



SOCIETA' ITALIANA TRAFORO AUTOSTRADALE DEL FREJUS
SOCIETE' FRANCAISE DU TUNNEL ROUTIER DU FREJUS



Traforo Autostradale del Fréjus Tunnel Routier du Fréjus

COSTRUZIONE GALLERIA DI SICUREZZA
CONSTRUCTION GALERIE DE SECURITE

PRELIMINARE	PRELIMINAIRE	X	DEFINITIVO	AVANT-PROJET		ESECUTIVO	PROJET	
-------------	--------------	---	------------	--------------	--	-----------	--------	--

Il Responsabile del progetto MUSI.NET S.p.A Il Direttore Tecnico Dott. Ing. Bernardo Magri Le Responsable du projet MUSI.NET S.p.A Le Directeur Technique Dott. Ing. Bernardo Magri	Attività specialistiche di supporto al progetto per: Activités spécialisées de support au projet pour:	

Relazione Geologico-Geotecnica dell'Imbocco Lato Italia Dossier Géologique et Géotechnique de la zone de la tête côté Italie		20R	
		N°	
CODICE - CODE	gs90RT17	N° FILE	gs90RT17
REVISIONE - REVISION	0	DATA - DATE	30/09/2002

C			
B			
A			
0	30/09/2002	1° EMISSIONE	
rev.	data	descrizione della revisione description de la révision	visto - validé

Questo disegno è di proprietà riservata della MUSI.NET S.p.A.: ne è vietata la riproduzione anche parziale, nonché 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

Trafo Autostradale del Fréjus - Costruzione Galleria di Sicurezza

Tunnel Routier du Fréjus - Construction Galerie de Sécurité

PROGETTO PRELIMINARE

PROJET PRELIMINAIRE

RELAZIONE GEOLOGICO-GEOTECNICA

DELL'IMBOCCO LATO ITALIA

DOSSIER GEOLOGICO-GEOTECHNIQUE

DE LA TETE COTE ITALIE

SOMMAIRE

1.	Introduction	4
2.	METHODE DE TRAVAIL.....	8
3.	CLASSIFICATION SISMIQUE DU TERRITOIRE.....	10
4.	CADRE GEOLOGIQUE REGIONAL.....	11
4.1	Substratum pré-quaternaire	15
4.1.1	Unité tectonostratigraphique du Lago Nero	15
4.2	Evolution structurale et Néotectonique	16
4.3	Linéaments géomorphologiques et dépôts quaternaires.....	19
4.3.1	Dépôts et formes liés à l'action de la gravité.....	21
4.3.2	Eléments relatifs à la dynamique fluviale et torrentielle.....	23
5.	ASSISE GEOLOGIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE DU SITE ETUDIE	26
5.1	Unités litho-stratigraphiques du substratum.....	26
5.2	Unités litho-stratigraphiques de la couverture	27
5.2.1	Sédiments et formes liées à la glaciation.....	28

5.2.2	Sédiments et formes liés à l'action de la gravité	30
5.2.3	Sédiments et formes liés à l'écoulement des eaux superficielles	32
5.3	Dynamique des cours d'eau	34
5.3.1	Historique des événements de crue survenus dans le bassin du Rochemolles	41
6.	CARACTERISATION GEOLOGIQUE ET TECHNIQUE DU SITE DE TETE.....	44
6.1	Caractères généraux	44
6.2	Cadre interprétatif des reconnaissances géognostiques.....	45
6.3	Unités géologiques et techniques.....	47
6.3.1	Unités R.....	47
6.3.2	Unité dc.....	48
6.3.3	Unité df.....	48
6.3.4	Unité al.....	49
6.3.4	Unité als.....	49
6.3.5	Unité dg.....	50
6.3.6	Unité cs.....	50
7.	ASSISE HYDROGEOLOGIQUE.....	51
7.1	Classement hydro-géologique de la zone étudiée	52
7.2	Mesures piézométriques	55
8.	DOCUMENTATION DE REFERENCE	56
8.1	Documents de projet.....	56
8.2	Cartographie et prises de vue aériennes	57
8.3	Géologie et géomorphologie	58

1. Introduction

Ce mémoire décrit le cadre géologique et technique acquis par les études géologiques et la campagne de reconnaissances géognostiques finalisées au développement 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, l'un des raccords autoroutiers 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, elle 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'un tunnel, 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 *Dossier* a pour objectif de décrire les différents problèmes géologiques, géomorphiques, géomorphologiques et hydrologiques du site de tête du Tunnel routier du Fréjus, tandis que les mémoires *géologique (document 21R)* et *géotechnique géomécanique (document 22R)* s'occuperont de façon spécifique du tronçon en souterrain de la Galerie de sécurité.

Cette étude a pour objectif d'intégrer et de compléter les anciennes données géologiques et géotechniques, afin de définir des solutions optimales de réalisation dès la phase de projet préliminaire. Pour ce faire, il a fallu récolter la vaste documentation géologique et géotechnique produite en phases de projet et d'exécution du site de la tête côté Italie d'une part, et la réalisation d'un relevé géologique et géomorphologique détaillé en parallèle avec une étude photo-interprétative à plusieurs échelles et pluritemporelle.

Une campagne de reconnaissances a aussi été entreprise, dans le cadre de cette étude, à travers une série de sondages géognostiques par carottage continu situés sur le site de l'usine de ventilation. Cette exploration a servi à reconstruire la succession stratigraphique, en récoltant les données nécessaires pour la caractérisation des paramètres physiques et mécaniques des roches et des terrains présents sur la plate-forme d'entrée du Tunnel.

Le tableau des connaissances ainsi obtenu a permis une reconstruction représentative de l'assise géologique de la zone environnant le site de tête du Tunnel routier du Fréjus (Figure 1.1 et Photo 1.1).

Au total, les opérations suivantes ont été effectuées:

- relevés géologiques-géomorphologiques directs et par photographie aérienne du secteur de tête côté Italie.
- investigation historique sur la dynamique fluviale du Torrent Rochemolles.

- sondages géotechniques à carottage continu pour la caractérisation du massif rocheux, l'exécution de relevés en forage et l'installation d'instruments de monitoring de la nappe ;

Les documents techniques suivants font partie intégrante du présent *Dossier*:

Description	n° document	Code
Planimétrie localisation investigations géotechniques au 1:1.000	68P	Gs_90_GT_02
Carte Géologique et Géomorphologique du site du projet au 1:2.000	69P	Gs_90_GT_03
3 Coupes transversales géologiques significatives au 1:2.00/1:200	70P	Gs_90_GT_04
	71P	Gs_90_GT_05
	72P	Gs_90_GT_06
Planche photographique des éléments géomorphologiques de la tête côté Italie	84P	Gs_90_GT_014
Planche photographique des éléments concernant l'activité du Torrent Rochemolles	85P	Gs_90_GT_015
Reconnaitances géognostiques in situ	23R	Gs_90_RT_20

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

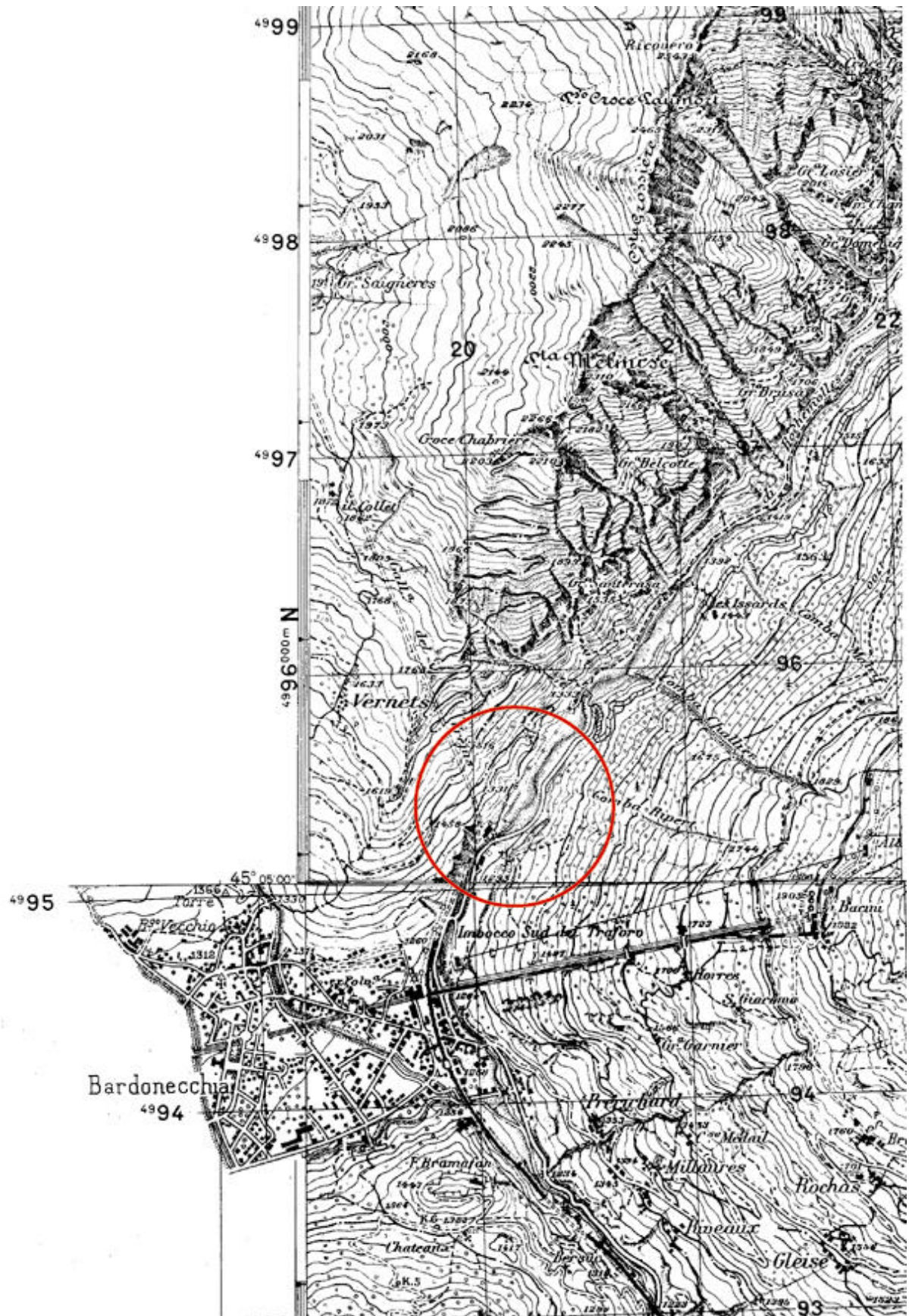


Figure 1.1 –Cadre du site examiné sur coupe de planchette IGM



Photo 1.1 – Coupe de photo aérienne du site de tête du tunnel routier du Fréjus.

2. METHODE DE TRAVAIL

Les reconnaissances sur le terrain et en bureau se sont articulées dans les phases suivantes:

- Analyse critique de la bibliographie géologique récente sur le site, avec une attention particulière aux éléments ressortis du relèvement de la nouvelle Carte géologique d'Italie au 1:50.000 et pour le cadre de déformation reconnu pour la Haute Vallée de Suse;
- Examen des photos aériennes concernant le territoire, faites à des phases différentes (vol IGM-GAI des années Cinquante, vol Région Piémont de 1979, vol Région Piémont de 2000, vol de 2001 de la Société SITAF pour le développement du Projet Autoroutier);
- Ebauche et exécution de relevés géologiques-techniques et géomorphologiques détaillés;
- Consultation des documents produits par les Services techniques de la Région Piémont sur l'assise hydro-géologique du territoire (Cartographie du Risque hydro-géologique);
- Consultation des documents produits par les Services techniques de la Région Piémont suite aux événements météo-hydrologiques de Novembre 1994, intégrés à l'analyse des photos aériennes faites en Décembre 1994;
- Consultation des documents produits par les Services techniques de la Région Piémont aux événements météo-hydrologiques d'Octobre 2000;
- Récolte des données géologiques et géotechniques et des documents du projet de réalisation de l'actuel tunnel routier du Fréjus.

Dans le cadre de ce mémoire, nous exposerons les résultats des diverses investigations effectuées sur la base des données acquises.

Le relevé géologique et géomorphologique détaillé a été effectué sur une bande significative autour de l'actuelle tête du tunnel routier, dans le but de déterminer les principaux éléments géologiques, géomorphologiques et hydrogéologiques en tenant compte des bases topographiques officielles suivantes:

- Carte d'Italie au 1:25.000 de l'Istituto Geografico Militare (I.G.M) - Planchettes 54 II NO "ROCHEMOLLES" et 54 II SO "BEAULARD" éditées en 1934 avec reconnaissances de 1964.
- Carte Technique Régionale au 1:10.000 (CTR) de la Région Piémont - Coupe n° 153090, restitution photogrammétrique des prises de vue aériennes 1991.
- Levé topographique détaillé au 1:2.000, sur la base d'un levé photographique effectué à l'occasion de la réalisation de la quatrième voie de la route A32.

En particulier, ce dernier document cartographique a servi comme support pour les relevés géologiques et géomorphologiques de terrain détaillés sur une bande significative autour de l'actuelle entrée du Tunnel routier, outre à l'emplacement de la campagne

géotechnique. Dans les secteurs marginaux non couverts de cette base topographique, nous avons utilisé la Coupe n° 153090 de la Carte Technique Régionale.

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 site de tête de la voie de secours du tunnel prévue est entièrement situé sur le territoire communal de Bardonnèche (Province de Turin) non classé comme zone sismique.

4. CADRE GEOLOGIQUE REGIONAL

Du point de vue géologique régional, la Haute vallée de Suse, dont le secteur concerné par le projet fait partie, s'insère dans le secteur de chaîne alpine appelé Alpes Occidentales. Elle coupe les plus importants systèmes structuraux qui partagent le côté interne de la chaîne à vergence européenne pour constituer quelques-unes des grandes unités paléogéographiques structurales que la littérature géologique classique nomme Austro-alpin, Pennique et unités ophiolitiques associées (Fig. 4.1 et 4.2).

