif considéré.

Etant donné l'anisotropie marquée du massif, la valeur de RQD résulte extrêmement variable selon la direction et n'est donc pas significativement évaluable.

Les valeurs de résistance uniaxiale déduites des valeurs de ricochet du scléromètre varient d'un maximum de 59.1 ± 25 MPa à un minimum de 19.2 ± 10 MPa, avec des valeurs moyennes de 26.1 ± 15 MPa.

Système k1

Le système de discontinuités k1 est représenté par des joints à espacement variable, de décimétrique à métrique, parallèles à la foliation régionale, qui, dans le secteur envisagé, tend à se verticaliser, s'immergeant à angle moyen/haut vers les quadrants occidentaux. Normalement, ces joints ne sont pas matérialisés par des superficies discrètes, mais par des horizons décimétriques en correspondance desquels la foliation devient profondément disjonctive à l'échelle centimétrique. On observe également de véritables niveaux bréchiques à calibrage centimétrique ou millimétrique.

Les plans du système k1 présentent des valeurs de rugosité à l'échelle décimétrique variables (8-18) accompagnés de valeurs de rugosité à l'échelle métrique beaucoup plus basses (3-4). Leur persistance, généralement de quelques mètres, peut souvent dépasser une vingtaine de mètres.

Les valeurs de ricochet mesurées au scléromètre le long des discontinuités sont normalement basses ou sous la limite de l'échelle. En ce qui concerne les conditions hydrauliques, en correspondance de certains plans du système on observe un suintement important.

Système k2

Le système de discontinuité k2 est représenté par des joints très espacés et peu persistants à *strike* E-W et immergents vers S. Les discontinuités attribuables à ce système présentent une ouverture millimétrique et sont privées de remplissage. Elles présentent des valeurs de rugosité à l'échelle décimétrique assez hautes (14-18) et se terminent en général contre les plans du système k1. Les valeurs mesurées au scléromètre sont proches de la limite de l'échelle. Aucune présence d'eau ni de suintement n'ont été recensés en correspondance de ce système.

Système k3

Le système de discontinuité k3 est représenté par des joints peu persistants et à espacement irrégulier à *strike* NNW-SSE et immergents vers ENE. Les discontinuités attribuables à ce système présentent une ouverture millimétrique et sont privées de remplissage ou localement scellées par du calcite. Elles présentent des valeurs de rugosité à l'échelle décimétrique intermédiaires (10-14) et se terminent en général dans la roche ou contre les plans du système k1. Les valeurs mesurées au scléromètre sont proches ou au-dessous de la limite de l'échelle. Aucune présence d'eau ni de suintement n'ont été recensés en correspondance de ce système.

LITHOTYPE	calcschistes
IMMERSION ET INCLINAISON PAROI	070 80
NOMBRE SYSTEMES DE DISCONTINUITE	4 + random
NOMBRE VOLUMETRIQUE DES DISCONTINUITES , Jv (joints/mc)	
valeur moyenne	6
valeur maximum (secteurs les plus fracturés)	8-10 (dans 10% env. du volume rocheux envisagé)
VALEURS DE r OBTENUES PAR SCLEROMETRE	
couches de marbre:	<10 <10 10.8 15.6 20.0 20.6 22.9 24.9 24.9 26.9 27.9 28.9
couches phylladiques:	<10 <10 <10 <10 10.8
AMPLEUR ASPERITES SUR ECHELLE METRIQUE	
k	1 50 mm / 1.5 m
k	2 10 mm / 1.5 m 200 mm / 1.5 m
k	3 10 mm / 1.5 m 100 mm / 1.5 m
k	4 20 mm / 1.5 m
DENSITE (kN/mc)	28,0
VALEURS DE r OBTENUES AU SCLEROMETRE	
valeur moyenne	21,6
valeur minimum	10,8
valeur maximum	28,9
VALEURS DE RESISTANCE UNIAXIALE (MPa)	
valeur moyenne	34,8±20
valeur minimum	18,9±10
valeur maximum	52,7±25
VALEURS DE RQD	
valeur moyenne	94,0 %
valeur minimum	80,0 %
JRC SUR ECHELLE METRIQUE	
k	1 12-16
k	2 03-20
k	3 03-20
k	4 06-08
RMR (Rock Mass Rating, Bieniawski 1974, 1976, 1979, 1989)	bomme-médiocre

Tableau 8.1 – Fiche générale du massif rocheux relatif à la station structurale FRJ 001, avec indication des principaux paramètres géotechniques.





SYSTEME DE DISCONTINUITE	TYPE DISCONTINUITE	IMMERSION INCLINAISON	ESPACEMENT)	OUVERTURE (mm)	PERSISTANCE (m)	longueur: L immersion: I direction: D	REMPLISSAGE	JRC	r au scléromètre	TERMINAISON	CONDITIONS HYDRIQUES
К1	joint	210 20 248 24 258 20 240 28 266 22 286 20 240 40 230 34 246 40 260 18 310 25 255 10 300 10 255 15 258 18 240 16 280 25 270 18 300 12 258 15 265 10 310 25 192 11 195 18 221 15 249 28 213 21 252 23 231 25 221 16	20 20 30 30 30 30 30 30 40 40 50 50 50 50 50 50 50 50 50 50 200	10 10 12 15	2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2		foliation disjonctive a échelle sub-millimétrique	8-10	<10 <10 10 11 12,2	couverture k2 k2 k2 k3 k3 k3 k3 k3 k4 k4 k4 k4 k4 k4 k4 k4 k4 k4 k4 k4 coche roche roche roche roche roche	sec
k2	joint joint joint faille faille faille faille faille faille shear- zone shear- zone	218 45 180 75 168 80 180 60 200 70 200 65 200 52 226 40 200 60 210 60	20 30 >2000 >2000 >2000 >2000 isolé isolé	0 0 1 2 2 10 10 100 150 200	0,2 0,5 0,6 >3 4 >5 >10		aucun aucun gouge foliation disjonctive à échelle sub-millimétrique foliation disjonctive à échelle sub-millimétrique brèche à calibrage centimétrique	10-12 12-14	<10	couverture couverture couverture couverture k1 k1 k1 k1 k1 k2 k2 k2 roche	sec
k3	joint faille faille faille faille	022 75 010 46 022 70 000 60 050 45	300 300 2000 >2000	0 2 2 5	>2 4 4 4 >4 6 >6	D 	aucun gouge gouge gouge	10-12 12-14	<10	couverture couverture couverture couverture couverture couverture k1 k1 k1 k2 roche	Sec
k4	joint joint joint faille faille	320 24 300 40 290 40 326 48 325 50	50 80 100 150 400 400 700	0 0 1 2 20	0,5 1 2 >10 >10 >20	I I L D	aucun aucun gouge gouge	10-12 12-14 14-16 14-16 16-18	<10	couverture couverture couverture couverture couverture k1 k1	sec
k _{random}	joint	150 60	isolé	0	1	I	aucun	-	-	-	sec

Tableau 8.2 – Caractérisation des systèmes de discontinuités de la station structurale FRJ 001.