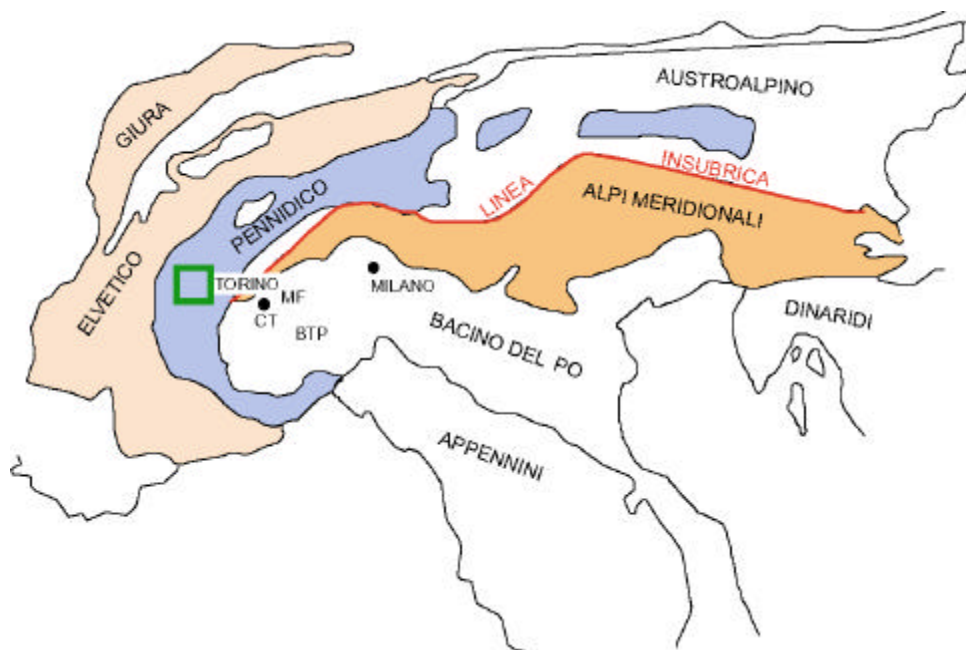


Figure 4.1 - Distribution des grands domaines paléogéographiques-structuraux dans les Alpes selon la littérature classique: Helvético-jurassien, Pennique, Alpes méridionales, Monferrato (MF), Colline de Turin (CT) et Bassin Tertiaire Piémontais (BTP). Le carré indique l'emplacement du secteur de versant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

Comme le montre la Figure 4.2, la Haute vallée de Suse fait partie de la zone de suture et d'épaississement crustal le plus important (indiquée comme "Pennique" à la Figure 4.2), comprise entre les deux anciennes marges continentales (européenne au Nord-Ouest et africaine au Sud-Est, convergeant, à partir du Crétacé, il y a environ 130 million d'années) et contient les restes de l'océan disparu (océan Liguro-Piémontais, qui s'était formé au Jurassique supérieur, il y a environ 160 millions d'années).

Sur la base de la disposition géométrique et des caractères internes des différentes unités lithostructurales de la Haute vallée de Suse, on peut comprendre les différents mécanismes et parcours suivis par ces unités au cours de la déformation alpine. Le schéma de la Figure 4.2 montre clairement que, sur le côté occidental, les diverses unités structurales se sont chevauchées d'Est en Ouest; cette direction de mouvement correspond à la trajectoire de

convergence de la plaque africaine vers la plaque européenne, tel qu'il se réalise dans les Alpes occidentales. A l'heure actuelle, ces mouvements tectoniques, loin de s'être arrêtés, produisent encore des effets en sous-sol et sur la surface terrestre. La sismicité de la basse Vallée de Suse et du Pinérolais en sont le témoignage, tandis que les mêmes déformations gravitaires se réalisant sur les versants montagneux de la Haute vallée de Suse semblent être guidés par des mouvements plus récents de la croûte terrestre présents dans cette zone (cfr. § 2.3.1).

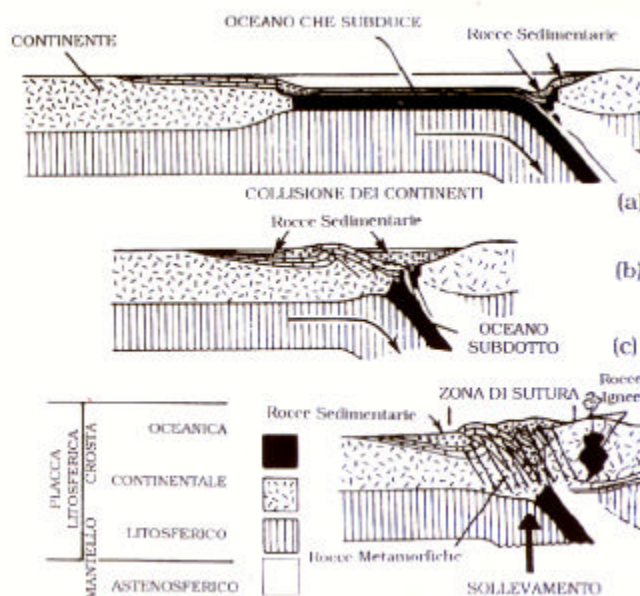


Figure 4.2 – Modèle d'évolution convergent de deux marges continentales (a), qui entraînent la disparition de l'océan interposé (b) puis la formation d'une chaîne de montagne de collision (c).

Récemment seulement, certains auteurs (ROURE ET ALII, 1990, 1996; PFIFFNER ET ALII, 1997) ont proposé une nouvelle interprétation de la structuration de la chaîne, relativement simple, à petite échelle et homogène tout le long de la chaîne des Alpes occidentales, basée sur des résultats provenant des profils sismiques CROP/ECORS (Figure 4.3). Suivant cette théorie, les Alpes constituent une chaîne à double vergence, ?européenne? pour le secteur externe et ?insubrienne? ou ?apulienne? pour le secteur interne, où l'on peut distinguer trois grands domaines structuraux reproduisant en partie les conceptions paléogéographiques des modèles précédents ::

- Un domaine interne, appartenant à la plaque supérieure du système 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 externe de la chaîne, qui correspond au domaine helvético-dauphinois des anciens auteurs;
- Une partie axiale, délimitée par deux surfaces de discontinuité majeures, à l'échelle crustale (ligne Insubrienne à l'intérieur et front Pennique à l'extérieur), dans laquelle sont comprises les unités océaniques et les nappes Penniques et Austro-alpines de l'ancienne littérature.

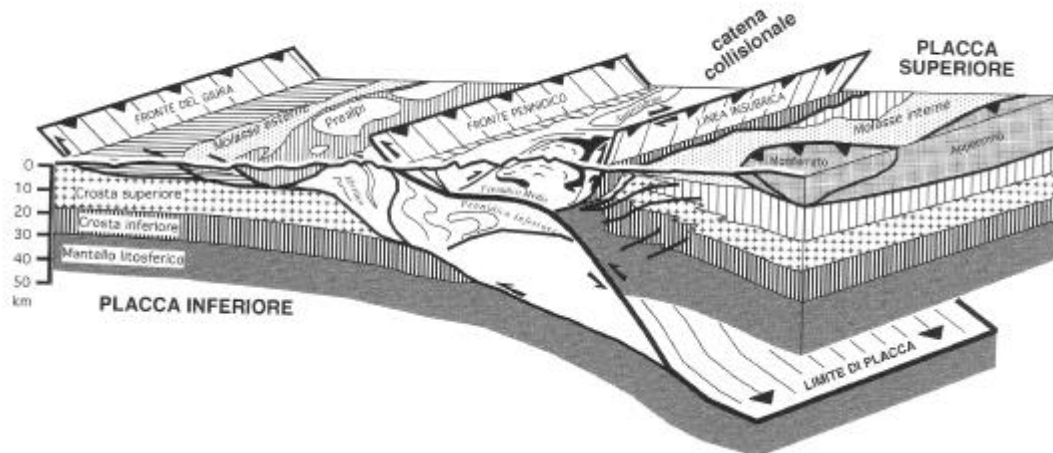


Figure 4.3 - Stéréogramme des Alpes Occidentales montrant les trois grands domaines structuraux. Le côté antérieur coïncide à peu près au profil sismique CROP/ECORS entre le Jura français et la Plaine du Pô, à proximité de Turin (Roure et alii, 1990, 1996). Le profil sismique a traversé la chaîne le long des vallées de l'Orco et de l'Isère. Dans les zones externes, des traits horizontaux indiquent les couvertures de l'avant-pays, des traits verticaux les nappes helvétiques, et 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. Dans la zone axiale, sont schématisées les structures principales ductiles et fragiles de l'empilement de nappes, puis, en noir, les ophiolites les plus importants (da DELA PIERRE ET ALII, 1999).

L'aspect le plus stimulant de cette interprétation génétique du secteur alpin se situe au niveau de la partie axiale de la chaîne de collision, qui est complètement dégagée des zones plus externes et internes : elle contient toutes les unités ayant subi un ou plusieurs événements métamorphiques liés à la subduction et à la collision, et leur distribution à l'intérieur de la zone axiale n'est pas le fruit d'une évolution cylindrique des domaines paléogéographiques, mais semble être remise sans cesse en jeu par les cinématiques locales. Il en découle que chaque élément structural de la chaîne, défini comme unité tectonostratigraphique (sensu DELA PIERRE ET ALII, 1997) ou unité tectonométamorphique (sensu SPALLA ET ALII, 1998) peut avoir une histoire tectonométamorphique autonome par rapport aux unités voisines.

Dans ce contexte, se situent les résultats des nouveaux relevés géologiques-structuraux effectués lors de la réalisation de la feuille n°153 "Bardonecchia" de la Carte Géologique d'Italie au 1:50.000 (POLINO ET ALII, 1999).

Suivant le schéma proposé par DELA PIERRE ET ALII, (1999), qui représente le cadre géologique interprétatif le plus récent des connaissances scientifiques du secteur intéressé, on distingue une série d'unités tectonostratigraphiques définies respectivement "de marge continentale", "océaniques" et "ophiolitiques".

Les "unités de marge continentale" comprennent un socle cristallin pré-triasique mono et polymétamorphique (représenté respectivement par les complexes d'Ambin et de Clarée) et une succession autochtone de métasédiments mésozoïques de couvertures, constituée de

calcschistes, de marbres et de quartzites. S'y associe un groupe d'unités tectonostratigraphiques de couverture, à roches carbonatées mésozoïques prédominantes et à calcschistes subordonnées: Unité des Rois Mages, du Chaberton-Grand Hoche-Grand Argentier, de Valfreid, de Gad et du Vallonetto.

Les "unités océaniques", entendues comme unités déposées sur croûte océanique, sont représentées par les unités de l'Albergian et du Lago Nero. Les successions respectives sont constituées par des calcschistes prédominants et par des marbres, quartzites et roches vertes subordonnés.

Parmi les "unités ophiolitiques", on distingue celles de la Roche de l'Aigle, du Vin Vert et de Cerogne-Ciantiplagna. Constituées de successions à calcschistes et ophiolites prédominants, leur dépôt sur croûte océanique n'est pas certain.

Pour l'assise géologico-structurale, voir la feuille Bardonecchia, citée plus haut, dont la Figure 4.4 reproduit le schéma géologico-structural au 1:200.

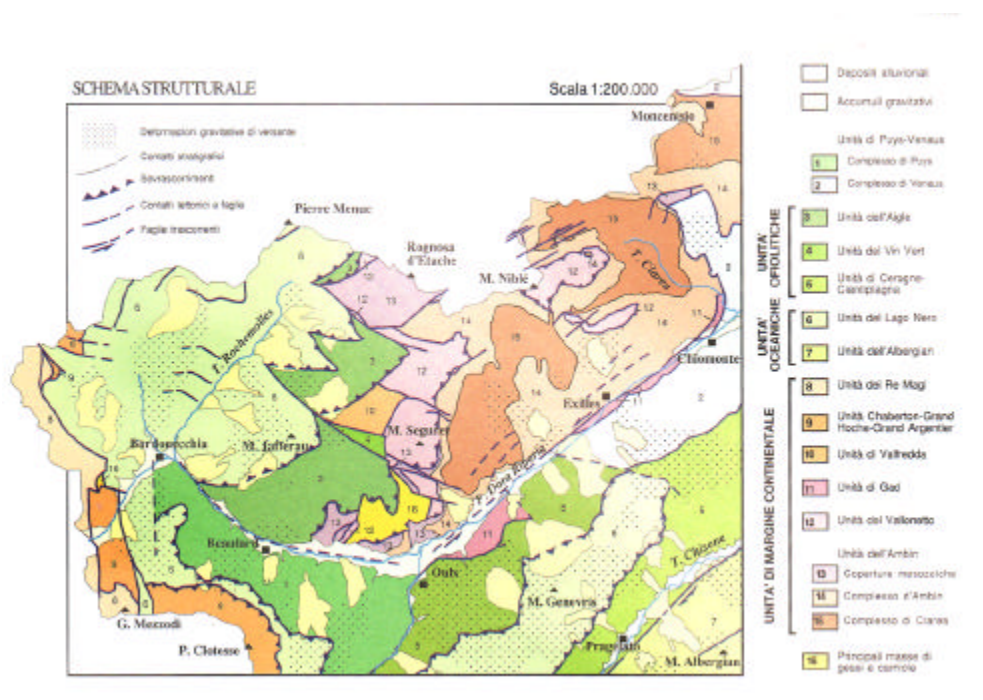


Figure 4.4 - Schéma géologico-structural au 1:200.000 tiré de la feuille n° 153 "Bardonecchia" d'après la Carte Géologique d'Italie au 1:50.000 (d'après POLINO ET ALII, 1999).

Dans les paragraphes suivants, on reprendra textuellement la description des unités tectonostratigraphiques et des complexes leur appartenant, telle qu'elle est fournie dans les notes explicatives de la feuille n° 153 "Bardonecchia" (DELA PIERRE ET ALII, 1999).

4.1 *Substratum pré-quadernaire*

4.1.1 Unité tectonostratigraphique du Lago Nero

Elle se compose d'un fond océanique formé de serpentinites et d'ophicalcites, sur lequel s'appuie une succession sédimentaire à affinités liguriennes, comprenant des brèches de serpentinites et de basaltes, radiolarites, marbres à patine d'altération claire, de phyllades alternées à des schistes carbonatés à bords silicifiés, de phyllades noires en faciès de *black shales* et de schistes carbonatés "arénaux" 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, tandis que le versant situé à l'Est de Bardonnèche est constitué de lithotypes appartenant à l'Unité tectonostratigraphique de Puys-Venaus.

Le complexe du Lago Nero comprend les successions à calcschistes prédominants, considérées comme étant la portion d'âge créacé de la couverture ophiolitique. Dans le site examiné, le complexe du Lago Nero est surtout représenté par des calcschistes carbonatés à patine d'altération ocre, riches en ankerite, affleurant en bancs massifs d'épaisseur métrique, tandis que des masses mineures de phyllades noirâtres affleurent le long de la dorsale en aval de la Croix Chabrière. Les calcschistes carbonatés sont interprétables comme des dépôts détritiques, datant du Crétacé supérieur pour le cadre stratigraphique et par comparaison avec des faciès analogues présents dans toute la chaîne alpine (DEVILLE *et alii*, 1992), tandis que les phyllades sont interprétables comme dérivant de sédiments riches de substance organique et sont reliées à l'épisode anoxique, répandu à l'échelle du bassin thétyisien datant de la limite entre le Crétacé Inférieur et le Crétacé Supérieur (Aptiano-Albiano).

4.2 Evolution structurale et Néotectonique

La Vallée de Rochemolles, comme toute la Haute et Moyenne Vallée de Suse, se développe à l'intérieur d'un secteur de la chaîne alpine intéressé par une longue et complexe 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 tardi-orogénique alpine) de type fragile.

Le cadre structural ductile des unités calcschistes appartenant au domaine piémontais a été analysé en détails dans des travaux récents, que l'on peut consulter pour approfondissements (ALLENBACH, 1982; ALLENBACH & CARON 1986).

Il faut toutefois remarquer que, dans le secteur de la Vallée de Suse, on reconnaît dans certains cas la phase de plissement la plus ancienne (F1) qui a produit une schistosité pervasive et transpositive (S1) généralement conservée dans les lithotypes les plus compétents (gneiss, marbres), tandis qu'elle est peu préservée dans les lithotypes riches en mica, plus ductiles. Dans ceux-ci, en effet, se développe de façon pervasive, une seconde schistosité S2 liée à des plis F2, alors que la première phase de plissement ne survit que dans certains cas, comme charnière intra-foliaire isoclinale.

Ces deux discontinuités planaires peuvent donc, selon les circonstances, se présenter comme la schistosité principale ("régionale"), où, dans des conditions favorables d'observation, elles peuvent être discriminées sur la base des rapports d'intersection et de chevauchement.

Dans le site examiné, en particulier, vu les caractères lithologiques prédominants, la schistosité principale correspond à S2 avec une immersion vers SW ou WSW avec inclinaison variable entre 20-30°, et est définie par le parallélisme des phyllosilicates. La phase de déformation S1 est rarement préservée, vu les caractéristiques phylladiques des lithotypes en question, on n'observe la S1 sous forme de micro-plis dans les microlithons correspondants que dans les faciès plus carbonatés.

Les phases déformatrices de type fragile les plus récentes doivent être identifiées avec toute une série d'importantes structures disjonctives situées en milieu crustal superficiel, représentées soit par des plans de glissement à bas angle soit par des failles subverticales surtout de type normal ou passant.

Un autre sujet important, pour le site étudié, est l'activité "néotectonique", entendue comme étude de l'évolution géodynamique récente étendue à un intervalle de temps suffisant pour situer correctement la tectonique en cours et permettre d'évaluer les taux actuels de déformation.

Les études menées ces dernières années par GIARDINO & POLINO (1996,1997) et DELA PIERRE & POLINO (1997), mettent en relief la continuité entre l'activité néotectonique et les dernières phases de la structuration fragile de la chaîne alpine reconnaissable à grande échelle sur la

base de la distribution latérale des phénomènes gravitaires et en particulier des phénomènes de lente et progressive déformation du massif rocheux (DGPV = déformations gravitaires profondes de versant) très fréquentes sur tout l'arc alpin occidental.

A ce propos, voir les Notes explicatives de la Feuille n° 153 "Bardonecchia" (op cit., 1999) "*...Des évidences structurales, stratigraphiques et morphologiques relatives à l'évolution tectonique sont concentrées le long d'une bande de plusieurs kilomètres à sens directionnel N60E qui comprend non seulement la Vallée de Suse, mais aussi la proche Val Chisone (au Sud) et sa ligne de partage des eaux. Dans cette bande, sont présentes des déformations superficielles différemment orientées et des failles subverticales à sens de direction prédominants N60E et N120E. Dans le substratum rocheux, ces failles coupent toutes les autres discontinuités structurales détectables, concernant parfois aussi les couvertures superficielles et, dans certains cas, indiquent une interaction avec le modelé érosif. Les mêmes systèmes de discontinuité fragiles plus fréquents définissent les zones de majeure concentration des dépôts quaternaires et délimitent de nombreux éboulements gravitaires. En particulier, le cisaillement parcouru par la Doire, dans l'ensemble à sens de mouvement typiquement géométrique, correspond à une succession de failles de décrochement détectées entre Suse et Oulx, Oulx et Beaulard, Beaulard et Bardonecchia. Le secteur en sénestre de la vallée est, de plus, disloqué par rapport à d'importants éléments de distension avec sens de mouvement N120E...*" (Voir Figure 4.5).

Les évidences morphostructurales de déformations superficielles sont non seulement fréquentes le long d'éléments néotectoniques de type linéaire, comme la bande d'ampleur de plusieurs kilomètres décrite plus haut, mais elles se manifestent aussi sous forme d'anomalies morphologiques (*sensu* CARRARO, 1976), surtout en ce qui concerne l'assise du réseau hydrographique et la configuration plano-altimétrique des sillons de vallée. Une de ces anomalies morphologiques a été relevée en correspondance du secteur du bassin de Bardonnèche constituée d'une zone hydrographique de type centripète où confluent des portions de lit à cours anormal, mais aussi cadre de phénomènes de déviation fluviale (indices morphologiques du Col des Acles et du défilé du Bramafan). Cette anomalie a été mise en évidence lors de la récolte d'éléments de néotectonique du territoire italien (ENEL, 1981) et a été signalée sur la Carte Géologique d'Italie (op. cit., 1999) comme secteur en forte subsidence en contraste avec le secteur le plus au Nord (entre le col du Fréjus et la Pierre Menue) avec forte surrection (Figure 4.5).

Un conditionnement éventuel sur cette anomalie pourrait avoir été exercé par l'évolution tectonique survenue le long de cisaillements subverticaux orientés selon les systèmes N20-40E et N120-140E de discontinuités structurales à l'échelle régionale, même si, dans l'état actuel des connaissances scientifiques, aucune autre évidence ne supporte cette théorie.

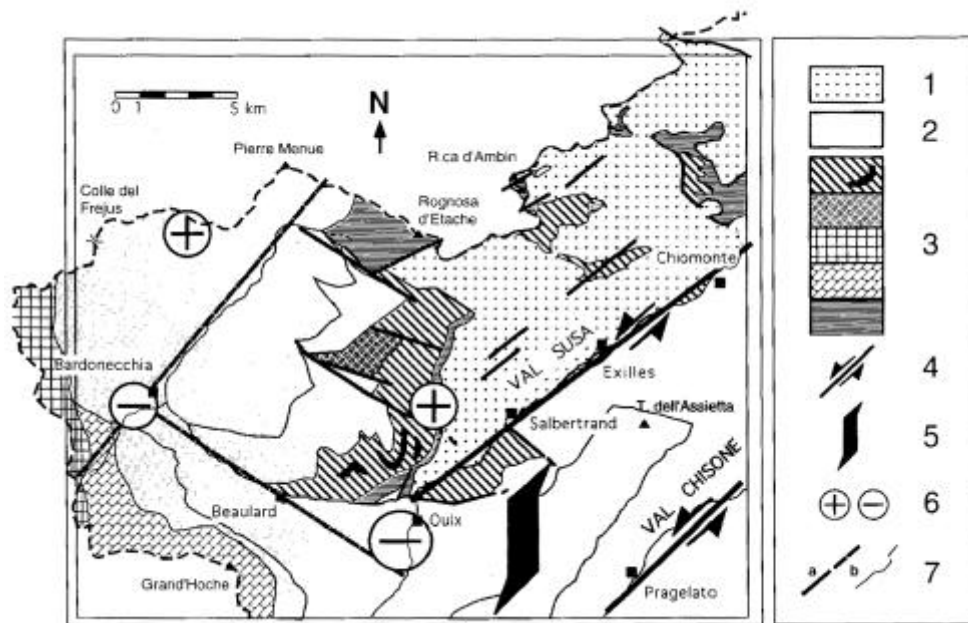


Figure 4.5 - Schéma néotectonique et principales unités litho-structurales. 1 : socle pré-triasique indifférencié; 2 : unités de calcschistes du domaine piémontais, indifférencié; 3 : unités de couverture mésozoïques carbonatées; 4 : systèmes de failles de décrochement; 5 : secteur d'extension de la Shear Zone Susa-Chisone; 6 : secteurs en forte subsidence ou surrection; 7 : a) – principales discontinuités de type fragile (certaines, présumées); b) – autres contacts géologiques

4.3 Linéaments géomorphologiques et dépôts quaternaires

Dans la littérature géologique relative aux processus exogènes, le document cartographique le plus récent sur la distribution des formations superficielles est la Feuille n° 153 "Bardonecchia" (op cit., 1999) ce document révèle la présence diffuse de dépôts quaternaires de diverses natures, surtout liés à la morphogenèse gravitaire qui se juxtapose et en partie efface les traces du modelé glaciaire pléistocène présentes dans le site.

Le paysage actuel dérive de l'interaction de plusieurs cycles d'évolution au cours desquels se sont alternés le modelé glaciaire, le modelé torrentiel et les processus liés à la dynamique gravitaire; ces cycles se sont développés de façon variable pendant les phases glaciaires et interglaciaires, se prolongeant, excepté le premier qui n'est plus actif, jusqu'à nos jours.

Durant le Quaternaire, l'entaille de la vallée de la Doire de Bardonnèche et des vallées latérales, y compris celle de Rochemolles était occupée par de grandes langues glaciaires, dont l'épaisseur pouvait atteindre, au niveau de la vallée principale, des valeurs de l'ordre de 1000 m, comme le témoigne la présence de sédiments d'origine glaciaire jusqu'à des cotes supérieures à 2500 m.

L'action érosive de la masse glaciaire en mouvement a provoqué l'apparition de fortes contraintes sur les roches encaissantes des flancs de la vallée, qui, suite à la décompression due au retrait des glaciers würmiens (survenu au début de l'Holocène), ont déterminé l'amorce de grands éboulements dans les secteurs les plus fracturés ou des situations d'instabilité suite au progressif mouvement détenseur des versants.

En correspondance de la zone de Bardonnèche, où confluaient les langues glaciaires de la Vallée Etroite, de la Vallée de Rochemolles, de la Vallée du Fréjus e de la Rho, se situaient les plus grandes épaisseurs de la masse glaciaire et donc les plus fortes sollicitations.

Le versant droit de la Vallée du Rochemolles, objet de la présente reconnaissance, est constitué d'une dorsale allongée NNE-SSW qui part de l'agglomération de Bardonecchia (cote 1312 m), pour remonter ensuite à des cotes supérieures à 3000 m (Cime du Vallon).

Le versant présente une exposition au SE et est constitué de pentes raides se raccordant au fond de la vallée par une brusque variation de pendage ; en général, il se présente complètement dénudé, avec des affleurements et/ou des sub-affleurements de substratum lithoïde calcschisteux. Sur la portion NW du versant, au-dessus de l'actuelle tête du tunnel routier, sont aussi présents de petits replats herbeux, composés de terrasses d'origine glaciaire.

Le versant gauche, en contraste avec la morphologie aride décrite précédemment, est plus doux ; à l'intérieur, les caractères géomorphologiques d'ensemble mettent en relief la présence de phénomènes déformants reductibles à une Déformation Gravitaire Profonde étendue..

Les morpho-éléments typiques de ce phénomène sont diffus, comme des dépressions allongées, des tranchées gravitaires, etc.

La présence de Déformations Gravitaires Profondes de Versant est probablement liée à l'assise géostructurale et à l'activité tectonique qui n'est pas encore terminée (selon l'interprétation proposée par les rédacteurs de la nouvelle Feuille "Bardonecchia"), dont les effets sont souvent masqués par les processus superficiels de modelage.

4.3.1 Dépôts et formes liés à l'action de la gravité

Dans ce paragraphe, nous examinerons soit les manifestations gravitaires superficielles indiquées par le terme glissement¹ soit une série de phénomènes gravitaires à l'échelle de tout le versant qui atteignent des épaisseurs de centaines de mètres et identifiées dans la littérature récente comme Déformations Gravitaires Profondes de Versant².

Dans le passé récent, ces phénomènes gravitaires n'ont pas fait l'objet d'études spécifiques; ce n'est qu'à la moitié des années '70 que les premières signalisations sont parvenues, tant dans l'arc alpin que dans l'appenninique, d'anciens mouvements ébouleux de grandes dimensions.