LITHOTYPE	calcschistes
IMMERSION ET INCLINAISON PAROI	140 80 030 80
NOMBRE SYSTEMES DE DISCONTINUITE	4
NOMBRE VOLUMETRIQUE DES DISCONTINUITES , Jv (joints/mc) valeur moyenne valeur maximum (secteurs les plus fracturés)	1-2 5-6 (dans 30% env. du volume rocheux envisagé)
VALEURS DE r OBTENUES PAR SCLEROMETRE couches de marbre: couches phylladiques:	34.3 43.3 37.3 24.2 27.2 35.3 41.3 35.3 27.2 <10 <10 <10 <10 <10
AMPLEUR ASPERITES SUR ECHELLE METRIQUE k1 k2 k3 k4	20 mm / 1.5 m 10 mm / 1.5 m 30 mm / 1.5 m 10 mm / 1.5 m 10 mm / 1.5 m
DENSITE (kN/mc)	28,0
VALEURS DE r OBTENUES AU SCLEROMETRE valeur moyenne valeur minimum valeur maximum	33,9 24,2 43,3
VALEURS DE RESISTANCE UNIAXIALE (MPa) valeur moyenne valeur minimum valeur maximum	70,2±30 40,4±20 119,4±50
VALEURS DE RQD valeur moyenne valeur minimum	100,0 % 94,0 %
JRC SUR ECHELLE METRIQUE k1 k2 k3 k4	06-08 03-10 03-04 03-04
RMR (Rock Mass Rating, Bieniawski 1974, 1976, 1979, 1989)	bonne

Tableau 8.3 – Fiche générale du massif rocheux relatif à la station structurale FRJ 002, avec indication des principaux paramètres géotechniques.





UITE	JUITE	Z N	L	Æ	NCE		AGE		mètre	NOS	S S
SISTEME DISCONTIN	TYPE DISCONTIN	IMMERSIO	ESPACEMI (cm)	OUVERTUI (mm)	PERSISTA (m)	longueur: L immersion: direction: D	REMPLISS	JRC	r au scléro	TERMINAIS	CONDITIOI HYDRIQUE
К1	joint	290 30 300 25 270 28 310 25 255 28 230 25 270 25 280 30 290 28 270 34 290 25 270 25 235 28 270 26 264 20 230 20 180 25 230 20 180 25 230 20 230 25 230 20 230 25 230 20 230 25 230 25 230 20 230 25 230 20 230 25 230 20 230 25 230 20 230 25 230 20 230 25 230 20 230 20 230 25 230 20 230 20 235 25 230 20 235 25 2370 20 235 25 2370 20 235 25 2370 20 235 25 2370 20 235 25 2370 20 236 25 2370 20 236 25 2372 30 236 24 255 30	50 100 100 100 200 200 200 200 200 300 300 300 500 500 500	0 0 5 10 20	3 3 4 4 4 5 >5 6 7 8 >8 >10 >10		foliation disjonctive à échelle millimétrique	8-10 10-12 10-12 16-18	<10 <10 <10 15 15 15 18 21 25	couverture couverture couverture couverture couverture couverture couverture couverture couverture k2 k2 k2 k2 k4 k4 k4 k4 roche roche	sec
k2	joint faille faille faille faille	178 84 170 70 180 68 194 80 160 64 182 36 188 70 210 80	50 100 300 600	0 5 5 10 10 10 200	0,5 1 1 >1 >1 >4 >5 >10		aucun calcite gouge brèche à calibrage centimétrique lithons peu déformés avec veines d'extension	10-12 10-12 12-14	<10 13	couverture couverture couverture k1 k1 k1 k1 k1 roche roche	Sec
k2*	faille	180 38 182 36 164 32	600 >1000	10 100 200	>8	I	gouge	12-14	<10 12	k2 couverture	sec
k3	faille	000 50 020 52	30 >1000 >1000 >1000	0 10	2	I	aucun	12-14	<10	couverture	sec
k4	faille	272 50 272 40 268 48 266 40 270 50	>1000	5 10	3 >6	I I	aucun cataclasite brèche à calibrage centimétrique foliation disjonctive à échelle plurimillimétrique	8-10	<10	couverture couverture k2* roche	sec

 Tableau 8.4 – Caractérisation des systèmes de discontinuités de la station structurale FRJ 002.

calcschistes					
140 80					
4					
1-4 6-7 (dans 30% env. du volume rocheux envisagé)					
18.0 26.0 28.0 28.0 28.0 30.0 30.0 30.0 30.0 34.0 34.0 <10 <10 <10 <10 <10 <					
20 mm / 1.5 m 10 mm / 1.5 m 30 mm / 1.5 m 10 mm / 1.5 m 10 mm / 1.5 m					
28,0					
28,7 18,0 34,0 52,2±25					
28,4±15 70,4±30					
100,0 % 90,5 %					
06-08 03-10 03-04 03-04 bonne - médiocre					

Tableau 8.5 – Fiche générale du massif rocheux relatif à la station structurale FRJ 003, avec indication des principaux paramètres géotechniques.



Figure 8.3 - Projection polaire des pôles des discontinuités relevées dans la station structurale FRJ

SYSTEME DE DISCONTINUITE	TYPE DISCONTINUITE	IMMERSION INCLINAISON	ESPACEMENT (cm)	OUVERTURE (mm)	PERSISTANCE (m)	longueur: L immersion: I direction: D	REMPLISSAGE	JRC	r au scléromètre	TERMINAISON	CONDITIONS HYDRIQUES
k1	joint	280 20 260 25 258 24 286 20 300 20 230 25 270 25 330 20 280 25 250 20 270 20 270 20 270 20 270 20 270 20 270 20 250 30 250 35 250 35 230 30	30 50 100 200 200 300 300 300 300	50 100 300 300 300	5 >5 >10 >15 >20	0 0 0 0	foliation disjonctive à échelle sub-millimétrique ou millimétrique brèche à calibrage centimétrique	06-08 12-14	<10 13 23	couverture couverture couverture couverture roche roche	sec
k2	joint joint joint faille	168 80 140 76 330 86 154 54	100 100 200 200 >1000	0 1 10 100	2 2 >5 8 >10		aucun brèche à calibrage décimétrique	06-08	12 14	couverture couverture k1 k1 k2 k2 k2 k4 k4 roche roche	sec
k3	joint joint joint joint faille	040 52 020 74 068 70 030 80 032 76 240 82	100 300 500 1500	0 0 10 300	1 2 5 5 >10	 	aucun	10-12 12-14	12 14	couverture couverture couverture k1 roche roche roche	sec
k4	joint faille faille faille	310 50 305 35 330 18 340 20	100 200 200 500	0 100	2 2 >6 8 >10 >10	 	aucun foliation disjonctive à l'échelle millimétrique	10-12 12-14	<10 <10 14	couverture couverture k1 k1 k2	sec
kr	joint	090 80		1	2	I	aucun		-	couverture	sec

 Tableau 8.6 – Caractérisation des systèmes de discontinuités de la station structurale FRJ 003.

LITHOTYPE	calcschistes marbrés, marbres						
IMMERSION ET INCLINAISON PAROI	030 90						
NOMBRE SYSTEMES DE DISCONTINUITE	4						
NOMBRE VOLUMETRIQUE DES DISCONTINUITES , Jv (joints/mc) valeur moyenne valeur maximum (secteurs les plus fracturés)	4-5, localement 2-3 10-11 (dans 20% env. du volume rocheux envisagé)						
VALEURS DE r OBTENUES PAR SCLEROMETRE couches de marbre: couches phylladiques:	<10.0 10.2 10.6 10.8 10.8 12.0 12.2 12.2 12.2 12.6 13.1 14.6 15.1 15.6 17.1 17.6 18.1 19.8 20.6 21.2 22.9 22.9 23.1 28.9 28.9 29.2 34.3						
AMPLEUR ASPERITES SUR ECHELLE METRIQUE k1 k2 k3 k4	05 mm / 1.5 m 15 mm / 1.5 m 05 mm / 1.5 m 10 mm / 1.5 m 05 mm / 1.5 m 30 mm / 1.5 m						
DENSITE (kN/mc) VALEURS DE r OBTENUES AU SCLEROMETRE valeur moyenne	27,5						
valeur minimum valeur maximum	17,6 10,2 24,2						
VALEURS DE RESISTANCE UNIAXIALE (MPa)	0 4 ,0						
valeur moyenne							
valeur minimum valeur maximum	27,3±15 18,1±10 69,2±30						
VALEURS DE RQD							
valeur moyenne valeur minimum	97,5 % 76 5 %						
JRC SUR ECHELLE METRIQUE VALEURS DE r OBTENUES AU SCLEROMETRE							
k1	01-06						
k2 k3	U1-U4 01-02						
k4	08-10						
RMR (Rock Mass Rating, Bieniawski 1974, 1976, 1979, 1989)	médiocre - bonne						

Tableau 8.7 – Fiche générale du massif rocheux relatif à la station structurale FRJ 004, avec indication de principaux paramètres géotechniques.



Figure 8.4 - Projection polaire des pôles des discontinuités relevées dans la station structurale FRJ 004.

SISTEME DE DISCONTINUITE	TYPE DISCONTINUITE	IMMERSION INCLINAISON	ESPACEMENT (cm)	OUVERTURE (mm)	PERSISTANCE (m)	longueur L immersion: I direction: D	REMPLISSAGE	JRC	r au scléromètre	TERMINAISON	CONDITIONS HYDRIQUES
К1	joint	223 21 231 19 226 28 238 25 208 23 230 31 245 27 249 16 222 19 238 20 229 23 225 30 235 22 239 19 205 41 251 12 250 17 240 26 244 19 229 28 241 22 245 12 255 15 272 28	20 20 30 40 60 80 100 100 100 100 200 200 200 200 200 20	0 0 2 2 2 2 5 5 10	2 2 3 3 3 3 4 4 6		aucun	08-10 10-12 12-14 12-14 12-14 14-16 14-16 18-20	<10 <10 <10 <10 <10 <10 <10 <10 <10 <10	couverture couverture couverture k2 k2 k2 k4 k4 k4 k4 k4 k4 k4 k4 k4 k4 k4	Sec
k2	joint joint joint joint joint joint joint faille faille	000 88 026 72 004 80 358 74 352 72 002 88 008 80 000 76 024 84 030 86 348 86	100 200 400 400	0 0 10 10 20	0,5 1 >1,5 >3 >5 >6 >8 >10 >15 >15 >15	 	aucun aucun aucun aucun aucun brèche à calibrage centimétrique	04-06 06-08	13,6 16,6 26,9	couverture couverture couverture couverture couverture k1 k1 k1 k1 k1 k1 k1 k4	Sec
k3	faille	048 20 080 20	100 >1000	0 2 2 10	>5	D	aucun calcite	8-10	13,6 15,6	couverture	sec
k4	joint joint joint joint faille faille	146 58 164 80 148 88 162 82 150 72 334 88 162 68	50 50 100 200 200 200 200 300 600	10 20 30 100 200 500	>2 3 >10 >12	I D I I	aucun aucun gouge gouge brèche à calibrage centimétrique brèche à calibrage centimétrique foliation disjonctive à échelle pluricentimétrique	08-10 12-14 14-16	<10 13,6 16,6	couverture couverture couverture couverture couverture k1 k4	sec
k4*	faille faille	334 40 180 46	>1000	20 100	>2	I	aucun brèche à calibrage centimétrique	12-14 14-16	<10 11,6 14,1	couverture k1	sec
kr	faille	072 80	isolé	0 2	>2 >4	I D	aucun gouge	-	-	couverture k1	sec

 Tableau 8.8 – Caractérisation des systèmes de discontinuités de la station structurale FRJ 004.

240 90 4					
4					
4					
5-6 8-9 (dans 20% env. du volume rocheux envisagé)					
10.1 11.1 12.0 14.1 17.1 17.1 18.8 20.6 20.8 22.9 22.9					
10 mm / 1.5 m 10 mm / 1.5 m 10 mm / 1.5 m 05 mm / 1.5 m					
28,0					
17,0 10,1 22,9					
26,9±15 18,1±10 37,5±20					
94,0 % 83,5 %					
03-04 03-04 03-04 01-02 bonne - médiocre					

Tableau 8.9 – Fiche générale du massif rocheux relatif à la station structurale FRJ 005, avec indication des principaux paramètres géotechniques.