Ces phénomènes de grandes dimensions furent identifiés par le terme de "paléo-glissement" dont font partie tous les phénomènes montrant une perte d'identité morphologique du phénomène lui-même, tant en ce qui concerne le corps d'éboulis que pour la niche d'arrachement même.

Dans une publication de CARRARO *ET ALII* (1979), il est tenu compte de certaines de ces manifestations dans la Haute vallée de Suse, dont la genèse est imputée à l'activité néotectonique. Les facteurs diagnostiques (ci-dessous) utilisés par les auteurs pour identifier les "paléo-glissements" sont particulièrement intéressants :

- Volume étendu de la masse impliquée dans le mouvement;
- Age géologique du début du phénomène;
- Persistance par la suite des conditions d'instabilité.

Une étude régionale datant des mêmes années (RAMASCO & SUSELLA, 1978) sur l'analyse d'une série de phénomènes gravitaires dans la Haute vallée de Suse, ne signale pas la présence de phénomènes gravitaires sur le versant examiné (versant droit), tandis qu'elle indique des phénomènes gravitaires diffus sur le versant gauche de la Vallée de Rochemolles.

1 Par le terme Glissement, on désigne un phénomène de mouvement en masse sur un versant où est présente et identifiable au microscope, une surface ou zone de rupture qui sépare avec continuité la masse en mouvement de celle en place. La surface affleure le long de tout le périmètre du corps ébouleux ou peut être détectée sur la base d'éléments superficiels y étant directement liés. Il peut présenter une géométrie très complexe et peut consister en plusieurs éléments juxtaposés. L'ampleur du déplacement de la masse peut être petite ou grande selon les dimensions du phénomène.

2 Par le terme Déformations Gravitaires Profondes de Versant, on désigne un phénomène de mouvement en masse où la présence d'une éventuelle surface continue de coulissement n'est pas évidente macroscopiquement et qu'il n'est pas nécessaire de la postuler pour rendre compte des déformations observées tant en surface qu'en profondeur. L'ampleur du déplacement est petite par rapport aux dimensions du phénomène. La dimension de la masse en déformation est comparable à celle du versant concerné. Les mécanismes de déformation sont ceux qui, par leur dynamique, ne nécessitent pas de surface ou de zone de rupture continue.

Cette distribution correspond en principe aux levés géologiques effectués à l'occasion de la récente Feuille n° 153 "Bardonecchia" (op cit., 1999).

Il faut enfin signaler une récente réorganisation des données sur les phénomènes gravitaires effectuée lors des études préliminaires d'approfondissement du Plan Territorial Régional de la Vallée de Suse (2001); ce document, dont nous proposons un extrait à la Figure 4.6 reproduit sur une seule planche les connaissances précédentes sur les phénomènes déformants de la Vallée de Suse.

En ce qui concerne le site examiné, les données de base, dans ce document, se réfèrent à la cartographie numérique du Système Informatique Territorial Régional développé au sein de la Direction des Services Techniques de Prévention (Banque de données géologiques Carte des mouvements gravitaires des Hautes Vallées de Suse et du Chisone, 1990).

Les phénomènes gravitaires sont classés selon la répartition suivante:

Glissements actifs

- Effondrements actifs ou récents
- Effondrements en masse
- Glissements par érosion au pied, de récente activation
- Coulées rapides, de récente activation
- Glissements par coulissement actifs
- Glissements à évolution complexe, de type actif (mouvements translatifs associés a effondrements en masse, passants à coulée ou avalanches de roche)

Glissements sans signe d'activité

- Glissements à évolution complexe, de type "quiescent" (mouvements translatifs associés à effondrements en masse, passants à coulée ou avalanches de roche).
- Déformations gravitaires profondes de versant.
- Glissements à évolution non classée

Glissements réactivables

- Effondrements, mouvement passé
- Glissement par coulissement, sans indices de reprise au cours des trente dernières années
- Glissements en terrains incohérents

Glissements non classés

- Eboulis gravitaires (cartographiés dans la feuille "Susa" de la Carte Géologique d'Italie au 1:50.000; CARRARO & ALII., 1999).

Comme le montre la Figure 4.6, la catégorie des glissements "quiescents" (couleur jaune) correspond dans cette zone aux Déformations Gravitaires Profondes de Versant intéressant de vastes portions des versants gauches de la Vallée du Fréjus et de la Vallée de Rochemolles, avec extensions supérieures à une dizaine d'hectares jusqu'à un kilomètre carré.

4.3.2 Éléments relatifs à la dynamique fluviale et torrentielle

Le réseau hydrographique secondaire présent dans les sites montagneux (Fig 4.7) est caractérisé, en correspondance avec des précipitations élevées, par le développement de phénomènes impulsifs, pouvant activer tant des érosions au pied des versants (en compromettant la stabilité), que des phénomènes importants de transport solide (coulées détritiques ou *debris flow*). Leur danger dérive principalement des quantités énormes de matériau solide déposées et du bref intervalle de temps qui s'écoule entre l'amorçage et le tarissement (en général compris entre 10 minutes et une heure). Les principaux facteurs déterminant ces phénomènes sont:

- les dimensions réduites du bassin d'alimentation associées aux déclivités élevées des versants et des cours d'eau, qui entraînent une réponse immédiate aux apports météoriques;
- la prédisposition des versants par érosion superficielle et glissements, à fournir d'importants volumes de matériaux solides;
- le régime des précipitations, souvent caractérisé, à haute altitude, par de fortes intensités en particulier en été.

L'activité torrentielle se caractérise surtout par une capacité de transport solide très élevée, alimentée principalement par les glissements. La masse d'eau prend en charge les matériaux glissés dans le lit en augmentant ultérieurement le volume et la capacité érosive pendant la descente, avec l'enlèvement des sédiments alluvionnaires présents dans le lit et l'apport substantiel de la végétation déracinée. Dans d'autres cas, les écoulements "instantanés" sont souvent amplifiés par l'affaissement soudain de barrages temporaires dans le lit produits par des éboulis et des troncs entassés, avec restitution subite de volumes d'eau impressionnants associés à du matériau solide. Le mélange solide-liquide peut atteindre de très fortes densités (jusqu'à 20 kN/m³). La hauteur de la crue est remarquablement supérieure, surtout au front, à celle qu'on peut supposer avec les méthodes de calcul pour les crues composées de liquides seulement. En raison de ces aspects particuliers, les ouvrages de traversée projetés en suivant les méthodes hydrauliques traditionnelles, sont souvent sous-dimensionnés et entraînent l'obstruction rapide du lit avec déviation de la coulée détritique sur les sites limitrophes. Ces phénomènes souvent fréquents dans la zone sont caractérisés par des délais de développement très rapides, directement proportionnels à l'intensité et à la concentration des précipitations.

Ils peuvent survenir dans de nombreux bassins contigus lors de grands événements alluvionnaires, ou se situer dans de petits bassins lors de précipitations brèves et intenses, typiques des orages d'été.

En 1994, toute la Vallée de Susse a fait l'objet d'une étude territoriale systématique de la part de la Région Piémont (BELLARDONE & FORLATI, 1994), qui, au moyen d'analyses statistiques, a

permis de prédisposer un document complexe constitué d'une carte thématique montrant les déséquilibres des principaux cours d'eau, indiqués plus bas par le sigle ID.

Ce document, qui prend en compte le cadre de connaissances des événements précédents analysés en termes de distinction typologique, de mécanismes évolutifs, de fréquence et de distribution spatiale, représente un outil indispensable pour affronter le problème du risque géologique. Les graves dommages récurrents provoqués par les phénomènes alluvionnaires de ces dernières années peuvent avoir fait surgir la conviction que les crues désastreuses des cours d'eau sont devenues plus fréquentes que par le passé. Sur la base de l'expérience acquise et de l'analyse des données héritées, il faut répéter que cette affirmation n'est pas justifiée et que l'augmentation de l'ampleur des dommages enregistrés ramène principalement aux facteurs de déséquilibre introduits par l'homme, tant dans les bassins de montagne que le long des cours d'eau en plaine.

Lorsque des dommages récurrents surviennent dans un même lieu, c'est le signe évident qu'il y a persistance d'une «conflictualité» entre l'évolution d'un processus naturel et l'usage du territoire.

L'évaluation des situations de déséquilibre, effectuée à partir de l'analyse des probabilités des séries historiques, se réfère à deux approches différentes :

1. analyse des causes, entendue comme corrélation entre l'événement et les facteurs déclencheurs (pluies)
2. analyse des effets., ou examen des séries temporelles des effets provoqués par les processus torrentiels, des dégâts (dus à l'activité fluviale et torrentielle) causés aux centres habités. Sur la base de ces données, à chaque cours d'eau, on a attribué un indice quantitatif appelé ID (Indice de Déséquilibre) déterminé par des analyses statistiques approfondies.

Cette approche permet de fixer l'attention sur les situations où se sont vérifiés des dégâts récents et d'évaluer en même temps les événements précédents. La coupe de la cartographie de la Figure 4.8 indique, pour chaque localité et chaque cours d'eau intéressé, le type de processus prédominant (forme du symbole), la gravité des dégâts (fond) et la fréquence des événements.

L'Indice de Déséquilibre ID³ se réfère aux cours d'eau pour lesquels on est au courant d'au moins cinq événements au cours des cent dernières années, là où sa valeur est directement

³ L'indice de déséquilibre du bassin se base sur la formule suivante:

$$ID = T/r * K * 1 / (Ta - Tu)$$

Où

ID = Indice de Déséquilibre

T = Ampleur de la série historique

R = récurrence des événements

K = facteur de corrélation

Ta = Date admise comme actuelle / 5/1994

Tu = Date du dernier événement

proportionnelle à l'ampleur de la série historique (ou, en d'autres termes, "garde la mémoire" de toute la série historique), inversement proportionnelle à la récurrence (entendue comme intervalle moyen, entre un événement qui a causé des dégâts et le suivant) et à l'intervalle de temps existant entre le dernier événement ayant provoqué des dégâts et la date de référence.

La Figure 4.8 montre une série extraite de la cartographie produite par BELLARDONE & FORLATI (op. cit.) indiquant la zone examinée ; on observe que l'analyse statistique a été effectuée sur des domaines échantillons comprenant plusieurs bassins hydrographiques délimités en fonction de la distribution spatio-temporelle des événements et de la connaissance du territoire.

Comme le montre la Figure 4.9, dans le haut bassin de la vallée de la Doire de Bardonnèche, dont fait partie le bassin du Torrent de Rochemolles, les égouts collecteurs qui confluent dans la vaste cuve de Bardonnèche présentent un indice de déséquilibre variable entre un maximum de 11,48 (Vallée Etroite) et un minimum de 0.93 (Ruisseau des Sagne), où tous les bassins présentent un Test de Student (Ts) positif ; en particulier, l'étude statistique attribuée au cours d'eau du Torrent Rochemolles une valeur de ID correspondant à 9,77.

5. ASSISE GEOLOGIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE DU SITE ETUDIE

5.1 Unités litho-stratigraphiques du substratum

Comme l'illustre le plan 69P du site étudié, les affleurements du substratum rocheux sont tous étendus le long du versant droit, en correspondance du talus droit de la vallée du Rochemolles, et entre la tête du tunnel ferroviaire et celle du tunnel. Le substratum rocheux du Complexe du Lago Nero, est constitué de calcschistes carbonatés à patine d'altération ocre, riches en ankerite, affleurants en bancs massifs d'épaisseur métrique avec immersion moyenne vers 300N de pente modérée (25° -35°). Les discontinuités structurales sont fréquentes, orientées différemment, avec des bandes de brèches de friction, dont certaines contiennent des ruissellements concentrés sous forme de couloirs raides (Planche 84P – Photo 2).

Le lithotype le plus diffus est représenté par des calcschistes constitués d'alternances de lits de marbre, de calcmicaschistes et de portions phylladiques subordonnées. Les surfaces de foliation partagent en moyenne la roche en couches d'épaisseur centimétrique-décimétrique, avec des domaines subordonnés caractérisés par une schistosité pervasive et un espacement de l'ordre millimétrique. Dans cette classe, ont aussi été incluses les portions de substratum qui, tout en étant caractérisées par une foliation pervasive, sont peu fissiles et se fracturent en lits d'épaisseur centimétrique. La roche présente une texture plano-schisteuse en correspondance surtout des lits de plus grande épaisseur tandis que, dans les domaines plus fissiles, le clivage prend fréquemment une allure ondulée à cause de la présence de structures en "*boudin*" où l'on recense des restes de couches plus compétents.

5.2 Unités litho-stratigraphiques de la couverture

Les Unités lithologiques de couverture, recouvrant la quasi totalité du site en question, sont représentées en majeure partie par le détritico-colluvial, tandis qu'une partie minime contient en ordre décroissant les sédiments détritiques, les sédiments d'origine glaciaire, les sédiments alluvionnaires et ceux d'origine gravitaire (plan 69P).

La couverture détritico-colluviale est très diffuse sur le versant gauche, mélangée à du matériau d'éboulis de glissement et de sédiments glaciaires dont elle ne se distingue pas toujours par manque d'affleurements.

Dans le faciès le plus répandu, les dépôts détritico-colluviaux sont constitués par une matrice limo-sableuse, de couleur variant du gris au beige, dans laquelle sont immergées des clastes de calcschistes, de centimétriques à décimétriques, anguleuses et subarrondies. Les clastes, de forme tabulaire ou prismatique, sont disposées de façon chaotique et/ou imbriquées avec structure *open-work*.

Localement, à l'intérieur des couvertures détritico-colluviales, on reconnaît des poches à galets de nature polygénique en partie arrondis, interprétables comme le produit du remaniement de sédiments d'origine glaciaire préexistants.

A la base des talus raides constituant le versant droit de la vallée du Rochemolles, on a observé des plaques diffuses d'éboulis de nappe se présentant comme un dépôt localement organisé en conoïdes ou prismes appliqués sur le versant, d'épaisseur parfois considérable.