SISTEME DE DISCONTINUITE	TYPE DISCONTINUITE	IMMERSION INCLINAISON	ESPACEME NT (cm)	OUVERTURE (mm)	PERSISTANCE (m)	longueur: L immersion: I direction: D	REMPLISSAGE	JRC	r au scléromètre	TERMINAISON	CONDITIONS HYDRIQUES
К1	joint	213 15 215 14 223 18 242 16 249 30 240 31 225 24 231 28 239 18 206 40 251 12 240 16 240 26 250 20 227 28 242 22 245 12 252 15	20 20 50 50 50 200 400 400	0 0 2 2 10	1 2 2 3 3 6 >20		aucun	08-10 12-14 12-14 14-16	<10 <10 <10 <10 <10 <10 <10 12,0 12,2 13,2 14,1	couverture couverture k4	sec
k2	joint	224 76	>1000	0	>10	I	aucun	08-10	17,1	couverture k4	sec
k3	joint faille faille faille faille faille faille	060 24 058 22 052 34 080 66 066 12 060 20 058 44	60 80 200	3 3 4	1 >2 >2 >6 >20	I I I D	gouge calcite	10-12 12-14 12-14 18-20	17,1 18,8 20,8 22,9	couverture couverture couverture couverture k3 k3 k3	sec
k4	joint joint joint faille faille	348 80 342 76 332 72 358 86 324 64 350 86 342 86 340 78 330 68	20 20 30 50 80 100 100 300 1000	0 0 1 2 5 200 500	1 2 >3 >4 >4		aucun aucun brèche à calibrage centimétrique brèche à calibrage décimétrique	06-08 08-10 08-10	<10 <10 <10 <10 10,1 11,1 12,0 14,1 17,1 18,6 20,6 22,9	couverture couverture couverture couverture couverture k1 k1 k1 roche roche	sec
k4*	joint faille faille faille	322 35 150 65 150 60 140 60	100 500 1000	2 5 200	2 >3	 	aucun brèche à calibrage centimétrique brèche à calibrage décimétrique	06-08 08-10	12,0 17,1	couverture couverture k1 k4	sec
kr	joint	290 82	isolé	0	3 3	I D	aucun	-	-	roche	sec

Tableau 8.10 – Caractérisation des systèmes de discontinuités de la station structurale FRJ005

LITHOTYPE	calcschistes
IMMERSION ET INCLINAISON PAROI	020 80
NOMBRE SYSTEMES DE DISCONTINUITE	3
NOMBRE VOLUMETRIQUE DES DISCONTINUITES , Jv (joints/mc) valeur moyenne valeur maximum (secteurs les plus fracturés)	3-4 5 (dans 20% env. du volume rocheux envisagé)
VALEURS DE r OBTENUES PAR SCLEROMETRE couches de marbre: couches phylladiques:	<10.0 <10.0 <10.0 <10.0 <10.0 <10.0 <10.0 <10.0 <10.0 11.1 11.1
AMPLEUR ASPERITES SUR ECHELLE METRIQUE k1 k2 k3 k4	10 mm / 1.5 m 05 mm / 1.5 m 05 mm / 1.5 m
DENSITE (kN/mc)	28,0
VALEURS DE r OBTENUES AU SCLEROMETRE valeur moyenne valeur minimum valeur maximum	16,5 10,1 30,9
VALEURS DE RESISTANCE UNIAXIALE (MPa) valeur moyenne valeur minimum valeur maximum	26,1±15 19,2±10 59,1±25
VALEURS DE RQD valeur moyenne valeur minimum	-
JRC SUR ECHELLE METRIQUE k1 k2 k3	03-04 01-02 01-02
RMR (Rock Mass Rating, Bieniawski 1974, 1976, 1979, 1989)	médiocre

Tableau 8.11 – Fiche générale du massif rocheux relatif à la station structurale FRJ 006, avec indication des

principaux paramètres géotechniques.





SISTEME DE DISCONTINUITE	TYPE DISCONTINUITE	IMMERSION INCLINAISON	ESPACEMENT (cm)	OUVERTURE (mm)	PERSISTANCE (m)	longueur: L immersion: I direction: D	REMPLISSAGE	JRC	r au scléromètre	TERMINAISON	CONDITIONS HYDRIQUES
К1	joint joint joint joint joint faille	$\begin{array}{c} 294\ 58\\ 286\ 62\\ 252\ 48\\ 283\ 57\\ 293\ 60\\ 291\ 58\\ 283\ 57\\ 293\ 60\\ 291\ 58\\ 283\ 49\\ 287\ 53\\ 288\ 57\\ 285\ 60\\ 287\ 72\\ 291\ 58\\ 284\ 36\\ 278\ 40\\ 290\ 38\\ 291\ 41\\ 292\ 48\\ 289\ 50\\ 291\ 54\\ 288\ 55\\ 292\ 60\\ 286\ 55\\ \end{array}$	20 30 60 100 250	200 600	2 >7 >20		foliation disjonctive à échelle centimétrique brèche à calibrage centimétrique ou millimétrique	08-10 12-14 12-14 16-18	<10 11.6 14.0	couverture couverture roche	suintement
K2	joint	180 68 192 78	>600	1	1 >4	D I	aucun	14-16 16-18	12.0 14.0	k1	sec
КЗ	joint	070 80 068 76 048 64	20 >600	1 1 3			calcite	10-12 12-14	<10 14.0	couverture k1 roche	sec

 Tableau 8.12 – Caractérisation des systèmes de discontinuités de la station structurale FRJ 006.



Photo 8.1 - Détail d'un secteur du talus où s'est effectuée la station structurale FRJ 001.



Photo 8.2 - Détail d'un secteur du talus où s'est effectuée la station structurale FRJ 001.



Photo 8.3 - Détail d'un secteur du talus où s'est effectuée la station structurale FRJ 001.



Photo 8.4 - Détail d'un secteur du talus où s'est effectuée la station structurale FRJ 001.



Photo 8.5 - Détail d'un secteur du talus où s'est effectuée la station structurale FRJ 002.



Photo 8.6 - Détail d'un secteur du talus où s'est effectuée la station structurale FRJ 002.



Photo 8.7 - Détail d'un secteur du talus où s'est effectuée la station structurale FRJ 003.



Photo 8.8 - Détail d'un secteur du talus où s'est effectuée la station structurale FRJ 003.



Photo 8.9 - Détail d'un secteur du talus où s'est effectuée la station structurale FRJ 004.



Photo 8.10 - Détail d'un secteur du talus où s'est effectuée la station structurale FRJ 004.



Photo 8.11 - Détail d'un secteur du talus où s'est effectuée la station structurale FRJ 005.



Photo 8.12 - Détail d'un secteur du talus où s'est effectuée la station structurale FRJ 005



Photo 8.13 - Détail d'un secteur du talus où s'est effectuée la station structurale FRJ 006.