D'un point de vue lithologique, ils sont composés de dépôts à structure de type *open work* et *partially open work*, avec des clastes et des blocs anguleux emballés dans une faible matrice fine.

Ces dépôts masquent des sédiments d'origine glaciaire situés dans le fond de la vallée, s'y superposant comme c'est le cas pour le lambeau conservé à proximité de la tête du Tunnel routier.

5.2.1 Sédiments et formes liées à la glaciation

Les sédiments glaciaires du site examiné constituent une série de lambeaux résiduels correspondant à un cordon initialement morainique latéral du grand glacier qui descendait de la vallée de Rochemolles, au Pléistocène.

Les deux principaux lambeaux résiduels (cfr. Photo 5.1 et plan 84P) se situent aux abords de la tête du tunnel routier et sont séparés par une portion triangulaire rocheuse dans laquelle s'écoule un drainage à caractère saisonnier ; les deux lambeaux se développent altimétriquement jusqu'à la cote maximum de 1424 m s.l.m. et se raccordent bien altimétriquement au lambeau résiduel placé en amont du gros éboulis de remblai situé au NE. Du point de vue lithologique, les sédiments glaciaires (Photo 5.2) correspondent au *diamicton* massif à clastes arrondies ou subarrondies, lisses et parfois striées du complexe des bassins tributaires selon la classification de la nouvelle Carte Géologique d'Italie au 1:50.000 (POLINO, 1999)

Selon la description de Peretti, dans son dossier géologique de 1968 (SITAF, 1968), ces sédiments seraient constitués d'éléments plurimétriques formés de "*blocs, galets, graviers et sables à faible fraction limeuse, semi-cohérents et généralement non cimentés*".



Photo 5.1 – Lambeaux résiduels du cordon morainique dextre appartenant au glacier du Pléistocène.



Photo 5.2 – Affleurement de sédiments glaciaires situé en senestre hydrographique le long de la route communale de Bardonnèche.

5.2.2 Sédiments et formes liés à l'action de la gravité

Sur le versant droit de la vallée du Torrent Rochemolles, au droit du talus en amont du site examiné, on a recensé une série de phénomènes déformants superficiels selon une étude photo-interprétative et de quelques inspections de terrain ; ces phénomènes déformants ont impliqué par le passé les couvertures quaternaires avec des phénomènes de rotation qui ont évolué ensuite en coulées détritiques, comme on l'avait observé lors du vol photographique aérien de 1979 de la Région Piémont (cfr. Photo 5.3 et plan 84P).

On signale aussi sur le versant gauche de la vallée du Torrent Rochemolles, dans la portion située plus au Nord par rapport au site directement concerné par la future tête de la galerie de sécurité, la présence d'un mouvement gravitaire impliquant non seulement la couverture superficielle du dessus mais aussi une portion de la partie superficielle du massif rocheux intensément fracturé. Le phénomène gravitaire en question est cartographié dans les documents officiels de la Banque de données géologique de la Région Piémont, comme nous l'avons signalé précédemment, dans le § 4.3.1

D'autres phénomènes gravitaires plus amples se manifestent sur le versant droit de la vallée du ruisseau Rochemolles compris entre la Combe Challier et l'agglomération de Rochemolles. Le versant est caractérisé par la présence d'une série d'évidences morphologiques reductibles à une grande Déformation Gravitaire Profonde de Versant (DGPV) (cfr. Photos 5.4 et 5.5 avec le plan 84P).

Le même type de phénomène s'observe sur la base photo-interprétative, sur le versant gauche de la vallée du Fréjus jusqu'au vieux bourg de Bardonnèche, comme le montre la Figure 4.6; les principaux éléments morphologiques et structuraux liés à la gravité présentent généralement des orientations coïncidant avec les principaux systèmes de discontinuité tectonique à l'échelle régionale à directions prédominantes N360, N60 e N100.



Photo 5.3 – Talus du versant droit hydrographique constitué surtout de sédiments d'origine glaciaire concernés par des phénomènes de déformation; 1) principales niches de glissement.



Photo 5.4 – Phénomène de glissement de rotation, avec mur de soutènement à la base (Vallée de Rochemolles, versant gauche).



Foto 5.5 – Autre vue en perspective du phénomène de glissement en rotation situé sur le versant gauche du Torrent Rochemolles: d'ici, on voit bien la niche de glissement jetée en sédiments glaciaires (A) et le corps d'éboulis (B).

5.2.3 Sédiments et formes liés à l'écoulement des eaux superficielles

Le drainage principal étudié est représenté par le Torrent Rochemolles qui conflue dans le grand bassin de Bardonnèche, avec le Ruisseau de la Vallée Etroite et de celui de la Vallée de Fréjus, pour former le Torrent de la Doire de Bardonnèche. Ce bassin, comme nous le décrivons dans le § 4.2, est caractérisé par une hydrographie à forme centripète, représentant une anomalie morphologique interprétée comme un secteur en forte subsidence en contraste avec le secteur du haut bassin du Rochemolles et du Fréjus.

Du point de vue hydrographique, la vallée de Rochemolles est caractérisée par une section très variable sur tout son parcours d'environ 14,5 km, avec une inclinaison moyenne de 14% qui diminue vers la fin d'une valeur de 6% (données tirées de PERETTI, 1974); en sa partie médiane, se trouve la Digue du Fréjus, située à la cote 1981 m s.l.m., alors que dans la partie terminale, l'actuel lit du Torrent Rochemolles est localement confiné par les remblais de marin provenant du creusement des tunnels ferroviaire et routier du Fréjus.

Comme le montre la Figure 4.7, le bassin du Torrent Rochemolles présente une direction SW-NE, assise sur deux versants asymétriques : celui de droite est raide et peu développé, celui de gauche a une pente plus faible et se distingue par un drainage peu organisé subparallèle.

Dans sa partie finale, le Torrent Rochemolles (Photo 5.6), avant de confluer dans la cuve de Bardonnèche, coule dans un lit étroit contenu sur la gauche par le remblai haut de 10 à 25 m et bordé sur son versant gauche par le grand éboulis où se trouve maintenant la plate-forme de la tête du tunnel routier du Fréjus. Plus en amont, le lit du Torrent Rochemolles est longé par des endiguements artificiels sur un tronçon d'environ 600 m avec cailloutis et panneaux préfabriqués en béton armé, puis, dans le secteur du fond de la vallée, large d'environ cent mètres, il n'est plus encaissé.

Sur la Carte géologique et géomorphologique du site de tête côté Italie (plan 69P) sont relevés indistinctement les sédiments alluvionnaires concernant le lit actuel du Torrent Rochemolles et ceux du drainage actif à l'époque historique, contrairement à ce qui est représenté dans les 3 profils géologiques et techniques (plans 70P, 71P e 72P); les raisons de ce choix sont dues à la volonté de mettre en évidence, dans les profils, les rapports géométriques et d'intersection que les différentes unités rencontrées présentent au droit du site examiné.



Photo 5.6 – Vue panoramique de haut de la partie terminale du bassin du Torrent Rochemolles: à droite, au premier plan, on voit l'éboulis du remblai du creusement du tunnel routier, au second plan, le secteur de la tête du tunnel routier du Fréjus.

Les sédiments alluvionnaires sont constitués surtout de clastes pluri-métriques, polygéniques, anguleuses ou subarrondies, mélangées à une matrice sablo-graveleuse de coloration principalement grise due à la prédominance lithologique des calcschistes.

Les lignes de drainage secondaire, caractérisées par un profil tendu et rectiligne à forte pente, sont en général en phase d'intense et rapide approfondissement, évidente surtout dans le secteur inférieur du versant, où les cours d'eau coulent entre des lits encaissés délimités par des talus de dénudation de hauteur de l'ordre d'une dizaine de mètres. Localement, aux abords du site de tête du tunnel routier du Fréjus, se trouve une série d'ouvrages de régulation hydraulique dans un ruisseau éphémère situé en amont, constitués de revêtements de gabions et d'endigements en béton armé. (Photos 5.7 et 5.8).

5.3 Dynamique des cours d'eau

Le drainage du Torrent Rochemolles est caractérisé par une activité torrentielle à charriage solide abondant et intense érosion. Selon la documentation héritée, la période entre 1749 et 2002 a connu entre 6 et 10 cas de violente activité torrentielle.

Le charriage des dépôts de matériau grossier dans le lit du Torrent Rochemolles est aussi alimenté par une série de petits ruisseaux sujets à une capacité d'érosion et de charriage solide élevée. L'activité de ces derniers touche surtout la couverture détritico-colluviale ainsi que de vastes portions de substratum dégradé, transportant jusqu'au pied du versant principal d'importants volumes d'éboulis ; dans ces portions de fond de vallée, situées à peu près entre 1280 et 1400 m d'altitude sur le site examiné, une série de conoïdes mixtes récents et actifs est évidente. Cette donnée est confirmée par les données contenues dans la Banque de données géologique de la Région Piémont qui signale la présence diffuse de conoïdes actifs en amont du ruisseau Valfroide.

Dans le secteur compris entre les têtes des tunnels ferroviaire et routier du Fréjus, on observe une série d'entailles mineures (dont certaines ne sont même pas indiquées sur la Carte Technique Régionale) caractérisées par un débit éphémère : elles peuvent toutefois convoyer d'importants volumes liquides et solides lors de précipitations particulièrement intenses (Photos 5.7 et 5.8).



Photo 5.7 – Endiguement du ruisseau éphémère situé en amont de la tête du Tunnel routier du Fréjus: A) Gabions de protection du flanc gauche au droit d'un brusque détour du ruisseau.



Photo 5.8 – Détail des gabions de protection du flanc gauche du ruisseau éphémère (A sur la Photo 5.7) situé en amont de la tête du Tunnel routier du Fréjus

Selon la documentation historique des dégâts alluvionnaires infligés à la Vallée du Rochemolles, réunie par l'Institut de Recherche pour la Protection Hydro-géologique – Section de Turin (CNR-IRPI Torino; LOLLINO, 2002 - cfr. par. 5.3.1), le Torrent de Rochemolles a connu par le passé une série d'événements alluvionnaires de type torrentiel. Les principaux événements sont ceux du 24 septembre 1920 avec endommagements des ouvrages de traversée et des berges aux abords de la localité Difensiva du Tunnel ferroviaire du Fréjus ; celui du 26 septembre 1947 causa des dégâts le long de la route communale Bardonnèche - Rochemolles sur un tronçon de 1000 m env., de même que la crue du 3 mai 1949 endommagea à nouveau cette même route Bardonnèche -Rochemolles. Lors des événements exceptionnels des 13-14 juin 1957, le pont de la localité Difensiva fut détruit, et les murs de soutènement de la route communale Bardonnèche -Rochemolles subirent encore des dégâts. A partir des alluvions du 5 mai 1961, le lit du Torrent de Rochemolles au droit de l'agglomération de Bardonnèche, s'approfondit sensiblement, produisant de profondes érosions sur les berges gauche et droite.

Des phénomènes d'érosion en profondeur sont aussi signalés lors des inondations d'Octobre 2000 (TROPEANO, 2000), au cours desquelles on enregistre légèrement en amont du pont de Bardonnèche des phénomènes diffus d'érosion des berges à la gauche hydrographique du Torrent Rochemolles, ainsi que des phénomènes de grands éboulis alluvionnaires en plaine, plus en amont du site de tête du Tunnel routier du Fréjus (cfr. Photos 5.9 / 5.16 avec Planche 85P).



Photo 5.9 – Sédiments alluvionnaires dus aux événements alluvionnaires d'octobre 2000 (zone en amont de la tête du Tunnel routier du Fréjus).



Photo 5.10 - Sédiments alluvionnaires dus aux événements alluvionnaires d'octobre 2000 (zone en amont de la tête du Tunnel routier du Fréjus).



Photo 5.11 – Accumulations détritiques de l'événement alluvionnaire d'octobre 2000.



Photo 5.12 - Cordon d'accumulations détritiques alluvionnaire datant de l'événement alluvionnaire d'octobre 2000.



Photo 5.13 - Intense érosion avec approfondissement du lit en aval d'un seuil.



Photo 5.14 - Activité de l'érosion aux abords de la tête du Tunnel routier du Fréjus.



Photo 5.15 - Lit du T. Rochemolles près du dépôt de remblai du creusement du Tunnel routier du Fréjus.



Photo 5.16 – Lit du T. Rochemolles près du Tunnel ferroviaire du Fréjus: le matin du 15 octobre 2000, le Torrent Rochemolles atteint de près les bouches d'aération (photo Nimbus 2001).

Comme on peut le voir à la Planche 69P, on a reconstruit la tendance évolutive du lit du Torrent Rochemolles à partir de 1934 en comparant les différents documents cartographiques historiques trouvés ; les documents suivants ont été examinés:

- Carte Topographique d'Italie au 1:25.000, Feuille 54 - II SO Beaulard. Levés de 1934, avec reconnaissances de 1964
- Levé topographique du site de tête côté Italie du projet de réalisation du Tunnel routier actuel, de 1973
- Carte Technique Régionale (CTR) au 1:10.000. Restitution aérophotogrammétrique des prises de vue de 1991

Les tracés des lits concernant ces documents cartographiques sont reproduits sur la Planche en annexe ; on peut en déduire que:

- Le tracé du lit du Torrent Rochemolles présentait, en 1934, un axe de type à un seul cours avec une allure plus sinueuse que l'actuel, concernant tout le fond alluvionnaire de la vallée, en particulier, le tracé passait en partie sur l'actuel remblai de marinage du Tunnel routier, tandis qu'il était semblable dans la zone de la plate-forme de tête côté Italie, confiné d'un côté par le talus rocheux raide et de l'autre par le remblai de déblai provenant de l'activité d'excavation du tunnel ferroviaire.
- Le tracé du lit cartographié lors du levé de 1973, pour la partie visible, est plus déplacé au Nord par rapport au tracé cartographié en 1934, au droit de l'actuelle usine de ventilation.
- Le tracé du lit cartographié en 1991 par la CTR est profondément modifié par les interventions anthropiques suite à la réalisation du Tunnel routier du Fréjus et de ses remblais de marinage situés sur le versant droit et sur le versant gauche (Photos 4, 7 et 8 Planche 84P).