9 CONCLUSIONS

Au cours des études de faisabilité de la réalisation de la galerie de sécurité du Tunnel du Fréjus, nous avons effectué une caractérisation aux diverses échelles de l'état de fracturation du massif rocheux, en examinant les données tirées de plusieurs analyses différentes. Ont été effectuées:

- des estimations à grande échelle par des analyses d'images satellitaires et sur la base de l'examen détaillé de la documentation cartographique officielle (Carte Géologique d'Italie et Carte Géologique de France);

- caractérisations à l'échelle mésoscopique à travers l'exécution de levés géologiquesstructuraux détaillés en correspondance d'affleurements significatifs localisés sur le terrain;

- analyse ponctuelle sur la base des résultats des sondages faits à l'intérieur du Tunnel autoroutier actuel (analyse des carottes et analyse par télédétection en forage).

Dans ce chapitre, nous faisons une comparaison raisonnée entre les résultats provenant des différentes méthodes d'analyses résumées aux points précédents, en les mettant en corrélation, lorsque c'est possible, avec les résultats des reconnaissances durant l'excavation du tunnel actuel, afin de dessiner un cadre synthétique de l'assise géologique-struturale du site concerné par la réalisation de la galerie de sécurité.

En ce qui concerne le versant italien, les motifs géométriques, hiérarchiques et statistiquesdistributifs de la donnée linéamentaire sont congruents avec le cadre géométrique concernant les principales structures fragiles recensées sur la cartographie géologique officielle. Il y a une bonne correspondance entre l'orientation des principaux linéaments sur images satellitaires et la direction des principaux systèmes de discontinuité observés à l'échelle mésoscopique. En particulier, dans le cadre des stations structurales effectuées dans la Vallée du Fréjus (FRJ001 et FRJ003) et dans la Vallée de Rochemolles (FRJ002), il ressort que le système de linéaments à orientation ESE-WNW correspond surtout, à l'échelle de l'affleurement, à un système de failles conjuguées immergentes à angle haut (inclinaison 50°-80°) vers NNE et SSW. Il s'agit de failles à mouvement normal généralement fermées et à géométrie relativement complexe, caractérisée par des plans à angle haut souvent curvilignes, raccordés par des plans à angle plus bas (inclinaison 30°÷40°), auxquels sont associées des structures d'ordre hiérarchique inférieur comme, par exemple, des plans Riedel. Le système de linéaments à orientation ENE-WSW, peu représenté sur ce versant, correspond, à l'échelle de l'affleurement, à un système de joints et failles normales sub-verticales le long duquel se place l'incision du ruisseau Pian dell'Acqua. Le système de discontinuités parallèle à la foliation régionale, très évident à l'échelle mésoscopique, ne trouve au contraire pas de correspondance dans un système linéamentaire, car il s'agit de plans à angle bas difficilement repérables par l'analyse des images satellitaires. De même, l'orientation du système de failles qui coupent à angle bas la foliation régionale ne coïncide pas clairement avec l'un des maximums de fréquence relevés, même si localement il est reconductible au système linéamentaire à orientation ENE-WSW.

Dans le cadre du levé géologique-structural de surfaces, on observe une bonne correspondance entre les résultats obtenus dans les stations structurales situées sur le versant italien, et les mesures des principales discontinuités relevées en galerie pendant les phases d'excavation du Tunnel routier du Fréjus. Les orientations des principaux systèmes de discontinuités mesurés en surface dans les stations structurales FRJ 001 et FRJ 002 (voir les figures 8.1 et 8.2), coïncident avec les valeurs d'immersion et inclinaison obtenues par l'analyse des principales familles de discontinuités observées sur les fronts d'avancement (Polino, 1978) sur le tronçon compris entre les points kilométriques 9+868 et 10+868 (voir figure 5.4), durant la réalisation du tunnel routier actuel. Les données obtenues par l'analyse structurale réalisée en correspondance des affleurements rocheux les plus significatifs, peuvent donc être considérées comme valables aux fins de la caractérisation du massif rocheux à grande échelle, et être utilisées dans l'évaluation du comportement du massif même à de grandes profondeurs.

Les données tirées de l'analyse des carottes provenant des sondages effectués à l'intérieur du Tunnel routier du Fréjus (Campagne Musi.net 2002) semblent confirmer le cadre structural ressortant des reconnaissances géo-structurales réalisées sur le terrain. En particulier, les discontinuités observées à l'intérieur du sondage BH6, exécuté en correspondance du demitour (PK 10+675), présentent des orientations comparables aux linéaments et les familles de discontinuités particulièrement évidentes dans les premiers mètres à l'intérieur de l'orifice (orientés en direction NW-SE), coïncident avec les systèmes appelés k2 et k3 observés dans les stations structurales FRJ 002 et FRJ 003, tandis que le système sub-parallèle aux plans de schistosité correspond au système k1.

Le long du tronçon français, la comparaison entre la donnée linéamentaire et le cadre géométrique des principales structures fragiles (à direction N-S, E-W et ENE-WSW), recensées dans la feuille 775 – Modane de la "Carte Géologique de France" à l'échelle 1:50.000, montre à nouveau une bonne correspondance. Il y a aussi une bonne correspondance entre l'orientation des principaux linéaments localisés sur images satellitaires et la direction des principaux systèmes de discontinuités à l'échelle mésoscopique. En particulier, dans le cadre des stations structurales exécutées dans le Vallon du ruisseau St. Antoine (FRJ004 et FRJ005), il ressort que le système de linéaments à orientation ENE-WSW correspond à l'échelle de l'affleurement, surtout à un système de joints et failles à orientation analogue qui définissent des bandes sub-verticales à fracturation élevée et épaisseur pluri-décimétrique. Le système de linéaments à orientation E-W correspond surtout à un système de joints et failles nue surtout à un système de linéaments à un système de joints et failles a un système de joints et failles subordonnées, immergentes à angle haut vers le N.

Il y a de plus une bonne correspondance entre l'orientation des principaux linéaments localisés sur images satellitaires et la direction des principaux systèmes de discontinuité observés à l'échelle mésoscopique. En particulier, dans le cadre des stations structurales exécutées dans le Vallon du ruisseau St. Antoine (FRJ004 et FRJ005), il ressort que le système de linéaments à orientation ENE-WSW correspond à l'échelle de l'affleurement à un système de joints et failles à orientation analogue qui définissent des bandes sub-verticales à fracturation élevée d'épaisseur pluri-décimétrique. Ces systèmes de failles, caractérisés par des mouvements normaux à composante sènestre, délimitent des volumes rocheux moins déformés où sont présents des plans conjugués à strike ENE-WSW, eux aussi probablement localisables par télédétection. Le système de linéaments à orientation E-W, concentré essentiellement le long de l'axe de la Vallée de l'Arc, se vérifie à l'échelle mésoscopique. Il correspond en effet à un système de discontinuités, joints et failles subordonnées, immergents à angle haut vers le N. Le système de discontinuités parallèle à la foliation régionale et le système de failles normales à angle bas très évidents à l'échelle mésoscopique, ne trouvent au contraire pas de correspondance dans un système linéamentaire, car il s'agit de plans à angle bas difficilement repérables par télédétection.

Enfin, dans le secteur correspondant à la crête de frontière, les linéaments se rapportant au système à orientation N-S sont particulièrement répandus. Sur la base des observations effectuées en correspondance de la station structurale FRJ006, ce système de linéaments correspond à l'échelle mésoscopique à un système de joints et failles qui réutilisent les plans de foliation des calcschistes. Dans ce secteur, la foliation tend en effet à se verticaliser, et s'immerge à angle moyen/haut vers les quadrants occidentaux.

10 Documentation de référence

10.1 Documents de projet

10.1.1 Réalisation du Tunnel routier du Fréjus

SITAF – Relazione sulle determinazioni geomeccaniche-geologiche effettuate nel cunicolo esplorativo per il Traforo del Fréjus. Mémoire interne SITAF. Istituto di Arte Mineraria del Politecnico di Torino, 5 août 1966.

SITAF – SFTRF – *Traforo autostradale del Fréjus. Progetto definitivo.* Texte et Planches. Torino. 1968.

SITAF – Rilievo della situazione di fatto della discarica del materiale di scavo del tunnel autostradale del Frejus, in adiacenza al torrente Rochemolles presso l'imbocco lato Italia del Traforo. Carte à l'échelle 1:500. Co.ge.fa. S.r.l.. Luglio 1990.

SITAF – Relazione geognostica e geotecnica preliminare sul tracciato della progettata galleria autostradale del Frejus. PERETTI L. 1963.

SITAF – Osservazioni geognostiche e geoapplicative nel cunicolo esplorativo per il traforo autostradale. PERETTI L. 1966.

SITAF – Galleria stradale del Frejus – rilevamento geologico della galleria e dei pozzi di ventilazione sul lato Italiano. PERETTI L. 1968.

AMAT-CHANTHOUX R. (1978) – Note et compte-rendu de visites au Tunnel Autoroutier du Fréjus Modane (Savoie). Mémoire dul Bureau de Recherches Géologiques et Minières.

10.1.2 Interventions de maintenance et consolidation du Tunnel routier du Fréjus

SITAF – Indagini sulle condizioni strutturali del rivestimento e sulla stabilità della galleria nel tratto compreso fra le progressive 4+900m e 6+100m – Indagini topografiche. EDDA. 1994.

SITAF – Indagini sulle condizioni strutturali del rivestimento e sulla stabilità della galleria nel tratto compreso fra le progressive 4+900m e 6+100 m – Relazione tecnica relativa alla 1° determinazione del 22 ottobre 1994. EDDA. 1994.

SITAF – Interventi di verifica delle condizioni di stabilità del Traforo Autostradale del Frejus Lato Italia tra le progressive 4.900 e 6.100 – Rapporto di aggiornamento al 31 luglio 1994. GEODATA. 1994.

SITAF – Interventi di verifica delle condizioni di stabilità del Traforo Autostradale del Frejus Lato Italia tra le progressive 4.900 e 6.100 – Rapporto di aggiornamento al 31 ottobre 1994. GEODATA. 1994. SITAF – Indagini sulle condizioni strutturali del rivestimento e sulla stabilità della galleria nel tratto compreso fra le progressive 4+900m e 6+100 m – Relazione tecnica relativa alla 2° determinazione del 21 gennaio 1995. EDDA. 1995.

SITAF – Indagini sulle condizioni strutturali del rivestimento e sulla stabilità della galleria nel tratto compreso fra le progressive 4+900m e 6+100 m – Relazione tecnica relativa alla 3° determinazione del 17 giugno 1995. EDDA. 1995.

SITAF – Interventi di verifica delle condizioni di stabilità del Traforo Autostradale del Frejus Lato Italia tra le progressive 4.900 e 6.100 – Rapporto di aggiornamento al 20 luglio 1995. GEODATA. 1995.

SITAF – Interventi di verifica delle condizioni di stabilità del Traforo Autostradale del Frejus Lato Italia tra le progressive 4.900 e 6.100 – Rapporto di aggiornamento al giugno 1996. GEODATA. 1996.

SITAF – Interventi di verifica delle condizioni di stabilità del Traforo Autostradale del Frejus Lato Italia tra le progressive 4.900 e 6.100 – Rapporto di aggiornamento al luglio 1996. GEODATA. 1996.

SITAF – Indagini sulle condizioni strutturali del rivestimento e sulla stabilità della galleria nel tratto compreso fra le progressive 4+900m e 6+100 m – Relazione tecnica relativa alla misure di zeri iniziali sui capisaldi (7 settembre 1996) e dei vertici di controllo (28 settembre 1996). EDDA. 1996.

SITAF – Indagini sulle condizioni strutturali del rivestimento e sulla stabilità della galleria nel tratto compreso fra le progressive 4+900m e 6+100m – Relazione tecnica relativa alle misure del 22 febbraio 1997. EDDA. 1997.

SITAF – Interventi di verifica delle condizioni di stabilità del Traforo Autostradale del Frejus Lato Italia tra le progressive 4.900 e 6.100 – Rapporto di aggiornamento delle misure al 30 aprile 1998. GEODATA. 1998.

SITAF – Interventi di verifica delle condizioni di stabilità del Traforo Autostradale del Frejus Lato Italia tra le progressive 4.900 e 6.100 – Approfondimento dello studio del fenomeno deformativo - Rapporto di aggiornamento dello studio al 31 luglio 1998. GEODATA. 1998.

SITAF – Interventi di verifica delle condizioni di stabilità del Traforo Autostradale del Frejus Lato Italia tra le progressive 4.900 e 6.100 – Approfondimento dello studio del fenomeno deformativo – Monitoraggio prove ed indagini in sito prove di laboratorio - Rapporto di aggiornamento a settembre 1999. GEODATA. 1999.

10.2 Projet de la galerie de sécurité du Tunnel routier du Fréjus

10.2.1 Cartographie et photographies aériennes

ISTITUTO GEOGRAFICO MILITARE (IGM) - Carta Topografica d'Italia a scala 1:25.000, Foglio 54 - II SO Beaulard. Levés de 1934, avec mises à jour (reconnaissances) de 1964. ISTITUTO GEOGRAFICO MILITARE (IGM) - Carta Topografica d'Italia a scala 1:25.000, Foglio 54 - II SO Beaulard. Levés de 1934, avec mises à jour (reconnaissances) de 1964.

ISTITUTO GEOGRAFICO MILITARE (IGM) - *Riprese aerofotografiche relative al Volo GAI (1952-54).* Photos en noir et blanc.