Selon les relevés de terrain résumés sur la Planche Tavola 85P, on peut observer que la tendance évolutive actuelle du *talweg* du Torrent est caractérisée par d'intenses phénomènes d'érosion le long du tracé endigué aux abords du site de tête du Tunnel routier du Fréjus, avec approfondissement du fond du lit, affouillement à la base des ouvrages de protection des berges et sous-excavation en aval des seuils. Lors de l'événement alluvionnaire d'octobre 2000, on a enregistré d'importants apports détritiques alluvionnaires en correspondance d'une zone d'expansion située plus en amont, avec réactivation de l'ancienne ligne droite de débit reconnue dans la cartographie de 1934.

Ces observations, comparées avec la documentation historique sur les crues du Torrent Rochemolles (cf. par. 5.3.1) et la déformation des versants de la vallée amènent à penser qu'il ne faut pas négliger le risque élevé de charriage solide de matériau en cas d'événements météoriques extrêmes, avec augmentation possible de l'apport torrentiel en matériau solide due à l'activité gravitaire et aux avalanches.

5.3.1 Historique des événements de crue survenus dans le bassin du Rochemolles

6 février 1749 – “Copie de Verbal, et état estimatif des pertes et dommages soufferts, par les habitants de la Communauté de Rochemolles à l’occasion de la coulée de neige sur le Village le 6 février 1749... le sixième du courant mois de février sur les huit heures du soir, une coulée de neige, ou soit avalanche partie du haut de la montagne dite le Vallon, est tombée sur la partie du Couchant du Village dudit Rochemolles, et par la chute, et l’impétuosité du vent, ou souffle qu’elle a causé, elle a abattu, et entraîné environ trente Bâtiments... Et de suite nous étant... portés au haut de la partie du Village dont les Bâtiments ont été ruinés, et ayant parcouru, et fait le tour de ceux-ci, nous avons observé qu’ils ont été véritablement ...avoir fait les pertes en mobilières...” (Commune de Bardonecchia, Archive Historique, Section Rochemolles, Feuilles 2, Fasc. 12).

24 septembre 1920 – “Tous les courants qui se déversent et se rejoignent à Bardonecchia, ont pris, suite aux pluies torrentielles de la semaine dernière, un aspect de flots turbides et impétueux, arrachant dans leur fureur les arbres, les blocs de pierres, la boue alimentée par les corrosions des rives tourmentées et des terrains cultivés proches. Mais cette fois le triste record ne va pas au torrent de la Rho, dont la crue à d’autres époques a submergé une large et fertile zone... où s’élève maintenant un groupe d’immeubles... Ce sont les eaux du Rochemolles qui... se sont précipitées sur Bardonecchia. Le pont de bois et le mur en face de la caserne de défense du tunnel du Fréjus furent, à Bardonecchia, les premières victimes; puis les eaux, creusant la base de la haute et grande esplanade formée par les pierres extraites du tunnel, poussèrent une grande partie de ce matériau dans le lit du torrent, en élevant le fond de plus de deux mètres de façon à... se précipiter à moitié sur la route adjacente et à envahir la ville... le courant principal... déracinait quelques arbres ...plus loin... détruisait le lavoir public... Les habitants du village et les soldats improvisèrent la plus urgente défense avec des troncs d’arbre, des sacs de terre et des sacs de pierres ...? (*Gazzetta del Popolo*, 1920). “Mémoire [joint au Procès-verbal de délibération du 25 février 1922] [signé par le géomètre Enzo Torricelli] sur les dommages causés par l’inondation du 23 septembre 1920 à la route de Bardonecchia à Rochemolles, et aux chemins muletiers qui, de Rochemolles, mènent aux champs et aux pâturages de haute montagne... 1° de la route Bardonecchia – Rochemolles, il ne reste que quelques tronçons, le reste ayant été emporté par les eaux. Des 4200 mètres qu’il reste encore à reconstruire, on ne peut donner un calcul exact des dégâts... pour la partie la plus proche du village, il n’y a pas de difficultés car la vallée est large..., la partie centrale du parcours, en correspondance du hameau d’Issart, vu la conformation de la gorge qui à cet endroit se rétrécit, il faudra faire des travaux de discrète.... ... 2° Reconstruire le pont dit de la Difensiva à travers le Torrent Rochemolles... 3° Reconstruire le pont à travers le Torrent Rochemolles au droit du hameau d’Issart... 4° Reconstruire le pont à travers le Torrent Rochemolles près des Granfie du Fond... 5° Reconstruire le pont à travers le Torrent Rochemolles près des Granges Chatelan... 6° Reconstruire le pont à travers le Torrent.

Rochemolles dans la zone Marina... 7° Reconstruire un morceau de mur à sec de soutènement sur une longueur de 30 m... 8° Reconstruire... la route entre les Granges du Fond et les Granges du Plan... 9° Reconstruire... sur une longueur de 80 m un autre morceau de route... 10° Reconstruire le pont à travers le T. Rochemolles au droit des Granges Plan... 11° Reconstruire le pont à travers le Torrent Rochemolles pour l'accès du Plan aux prés et pâturages du côté de Pres Fouran... 12° Reconstruire le pont Sellarce sur le T. Rochemolles sur la route de Rochemolles aux Granges du Plan... 13° Reconstruire un morceau de 60 m de mur de soutènement à sec de la route de Rochemolles au Plan immédiatement en aval du pont Selarse... 14° Reconstruire le pont Sellarec sur le T. Almiane... 15° Reconstruire avec déblai de matériau graveleux... ml 200 de route de Rochemolles aux Granges Chaux... 16° Reconstruire ... ml 100 de la route de Rochemolles aux Granges Chaux... 17° Reconstruire le pont sur le T. Almiane... 18° Reconstruire le pont à travers le Torrent Almiane en amont des Granges Chaux... 19° Reconstruire le pont à travers le Torrent Valfroid... pour l'accès aux pâturages du Plan du Hameau Mouchecuite... 20° Restaurer le lit du torrent du Four qui traverse le village de Rochemolles... 21° Reconstruire le pont à travers le Torrent Rochemolles juste en amont du village... 22° Reconstruire le pont sur le T. Rochemolles en face du village... 23° Reconstruire le pont de la Pierre à travers le Torrent Rochemolles à m 200 environ en aval du village... 24° Reconstruire le pont près de Rouchasson à travers le T. Rochemolles... 25° Réparer les dégâts sur le chemin muletier qui, de Rochemolles, va aux pâturages et aux Granges du Grand Vallon..." (Commune de Bardonecchia, Archive Historique, Section Bardonecchia, F. 44, cart. 3).

3 avril 1936 – “Un éboulement a eu lieu à 800 m en amont du hameau Rochemolles. Il s'agit d'un phénomène de dimensions considérables, survenu dans un vallon en droite orographique du torrent Rochemolles, avec remplissage du lit du torrent sur plus de 600 m et d'une épaisseur allant parfois jusqu'à 20 m. Le matériau, s'il était ultérieurement fluidifié par d'autres crues, pourrait provoquer des dommages au quartier de Borgonuovo de Bardonecchia et aux installations ferroviaires s'y trouvant. Le village de Rochemolles étant surélevé par rapport au torrent ne devrait pas courir de danger, à moins d'une déviation du torrent provoquée éventuellement par l'éboulis” (Corps Royal du Génie Civil, Turin, Prot. N. 2648/1 du 22 avril 1936).

26 septembre 1947 – Un événement alluvionnaire, dans la Commune de Bardonecchia, a détruit six petits ponts de bois et endommagé deux autres dans le hameau Rochemolles. La route communale Bardonecchia-Rochemolles a été endommagée sur un tronçon d'environ 1000 m, avec des interruptions occasionnelles. “Suite aux érosions des fondations, le pont de bois sur le ruisseau du Pissat, ainsi que ses culées en maçonnerie, sont croulants ” (luce 8 m) (Commune de Bardonecchia, Archive Historique, Prot. N. 2987 du 18 novembre 1947; *Rapport sur les dommages...*, 19 octobre 1947).

2-3 mai 1949 – “Le torrent Rochemolles en crue a provoqué un éboulement près de la Difensiva, avec interruption de la route communale pour Rochemolles”. La crue du T. Rochemolles a entraîné l’écroulement du mur d’enceinte du cimetière sur 10 ml [et l’éboulement de 50 m de la route Bardonecchia-Rochemolles, entre la Difensiva et le hameau Issare” (Commune de Bardonecchia, Archive Historique, Prot. N. 1197, 9 mai 1949).

13-14 juin 1957 – “Rapport technique et description des dégâts provoqués par les inondations du 13 juin 1957 dans la Commune de Bardonecchia... Dans le chef-lieu, le torrent Rochemolles a emporté le terre-plein de raccordement entre la via Susa et le pont de la via Torino, contournant celui-ci..., il a aussi érodé les appuis du pont en fer sur la route Bardonecchia-Rochemolles... provoquant l’écroulement d’une culée, et par conséquent de l’extrémité du pont sur le fond ... Le torrent a érodé l’endiguement de protection Via Susa sur une longueur de 100 m env.... Les sentiers muletiers d’accès aux propriétés communales et privées ont été interrompus à plusieurs endroits, surtout au croisement avec les torrents ou dans les zones de’éboulement, où les ponts se sont écroulés et le plan routier s’est effondré ...” (Commune de Bardonecchia, Archive Historique, Section Bardonecchia, F. 443, cart. 3).

31 juillet 1967 – Une tempête cause le “soudain gonflement [du] Torrent Rochemolles, entraînant une forte corrosion sur la berge gauche immédiatement en aval du pont d’accès au hameau de Rochemolles”. L’accès au hameau en est compromis (Télégramme du Maire de Bardonecchia au Génie Civil, Torino, 2 août 1967).

6. CARACTERISATION GEOLOGIQUE ET TECHNIQUE DU SITE DE TETE

6.1 Caractères généraux

La caractérisation des terrains affleurants ou concernés par les ouvrages a été définie sur la base des données obtenues par les levés de terrain et les reconnaissances géognostiques. Les différentes unités lithologico-stratigraphiques, définies dans les chapitres précédents, ont été interprétées d'un point de vue géologique et technique selon les principaux caractères physiques pouvant fournir des indications significatives pour le comportement mécanique des terrains, détectables directement sur les affleurements et dans les sondages.

Dans les profils géologiques-techniques des plans 70P, 71P e 72P la représentation analytique des *logs* stratigraphiques des verticales examinées permet toujours de vérifier les données disponibles et les critères sur lesquels ont été basées les corrélations entre les différents points. Le cadre complet des reconnaissances géognostiques utilisées pour la Rédaction du Projet préliminaire est contenu dans le mémoire technique 23R, leur emplacement est indiqué sur la *Carte Géologique et Géomorphologique du site environnant la tête côté Italie* (plan 69P).

Pour garantir un détail ponctuel et une analyse du sous-sol étudié, on a réalisé 3 profils géologiques techniques du site de tête et du fond de vallée environnant, au moyen d'un état technique au 1:200. L'emploi de symboles graphiques spécifiquement définis permet de représenter presque complètement, les essais in situ effectués et une partie des résultats obtenus (sondages à carottage continu, essais SPT et piézométriques).

6.2 Cadre interprétatif des reconnaissances géognostiques

Le cadre global de la campagne géognostique menée lors du Projet Préliminaire de réalisation de la galerie de sécurité de l'actuel tunnel routier du Fréjus aux abords de la tête côté Italie a été obtenu par la réalisation de 5 sondages à carottage continu (BH1, BH2, BH3, BH4 e BH5) jusqu'à une profondeur maximum de 40.0 m du p.c., aux abords de la centrale de ventilation (état technique 23R).

La campagne de reconnaissances géognostique a été faite pour vérifier l'évolution de la surface de contact entre les matériaux appartenant aux dépôts de couverture (sédiments détritiques-colluviaux, sédiments glaciaires et fluvio-glaciaires, sédiments alluvionnaires) et le substratum rocheux, ainsi que des épaisseurs des matériaux de remblai, et pour définir les principaux paramètres de composition et de texture des lithologies présentes.

Lors de la réalisation de la campagne, 4 tubes piézométriques ont été installés, à l'intérieur d'autant de sondages afin d'entreprendre une série de campagnes de lectures sur l'évolution de la nappe du fond de vallée .

Le Tableau 1 présente les principales caractéristiques de l'investigation géognostique de 2002.

Type de sondage	Sigle	Profondeur	Equipement et essais effectués	Campagne
Sondage à carottage continu	BH 1	40 m	piézomètre SPT	Musi Net 2002
Sondage à carottage continu	BH 2	40 m	piézomètre SPT	Musi Net 2002
Sondage à carottage continu	BH 3	40 m	piézomètre SPT	Musi Net 2002
Sondage à carottage continu	BH 4	40 m	SPT	Musi Net 2002
Sondage à carottage continu	BH 5	30 m	piézomètre SPT	Musi Net 2002

Tableau 1 - Caractéristiques des reconnaissances géognostiques menées aux abords de la tête côté Italie du Tunnel routier du Fréjus.

De plus, on a repéré les stratigraphies des anciennes campagnes géognostiques réalisées à l'époque par la société SITAF pour le Projet de réalisation de l'actuel Tunnel routier (Campagnes SITAF 1966 et 1973); ces reconnaissances géognostiques sont rapportées dans les états techniques afin d'enrichir le cadre géologique du sous-sol du site examiné. Précisons que la cote et l'interprétation de ces données est donnée à titre indicatif, puisque nous n'avons observé que la description des stratigraphies sur papier et leur cote sommaire.