REGIONE PIEMONTE - *Riprese aerofotografiche del territorio regionale (1979-80).* Photos couleurs.

REGIONE PIEMONTE - *Carta Tecnica Regionale (CTR) a scala 1:10.000*. Restitution aérophotogrammétrique des photos de 1991.

SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA (1911) - *Carta Geologica d'Italia a scala 1:100.000. Foglio: 54 – OULX.* Ministero dell'Industria.

SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA (1999) - *Carta Geologica d'Italia a scala 1:50.000. Foglio: 132-152-153 – BARDONECCHIA, con Note Illustrative*. Presidenza del Consiglio dei Ministri, Dip. Servizi Tecnici Nazionali – Regione Piemonte, Dir. Generale Servizi Tecnici di Prevenzione.

SEVICE GEOLOGIQUE NATIONAL (1989) *Carte Géologique de la France à 1:50.000. Feuille:* 775 – *Modane*, avec *Notice explicative*. Ministère de l'industrie – BRGM.

SITAF (2001) – Riprese aerofotografiche dell'alta Valle di Susa nel tratto Savoulx – Bardonecchia (2001). Photos couleurs.

10.2.2 Géologie et géomorphologie

ALLENBACH B. (1982) – Géeologie de la bordure SW du massif d'Ambin (Alpes occidentales). Lithostratigraphie des séries mésozoïques. Analyse tectonique et modélisation de la déformation. Thése de 3e cycle, 149 pp.

ALLENBACH B. & CARON J.M. (1986) – Relations lithostratigraphiques et tectoniques entre les séries mésozoïques de la bordure sud-ouest du massif d'Ambin (Alpes occidentales). Eclogae geol. Helv., 79, 75-116.

AMBROSETTI P., BOSI C., CARRARO F., CIARANFI N., PANIZZA M., PAPANI G., VEZZANI L. & ZANFERRARI A. (1987) – *Neotectonic map of Italy, scale 1:500,000.* CNR – Prog. Finalizzato Geodinamica, Sottoprog. Neotettonica. Quad. de "La Ricerca Scientifica", 114 (4). L.A.C. Firenze.

BARETTI M. (1893) - Geologia della provincia di Torino. Casanova, Torino.

BELLARDONE G. & FORLATI F. (1994) - Carta dei danni e degli effetti indotti da attività fluviale e torrentizia nel bacino della Dora Riparia ed indici di disequilibrio ID dei principali corsi d'acqua. Regione Piemonte, Banca Dati Geologica.

BODIN J. E RAZACK M. (1999) - L'analyse d'images appliquée au traitement automatique de champs de fractures. Propriétés géométriques et lois d'échelles. *Bull. Soc. Géol. France*, t.170, 4, 579-593.

CARRARO F. & MARTINOTTI G. (1993) – "Deformazioni gravitative profonde di versante" indotte da fenomeni di dissoluzione profondi. IV Seminario del Gruppo informale del CNR "Deformazioni gravitative profonde di versante", Pergola (La Verna), 24-28 maggio 1993. CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE (CNR) (1990) – *Structural model of Italy, scale 1 :500,000.* Sheet 1. CNR – Progetto Finalizzato Geodinamica.

ELTER G. (1972) - Contribution à la connaissance du Briançonnais interne et de la bordure piémontaise dans les Alpes Graies nord-orientales. Mem. Ist. Geol. Min. Univ. Padova, 28, 18.

DELA PIERRE F., LOZAR F. & POLINO R. (1997) – L'utilizzo della tettonostratigrafia per la rappresentazione cartografica delle successioni metasedimetarie nelle areee di catena. Mem. Sc. Geol., 49, 195-206.

DELA PIERRE F., POLINO R., BORGHI A., CARRARO F., FIORASO G., GIARDINO M., con contributi di BELLARDONE G., CONTI A., GATTIGLIO M., MALUSA' M. & MOSCA P. (1999) – *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scal a1:50.000. Foglio 132-152-153 "Bardonecchia".* Presidenza del Consiglio dei Ministri, Dip. per i Servizi Tecnici Nazionali, Servizio Geologico d'Italia, 118 pp.

DEVILLE E., FUDRAL S., LAGABRIELLE Y., MARTHALER M. & SARTORI M. (1992) – From Oceanic closure to continental collision: a syntesis of the "Schistes lustrés" metamorphic complex of the Western Alps. Geol. Soc. Am. Bull., 104, 127-139.

ENEL (1981) – *Elementi di neotettonica del territorio italiano*. Carte tematiche e Relazione. ALMA, Milano.

FUDRAL S. (1998) – Etude géologique de la suture téthysienne dans les Alpes franco-italiennes nord occidentales de la Doire Ripaire (Italie) à la région de Bourg Saint-Maurice (France). Géol. Alpine, Mémoire HS n° 29, 306 pp.

GIARDINO M. (1995) – Analisi di deformazioni superficiali: metodologie di ricerca ed esempi di studio nella media Valle d'Aosta. Tesi di Dottorato, 238 pp. Consorzio Universitario di Torino – Cagliari. Genova.

GIARDINO M. & POLINO R. (1997) – Le deformazioni di versante dell'alta Valle di Susa: risposta pellicolare dell'evoluzione tettonica recente. Il Quaternario, 10 (2), 293-298.

GUPTA R. P. (1977) - Delineation of active faulting and some tectonic interpretation in the Munich Milan section of the eastern Alps - use of Landsat 1 and 2 imagery. Tectonophysics, 38, 297-315.

LEMOINE M. (1967) - Brèches sédimentaires marines à la frontière entre les domaines briançonnais et pièmontais dans les Alpes occidentales. Geol. Rundschau, 56, 1, 320-335.

MORELLI M. (2000) – Analisi sulla possibilità di integrazione dei dati telerilevati in studi geologico-strutturali: applicazione nel dominio del Monferrato e delle Langhe. Thèse inédita de Doctorat en Sciences de la Terre, 168 pp. Università di Torino.

O'LEARY FRIEDMAN J. D. & POHN A. (1979) - *Lineament and linear, a terminological reappraisal*. Proc. 2nd Inter. Conf. on Basement Tectonics, Denver, Colorado, 571-577.

PFIFFNER O.A., LEHNER P., HEITZMANN P., MUELLER ST. & STECK A. (1997) – Deep structure of the Alps: results from NRP 20. Birkhäuser Verlag, Basel. 380 pp.

POLINO R. (1978) – Osservazioni geologiche nel traforo Autostradale del Frejus sino alla progressiva 4000 (nota preliminare). Boll. Ass. Min. Sub., XV, 4, 566-576.

PUMA F., RAMASCO M., STOPPA T. & SUSELLA G. (1989) – *Movimenti di massa nelle alte valli di Susa e Chisone*. Boll. Soc. Geol. It., 108, 391-399. PUMA F., RAMASCO M., STOPPA T. & SUSELLA G. (1990) – *Carta dei movimenti gravitativi e di massa delle alte valli di Susa e Chisone (scala 1:25:000)*. Regione Piemonte, Banca Dati Geologica.

RICHARDS J.A. (1986) - Remote Sensing Digital Image Analysis: an Introduction. Springer-Verlag, Berlin.

ROURE F., HEITZMANN P. & POLINO R. (1990) – *Deep structure of Alps*. Vol. Spec. Soc. Geol. It., 1, 367 pp.

ROURE F., BERGERAT F., DAMOTTE B., MUNIER J.L. & POLINO R. (1996) – *The ECORS-CROP Alpine seismic traverse.* Mém. Soc. Géol. Fr. 170. 113 pp.

SABINS F.F. JR. (1983) – *Geologic interpretation of Space Shuttle Radar Images of Indonesia.* Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 11, 2076-2099.

SACCO F. (1921) – Il glacialismo della Valle di Susa, con carta 1:100.000. L'Universo, 3 (8), 1-32.

SOCIETA' GEOLOGICA ITALIANA (1992) – *Le Alpi dal M. Bianco al Lago Maggiore*. Guide Geologiche Regionali, 3 (primo vol.), 311 pp. BE-MA Editrice, Milano.

WISE D.U. (1976) - *Sub-continental sized fractures system etched into the topography of New England.* Proc. 1st Inter. Conf. on the new basement tectonics, Utah Geol. Assoc. Pub., 5, 416-422.

10.2.3 Géologie appliquée et géotechnique

BARTON N., (1973) – *Review of a new shear-strenght criterion for rock joints.* – Eng. Geol., 7, pp. 287-332.

BARTON N., CHOUBEY V. (1977) – The shear strenght of rock joints in theory and practice. – Rock Mec., 10, pp. 1-54.

BEAU J.R., CABANIUS J., COURTECUISSE G., FOURMAINTRAUX D., GESTA P., LEVY M., NERAUD C., PANET M., PERA J., TINCELIN E. & VOUILLE G. (1980) - *Tunnel routier du Fréjus: les mesures* géotechniques effectuées sur le chantier francais et leur application pour la détermination et l'adaptation du soutènement provisoire. Revue Francaise de Geotechnique, 12, 57-82.

BERNADE J,. HABIB P., PLOUVIEZ P., STRAGIOTTI L. (1968) – *Mesure des contraintes dans le revêtement d'un tunnel Alpin.* Symposium international de mecanique des roches, Madrid.

BIENIAWSKI Z.T. (1974) – Geomechanics Classification of Rock Masses and its Application in *Tunneling.* – Proc. 3rd Int. Congr. Rock Mech., ISRM, Denver, U.S.A., vol. II A, pp. 27-32.

BIENIAWSKI Z.T. (1976) – *Rock Mass Classification in Rock Engineering*. – Proc. Symp. on Exploration for Rock Engineering, Johannesburg, vol. 2, pp. 97-106.

BIENIAWSKI Z.T. (1979) – *The Geomechanics Classification in Rock Engineering Applications.* – Proc. 4th Int. Congr. Rock Mech., ISRM, Montreaux, vol. 2, pp. 41-48.

BIENIAWSKI Z.T. (1989) – Engineering Rock Mass Classification. A Complete Manual for Engineers and Geologist in Mining, Civil and Petroleum Engineering. – Wiley Interscience, John Wiley & Sons.

BOCCA P. (1977) – Notizie sullo svolgimento dei lavori di costruzione del Traforo Autostradale del Frejus. Boll. Ass. Min. Sub., XIV, 1, 124-125.

CLARK S.P. (1966) - Handbook of Physical Constants. - Geol. Soc. of America, Mem. 97.

CONSORZIO TRAFORO FREJUS (CTF) (1977) – Notizie tecnche sulle attrezzature impiegate nella costruzione del Traforo Autostradale del Frejus. Boll. Ass. Min. Sub., XIV, 1, 126-127.

CREMONINI F. (1979) – Bullonatura della roccia nella galleria ferroviaria Exilles. Boll. Ass. Min. Sub., XVI (3), 779-796.

DEERE D.U. (1964) – *Technical description of rock cores for engineer-purposes.* – Rock Mechanics and Engineering Geology, vol. 1, n. 1, pp. 17-22.

ISRM – INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS, COMMISSION ON STANDARDIZATION OF LABORATORY AND FIELD TEST (1978) – Suggested method for the quantitative description of discontinuities in rock masses. Int. Jour. of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics, 15, pp. 319-368.

LUNARDI P. (1980) – Application de la mécanique des roches aux tunnels autoroutiers exemple des tunnels du Fréjus (cotè Italie) et du Gran Sasso. Revue Francaise de Geotechnique, 12, 5-20.

MILLER R.P. (1965) – Engineering classification and index properties for intact rock. – Ph. D. Thesis, Un. of Illinois, pp. 1-332.

PELIZZA S. (1977) – Notizie sugli studi geomeccanici per il Traforo Autostradale del Frejus. Boll. Ass. Min. Sub., XIV (1), 128-136.

PERETTI L (1969) – Studi di geologia applicata per la progettazione del Traforo Autostradale del Frejus con particolare rigiuardo al versante italiano. Atti 1º Congr. Naz. Problemi di Geologia Applicata, Verona.

PERETTI L (1977) – Geognosia schematica della regione alpina interessata dal Traforo Autostradale del Frejus e suoi risvolti geoapplicativi. Boll. Ass. Min. Sub., XIV (1), 113-123.

RIBACCHI R. (1979) – La bullonatura in sotterraneo esempi di impiego e problematiche connesse. Boll. Ass. Min. Sub., XVI (3), 691-727.

ROMANA M. (1990) – *Practice of SMR Classification of Slope Appraisal.* – Proc. 5th Int. Symp. on Landslides, 10-15 July 1988, Lausanne. Landslides. A.A. Balkema, Rotterdam, vol. 3.

STRAGIOTTI L. (1977) – Note sulla costruzione del traforo autostradale del Frejus. Boll. Ass. Min. Sub., XIV (1), 111-136.

STRAGIOTTI L., ARMANDO E., BARISONE G.P., DEL GRECO O., INNAURATO N., PELIZZA S., POLINO R. & VENOSI U. (1979) – Essais et auscultations dans la conception et l'exécution de quatre tunnels dans les Schistes Lustrés de Suse(Italie).

nels dans les Schistes Lustres de Suse(Italie).