Le Tableau 2 récapitule les principales caractéristiques des reconnaissances géognostiques de la campagne SITAF de 1966 et 1973.

Type de sondage	Sigle	Profondeur	Campagne
Sondage à carottage continu	S1	42,40 m	SITAF 1966
Sondage à carottage continu	S2	15,50 m	SITAF 1966
Sondage à carottage continu	S3	15 m	SITAF 1966
Sondage à carottage continu	S4	15,20 m	SITAF 1966
Sondage à carottage continu	S5	15,30 m	SITAF 1966
Sondage à carottage continu	S6	30 m	SITAF 1966
Sondage à carottage continu	S7	15,20 m	SITAF 1966
Sondage à carottage continu	CS1	52 m	SITAF 1973
Sondage à carottage continu	CS2	55,50 m	SITAF 1973
Sondage à carottage continu	CS3	64,90 m	SITAF 1973

Tableau 2 - Caractéristiques des reconnaissances géognostiques des anciennes campagnes SITAF.

6.3 Unités géologiques et techniques

A partir du plan campagne vers le bas, les unités principales suivantes, relatives aux couvertures superficielles et au substratum lithoïde, ont été recensées:

6.3.1 Unités R

Terrains rapportés provenant des éboulis principaux actuels au droit des remblais d'excavation du Tunnel routier et du tunnel ferroviaire, remaniement de la surface topographique suite à la réalisation des ouvrages à la tête du tunnel routier. On y distingue :

Unité R1: Cette Unité (relative au remaniement de la surface topographique) se répartit sur les deux versants du Torrent Rochemolles à proximité de la tête du Tunnel routier. Elle se compose lithologiquement de graviers en général hectométriques et polygéniques, de forme subangulaire à subarrondie, immergés en matrice sablo-limoneuse de couleur gris-marron. L'Unité **R1** est difficile à délimiter vers le bas en correspondance du passage aux unités sous-jacentes, la composition de celles-ci étant presque la même ; un élément de diagnostic pour les distinguer est le degré d'accumulation. En effet, si les autres unités présentent un degré d'accumulation de moyen à élevé, l'Unité **R1** se caractérise par un degré d'accumulation bas. Cette unité se rencontre dans tous les sondages effectués sur le versant droit du Torrent Rochemolles au cours de la campagne 2002, sauf dans le sondage BH2 ; l'épaisseur moyenne de ce remaniement s'évalue à 4-5 m (BH1, BH5, BH4). Sur le versant gauche, en correspondance du sondage BH3, l'épaisseur du remaniement n'est que d'1 m s'appuyant directement sur des sédiments glaciaires indifférenciés (Unité **dg**). En général, la valeur N_{sp} est comprise entre 18 coups / 30 cm et Déchet, cette dernière valeur, fortement prédominante, précise la grosse hétérogénéité du sédiment lui-même.

Unité R2: Cette Unité est formée d'un gros éboulis placé à droite hydrographique du Torrent Rochemolles, constitué de la mise en dépôts du marin formé surtout de blocs hétérogènes de substratum lithoïde calcschisteux provenant du tunnel routier du Fréjus, réalisé dans les années '70; on peut y trouver des blocs formés localement de restes d'ouvrages et de fragments en béton. Morphologiquement, l'éboulis est formé d'une série de terrassements et talus d'épaisseurs de l'ordre de quelques mètres à des dizaines de mètres. Comme le montre la Planche 69P, la base de l'éboulis se trouve en correspondance de l'ancien tracé du Torrent Rochemolles de 1934.

On ne peut observer cette Unité que dans le sondage BH2 pour une épaisseur de 2, 5 m constituée de gravier hétérométrique, polygénique, à forme (ϕ max 6 cm) en matrice sableuse grossière faiblement limoneuse, de couleur gris cendre. L'Unité **R2** se présente probablement en étiopie de faciès avec l'Unité R1 s'appuyant directement sur les sédiments glaciaires indifférenciés (Unité **dg**). La seule valeur de N_{spt} établie dans cette unité est basse avec une réponse de 9 coups / 30 cm.

Unité R3: Cette Unité se développe en correspondance de l'actuelle plate-forme routière de la tête du Tunnel du Fréjus, placée à la gauche hydrographique; elle est constituée d'un gros éboulis formé du matériau de marin provenant de l'excavation du Tunnel ferroviaire du Fréjus, réalisé à la fin du 19^e siècle. Dans sa partie la plus haute, il a été remblayé avec de l'autre matériau de marin du Tunnel routier du Fréjus, plus en amont, et sur les côtés du lit du Torrent Rochemolles.

L'Unité **R3** est constituée de terrains formés surtout de blocs hétérogènes de substratum lithoïde calcschisteux, avec graviers, sables et limons englobant galets et blocs, localement avec des restes d'ouvrages et des fragments de béton. Dans l'ensemble, cette unité est caractérisée par une accumulation variable, de basse à élevée, où les épaisseurs globales sont de l'ordre de quelques mètres à des dizaines de mètres. L'expression morphologique de l'éboulis primitif a été partiellement reformée suite à la réalisation du Tunnel routier du Fréjus .

6.3.2 Unité dc

Cette unité est formée de clastes de centimétriques à décimétriques, d'anguleuses à localement arrondies, immergées dans une abondante matrice fine limo-sableuse, correspondant à la couverture détritique de colluvion. Dans l'ensemble, le dépôt se présente avec un degré d'accumulation faible, presque à l'état incohérent, de structure chaotique, à l'intérieur duquel se trouvent localement des blocs de pierre de 2-3 m³ et des poches de clastes tabulaires embriqués faiblement, cimentés à une structure *open work*. Les clastes sont constituées principalement de fragments de béton partiellement ou intensément altérés, de quartzites, de concrétions calcitiques et quartzitiques.

6.3.3 Unité df

Cette unité est constituée de galets et de blocs incohérents de forme angulaire immergés dans une faible matrice fine. Elle correspond à l'éboulis de nappe organisé en conoïdes ou prismes de sédiments clinostatifiés de taille et de forme variables selon l'état de fracturation du substratum lithoïde dont ils proviennent. Le charriage est distribué surtout à la base des parois et ne concerne pas directement la zone de tête de la galerie de sécurité.

6.3.4 Unité al

Ensemble graveleux à galets, à matrice limo-sableuse, de couleur grise, où s'alternent des poches sableuses graduellement limoneuses et/ou limo-sableuses à galets. Elle correspond aux sédiments alluvionnaires liés génétiquement au Torrent Rochemolles. Cette unité ne concerne pas directement la zone de tête de la galerie de sécurité.

6.3.4 Unité als

Ensemble graveleux à galets, semblable au précédent, à matrice limo-sableuse, de couleur grise, auquel s'alternent des poches sableuses graduellement limoneuses et/ou limo-sableuses à galets. Elle correspond, dans le site examiné, aux sédiments alluvionnaires relatifs au drainage actif à l'époque historique génétiquement lié au Torrent de Rochemolles.

Ces sédiments, suite aux interventions de mise en place de l'Unité **R2** puis d'aménagement de la zone de tête du Tunnel routier (Unité **R1**), se situent au-dessous de toutes les unités mentionnées plus haut.

Cette unité se rencontre dans tous les sondages effectués sur le versant droit du Torrent Rochemolles au cours de la campagne de 2002, sauf le sondage BH2 : son attribution se base sur la corrélation de terrain et l'observation directe des carottes extraites lors des reconnaissances géognostiques (BH1, BH5, BH4), où il a été possible, quoique avec quelques incertitudes, d'évaluer une épaisseur moyenne d'environ 5 m. Les caractéristiques intrinsèques du matériau relevé dans les stratigraphies ne diffèrent pas beaucoup des sédiments glaciaires sous-jacents, les deux unités ayant le même *parent material*; elles diffèrent exclusivement par leur degré d'accumulation : les sédiments attribués à l'Unité **dg** ont en général un degré d'accumulation nettement supérieur, tandis que les autres présentent un degré d'accumulation très faible.

En général, dans l'Unité **als**, la valeur N_{spt} est comprise entre 42 coups / 30 cm et Déchet, cette dernière valeur étant fortement prédominante.

6.3.5 Unité dg

Cette Unité est constituée surtout de gravier hétérométrique polygénique de subangulaire à subarrondi, immergé dans une matrice de sableuse moyen-grossière à limo-sableuse, de couleur grise ; dans l'ensemble, cette Unité est caractérisée par une accumulation élevée. Génétiquement, cette Unité correspond aux sédiments glaciaires indifférenciés caractérisés par d'abondants blocs supérieurs au mètre (erratiques) et par de riches couches de fraction fine sablo-limoneuse, d'épaisseur décimétrique, faiblement plastiques. En général, la valeur N_{spt} est comprise entre 50 coups / 30 cm et Déchet, cette dernière valeur étant fortement prédominante. En présence d'un plus important contenu de matrice fine, on a recensé, dans de rares cas, des valeurs de N_{spt} comprises entre 14–50 coups / 30 cm.

6.3.6 Unité cs

Cette unité est caractérisée par une roche métamorphique schisteuse constituée par des alternances de fines couches de mica avec des couches carbonatées et présence locale de couches graphitiques. La roche est fissile le long des surfaces de schistosité avec inclinaison variant de 5° à 20° et son espacement de centimétrique à décimétrique en fonction de la composition. Le massif est caractérisé par des surfaces de discontinuité de moyennement inclinées (20°-30°) à sub-verticales, tant ouvertes que fermées.

On observe des veines à composition quartzeuse et/ou calcito-quartzeuse de couleur blanche. Les systèmes de discontinuité déterminent l'isolement de portions prismatiques de dimensions décimétriques à métriques. Les surfaces de fracture sont rugueuses, moyennement plano-rugueuses, localement ondulo-rugueuses

Le calcschiste, au contact avec la couverture quaternaire et en correspondance des couches plus fracturées, présente un RQD % compris entre 0-40, tandis que dans l'ensemble, la roche présente des portions discrètes avec un RQD % variant entre 50-80.

7. ASSISE HYDROGEOLOGIQUE

Le cadre géologique et géomorphologique, exposé dans les précédents paragraphes, en parallèle avec les données ponctuelles de sous-sol obtenues par la campagne géognostique, permet de préciser les principales grandes lignes du réseau hydrique souterrain en correspondance du site étudié et de définir quels sont les principaux problèmes concernant la circulation hydrique profonde de la zone concernée par le projet.

L'assise hydrologique locale de la zone du projet a été calculée sur la base des équipements installés lors de la campagne géognostique de juillet-août 2002 réalisée par la société Geotecno, dans la zone de la plate-forme de l'usine de ventilation, et à partir des premières mesures par piézomètre récoltées pendant la période août-septembre 2002 dans les 4 piézomètres installés.

En continuant les séries de mesures piézométriques tout au long des saisons, on pourra dessiner avec plus de précisions l'évolution hydrogéologique profonde en relation avec les variations pluviométriques saisonnières et/ou particulièrement significatives.

7.1 Classement hydro-géologique de la zone étudiée

Les principaux facteurs qui conditionnent les circulations d'eau souterraines sur le relief montagneux sont les caractéristiques de composition des lithologies, leur perméabilité, l'assise géologico-structurale, les déformations à grande échelle du versant, les phénomènes gravitaires et de dissolution. Les terrains présents se réfèrent fondamentalement aux unités des calcschistes, auxquels se superposent les nappes de couverture comprenant les dépôts d'éboulement, les terrains remaniés d'origine colluviale et alluvionnaire des cours d'eau mineurs.

Les zones de discontinuité liées à des déformations de différents types (tectonique, gravitaire) remplissent le rôle de zones d'infiltration et de circulation hydrique préférentielle, donnant, à l'échelle du relief, des perméabilités importantes à des lithologies caractérisées par des valeurs primaires très réduites.

Sur la base de ces éléments, la structure hydrogéologique de la Vallée de Rochemolles, dans sa section terminale, peut être partagée en une série d'Unités hydrogéologiques ayant des caractéristiques de perméabilité différentes:

- une première Unité à l'intérieur de la nappe détritico-colluviale, d'épaisseur variable, caractérisée par une perméabilité à porosité globalement faible et localement moyenne au droit des dépôts détritiques les plus grossiers à fortes puissances;
- une seconde Unité dans les dépôts de remblai provenant des excavations du tunnel routier ou du tunnel ferroviaire, caractérisée par une perméabilité très variable, en raison du manque d'homogénéité granulométrique des remblais: on passe d'une bonne perméabilité grâce à la présence d'un drainage artificiel, comme c'est le cas du remblai situé sur le côté droit de la Vallée du Rochemolles, à une faible perméabilité due à la présence de couches limoneuses à l'intérieur des remblais. Cette grande hétérogénéité des caractéristiques de perméabilité peut, dans certains cas, déterminer la présence de petites nappes à basse pression, qui, étant donné la discontinuité de la distribution éventuelle des horizons imperméables, ne devraient vraisemblablement pas entraîner d'anomalies à l'échelle du bassin;
- une troisième Unité dans les sédiments alluvionnaires graveleux à galets avec matrice limo-sableuse, à perméabilité moyen-haute constituant l'aquifère principal du secteur du fond de la vallée;
- une quatrième Unité à l'intérieur des sédiments glaciaires, caractérisée par une perméabilité très variable: on passe de valeurs moyen-hautes en correspondance de *tills* d'ablation à valeurs basses ou très basses en correspondance de *tills* de logement pratiquement imperméables;

- une cinquième Unité à l'intérieur du substratum rocheux, caractérisée par une faible perméabilité par fracturation, pouvant atteindre un degré moyen en correspondance de certaines zones plus fracturées. La composition minéralogique et les caractères texturaux des calcschistes donnent à la roche, dans des conditions normales, une perméabilité primaire très réduite. Le comportement hydrogéologique est toutefois influencé par les caractères de perméabilité secondaire, par fissuration le long des surfaces de schistosité et par fracturation en correspondance des principales discontinuités épigéniques.

Selon ce classement, on s'attendrait à trouver un circuit hydrogéologique étroitement lié aux rapports spatiaux entre l'évolution du substratum rocheux et la couverture quaternaire. La circulation hydrique est établie dans l'unité hydrogéologique des couvertures quaternaires, tandis qu'une circulation plus profonde est présente à l'intérieur du massif rocheux, en relation avec son état de fracturation.

Sur la base de rapports géométriques des différentes unités et en fonction du rôle qu'elles revêtent par rapport à la circulation souterraine, on peut dire que la structure hydrogéologique de la zone de tête du Tunnel routier du Fréjus, où sera réalisée la galerie de sécurité, est caractérisée par deux milieux hydrogéologiques distincts : le secteur de fond de vallée et celui de versant.

Le secteur de fond de la vallée qui représente le principal aquifère est caractérisé par une nappe libre liée aux sédiments alluvionnaires de fond de vallée et qui concerne ensuite les sédiments glaciaires sous-jacents là où le degré de perméabilité le permet. Vu l'hétérogénéité des caractéristiques de perméabilité des sédiments d'origine glaciaire s.l.m., on ne peut exclure la présence de circulations locales éventuelles en pression le long des couches à granulométrie plus grossière quoique accumulées.

Le secteur de versant est caractérisé par la présence d'une nappe libre de versant née dans les unités de couverture quaternaire et dans les dépôts de remblai, avec un lit repérable avec l'interface substratum rocheux - couverture.

Deuxièmement, il pourrait y avoir une nappe par fracturation à l'intérieur du massif rocheux en correspondance de zones plus fracturées; c'est probablement le cas pour le versant gauche caractérisé par des zones de déformation d'épaisseur élevée, dues aux phénomènes gravitaires les plus importants (grands éboulements, Déformations Gravitaires Profondes de Versant).

Ces zones sont caractérisées par une continuité latérale élevée et par des dispositions en général cohérentes avec l'assise structurale du substratum. Les surfaces de discontinuité représentent des bandes d'intense déformation à l'intérieur ou dans la portion supérieure du substratum. A cet endroit, la roche se présente intensément fracturée, même cataclasée avec des portions pierreuses immergées en matrice sablo-limoneuse. Les perméabilités de type

secondaire prennent des valeurs très réduites et la zone de déformation assume, dans l'ensemble, le rôle de limite de perméabilité. Cette assise détermine la concentration dans le secteur inférieur du versant des émergences relatives à la circulation hydrique logée dans les secteurs de relevé concernés par les grandes déformations gravitaires, comme c'est le cas pour la source Colet d'Ane (1340 m s.l.m.) captée pour l'eau potable par la Commune de Bardonnèche.

En se fondant sur ces considérations, on peut supposer la présence de circuits hydrauliques à différentes positions altimétriques, en correspondance de systèmes de fracture d'origine tectonique, et, quoiqu'il ne s'agisse pas d'une véritable nappe, ces circuits déterminent l'existence d'une circulation hydrique souterraine à l'échelle de tout le versant.

7.2 Mesures piézométriques

Les niveaux piézométriques ont été obtenus grâce aux équipements installés lors de la campagne géognostique Musi Net 2002, dans la zone de la plate-forme de tête du Tunnel routier, aux abords de l'usine de ventilation. Ils ont été interprétés selon les données disponibles relatives à deux lectures effectuées au cours des mois d'août et de septembre 2002.

Vu ces considérations et vu le manque de mesures de référence dans un plus grand espace de temps, le niveau piézométrique indiqué sur les *Profils géologiques techniques*, a été élaboré sur la base des niveaux maximum mesurés (tab.3). A partir de ces données, on peut tirer les conclusions suivantes:

- l'actuel lit du Torrent Rochemolles sert de recharge pour la nappe phréatique;
- La nappe se développe surtout dans le complexe graveleux à galets des sédiments alluvionnaires concernant le drainage actif à l'époque historique, génétiquement lié au Torrent de Rochemolles;
- on ne peut exclure la présence d'une nappe en pression en correspondance des secteurs latéraux du fond de vallée, établie dans les sédiments d'origine glaciaire
- au droit de l'usine de ventilation, selon les données piézométriques relevées en 1969, lors de la réalisation du projet de l'actuel Tunnel routier du Fréjus (Sitaf, 1969), la nappe se trouvait proche de la cote 1295 s.l.m. dans une lecture du sondage n° 2 (cote 1903 m s.l.m.) avec des valeurs d'ordre de grandeur à peu près comparables à celles relevées lors des lectures de 2002 dans le sondage BH5 voisin.

Cote plan campagne m.s.l.m	Sondage	Mesure de la nappe à p. du p.c.	Mesure de la nappe à p. de la cote absolue
1300,50	BH 1	- 6,38	1294,12
1310,10	BH 2	- 15,65	1294,45
1302,50	BH 3	- 9,45	1293,05
1305,00	BH 5	- 6,49	1298,51

Tableau 3 – Profondeur de la nappe du premier aquifère.

8. DOCUMENTATION DE REFERENCE

8.1 Documents de projet

PERETTI L. (1974) – Relazione sulle condizioni geoidrologiche e geoapplicative del territorio di Bardonecchia. In PRGC del Comune di Bardonecchia del 1974.

REGIONE PIEMONTE SERVIZIO GEOLOGICO (1979) – Studio geologico-tecnico per la valutazione di un'area da adibire a piano di posa di materiale di risulta del Traforo del Fréjus in Comune di Bardonecchia. Relazione. Torino 1973.

SITAF– Osservazioni geognostiche e geoapplicative nel cunicolo esplorativo per il Traforo Autostradale del Fréjus. Torino. 1966.

SITAF– Galleria stradale del Fréjus. Rilevamento geologico all'imbocco della Galleria e del Pozzo di ventilazione sul Lato Italia. Relazione. Torino. 1968.

SITAF – *Traforo autostradale del Fréjus* Sondaggi geognostici nella zona di imbocco del futuro Imbocco della Galleria Autostradale del Fréjus in comune di Bardonecchia. Progetto esecutivo campagna indagine e nota geotecnica. SITAF. 10 novembre 1969.

SITAF –Strada di raccordo al traforo Autostradale del Fréjus – Progetto esecutivo Sondaggi Imbocco lato Italia – campagna indagine 1973.

SITAF – Imbocco della galleria – Rilievi sismici dell'imbocco della galleria. Progetto esecutivo, Tavola a Scala 1:500/1:200. 1973

SITAF – Imbocco della galleria – Linee isopiezometriche del moto di filtrazione dell'acqua. Progetto esecutivo, Tavola a Scala 1:500/1:200. Studio Scaglia. 1973.

SITAF – Rilievo topografico del piazzale autostradale del Fréjus, Tavola a Scala 1:200. Studio Scaglia. Maggio 1988.

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

8.2 Cartographie et prises de vue aériennes

ISTITUTO GEOGRAFICO MILITARE (IGM) - *Carta Topografica d'Italia a scala 1:25.000, Foglio 54 - II SO Beaulard*. Rilievi del 1934, con ricognizioni del 1964.

ISTITUTO GEOGRAFICO MILITARE (IGM) - *Carta Topografica d'Italia a scala 1:25.000, Foglio 54 - II SO Beaulard*. Rilievi del 1934, con ricognizioni del 1964.

ISTITUTO GEOGRAFICO MILITARE (IGM) - *Riprese aerofotografiche relative al Volo GAI*. Foto in bianco e nero.

REGIONE PIEMONTE (1979-80) - *Riprese aerofotografiche del territorio regionale*. Foto a colori.

REGIONE PIEMONTE - *Carta Tecnica Regionale (CTR) a scala 1:10.000*. Restituzione aerofotogrammetrica delle riprese del 1991.

POLINO R., FIORASO G., GATTIGLIO M., GIARDINO M., DELA PIERRE F. (1999) - *Carta Geologica d'Italia a scala 1:50.000. Foglio: 153 – Bardonecchia*. Presidenza del Consiglio dei Ministri – Dipartimento per i Servizi Tecnici Nazionali, Regione Piemonte – Direzione Regionale Servizi Tecnici di Prevenzione.

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

SOCIETA SITAF (2001) – *Riprese aerofotografiche dell'alta Valle di Susa nel tratto Savouix – Bardonecchia*. Foto a colori.

8.3 Géologie et géomorphologie

- ALLENBACH B. (1982) –v Géologie de la bordure SW du massif d'Ambin (Alpes occidentales). Lithostratigraphies des séries mésozoïques. Analyse tectonique et modélisation de la déformation. Thèse de 3° cycle, pp.149.
- ALLENBACH B. & CARON J.M. (1986) - Relations lithostratigraphiques et tectoniques entre les séries mésozoïques de la bordure sud-ouest du massif
Eclogae geol. Helv., 79: 75-116.
- BEAU J.R., CABANIUS J., COURTECUISSÉ 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 français et leur application pour la détermination et l'adaptation du soutènement provisoire.
- 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.
- CARRARO F., DRAMIS F. & PIERUCCINI U. (1979) - *Large-scale landslides connected with neotectonic activity in the Alpine and Apennine ranges*". Proc. 15th Meeting. Comm. Geomorph. Surv. Map. Modena 1979, 213-230.
- DELA PIERRE F., LOZAR F. & POLINO R. (1997) – *L'utilizzo della tettonostratigrafia per la rappresentazione cartografica delle successioni metasedimentarie nelle aree di catena*. Mem. Sc. Geol., 49: 195-206.
- DELA PIERRE F., POLINO R., BORCHI A., CARRAIO F., FIORASO G., GIARDINO M. BELLARDONE G., GATTIGLIO M., MALUSA', M. & MOSCA P. LOZAR F. (1999) – *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000. 188 pp. Copia di Prova Tip. Geda, Torino*.
- DEVILLE E., FUDRAL S., LAGABRIELLE Y., MARTHALER M. & SARTORI M. (1992) – *From Oceanic closure to continental collision : a synthesis 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. Carta tematica e relazione. ALMA, Milano.
- GIARDINO M. & POLINO R. (1997) – *Le deformazioni di versante dell'alta Valle di Susa: risposta pellicolare dell'evoluzione tettonica recente*. Il Quaternario, 10 (2), 31-38.
- LOLLINO G., TROPEANO D. & TURCONI L. (2002) – Sintesi degli eventi di piena e frana avvenuti nell'anno 2001 in Italia Nord Occidentale. GEAM 105, pp. 27-43.
- POLINO R. (1978) – Osservazioni geologiche nel Traforo Autostradale del Fréjus sino alla progressiva 4000 (nota preliminare). Boll. Ass. Min. Sub. XV, 4, 566-576.
- RAMASCO M. & SUSELLA G. (1978) – *Carta della instabilità idrogeologica in alta Valle di Susa (tratti Bardonecchia-Exilles ed Exilles-Susa) Scala 1:25.000*. In: "Studi geologici per il collegamento stradale tra il traforo del Fréjus e Torino (tratto Bardonecchia-Susa). Regione Piemonte, Dipartimento Organizzazione e Gestione del Territorio.

REGIONE PIEMONTE, SETTORE PREVENZIONE DEL RISCHIO GEOLOGICO, METEOROLOGICO E SISMICO.
GEOS - *BANCA DATI GEOLOGICA*. (1990) - Cartografia alla scala 1:100.000, Foglio n. 54 - Bardonecchia. Tematismi:

- Carta delle frane;
- Carta dei settori di versante vulnerabili da fenomeni franosi per fluidificazione dei terreni incoerenti della copertura superficiale;
- Conoidi potenzialmente attive e frequenza dei fenomeni di trasporto in massa connessi alla attività torrentizia in tributari minori;
- Carta dei danni alla rete viaria (stradale e ferroviaria) ed ai ponti;
- Carta degli alveo-tipi e delle portate;
- Carta delle aree inondabili.

REGIONE PIEMONTE (1998) - *Eventi alluvionali in Piemonte*. Direzione Servizi Tecnici di Prevenzione. 415 pp. + 8 tavv. f.t. Torino.

REGIONE PIEMONTE (2000) - *Evento alluvionale dell'Ottobre 2000 in Piemonte*. Direzione Servizi Tecnici di Prevenzione. Torino.

REGIONE PIEMONTE (2001) - Studi preliminari dell'approfondimento del Piano Territoriale Regionale della Valle di Susa. Cd. Ed. Regione Piemonte.

ROURE F., HEITZMANN P. & POLINO R. (1990) - Deep structure of the Alps. Mem Soc. Geol. Fr., 156; Mem. Soc. geol. Suisse, 1; Vol. spec. Soc. Geol. It. 1, pp. 367.

ROURE F. BERGERET F., DAMOTTE B. MUNIER J.L. & P. & POLINO R (1996) – The ECORS-CROP Alpine seismic traverse. Mem Soc. geol. Fr., 170, pp. 113.

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

SACCO F. (1943) – *Il quaternario nelle alte valli di Susa (Dora Riparia)*. Memorie R. Accademia delle Scienze di Torino, 71 (2), 61-80.

SACCO F. (1948) – *La degradazione delle montagne (con esemplificazione nell'Alta Val di Susa)*. L'Universo, 28 (2), 139-151. Lunardi P. (1980) – Application de la mécanique des roches aux tunnels autoroutiers, exemple des tunnels du Fréjus (côté Italie) et du Gran Sasso, Rev. Fra. Geot. 12, 5-20.

STRAGIOTTI L. (1977) – Note sulla costruzione del traforo Autostradale del Fréjus . Boll. Ass. Min. Sub. XVI, 1, 111-136.

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

TROPEANO D. LUINO F. & TURCONI L. (2000) – Evento alluvionale del 14-15 ottobre nell'Italia Nord-Occidentale. Fenomeni ed effetti. GEAM 101, pp. 203-216.

TROPEANO & TURCONI L. (2001) – Alluvionale del 14-15 ottobre nell'Italia Nord-Ovest. Cronaca di sintesi e commento. Nimbus 2/2001, pp. 53-85.