

COMITE SCIENTIFIQUE

P. ALIX
Ingénieur général des Ponts et Chaussées (E.R.).

P. BASTARD
Directeur des Ports Maritimes et des Voies Navigables.

C. BONNOME
Président de l'Association Française du Béton.

J. CABANIUS
Président du Comité Français des grands barrages

P. CALLET
Ingénieur général des Ponts et Chaussées (E.R.).

L. CARPENTIER
Ingénieur général honoraire de la S.N.C.F.

J.P. CHAPON
Secrétaire général à la Marine Marchande.

PH. CLEMENT
Président de la Fédération Nationale des Travaux Publics.

P. CONSIGNY
Directeur du Bâtiment et des Travaux Publics et de la Conjoncture.

R. COQUAND
Vice-Président du Conseil Général des Ponts et Chaussées.

P. COT
Président de la Société Générale d'Entreprises.

J. DANON
Président du Syndicat National du Béton Armé et des Techniques Industrialisées.

G. DREYFUS
Directeur général de l'Aéroport de Paris.

M. FEVE
Directeur des Routes et de la circulation routière

R. GINOCCHIO
Directeur à la Direction générale d'E.D.F.

P. GIRAUDET
Directeur général de la R.A.T.P.

R. GUITONNEAU
Président de la Société AREA.

A. HERZOG
Ingénieur général des Ponts et Chaussées.

M. HUET
Directeur du Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes.

M. HUG
Directeur de l'Équipement à l'E.D.F.

M. LEGRAND
Directeur des installations fixes de la S.N.C.F.

G. MEUNIER
Chef de l'Inspection générale de l'aviation civile

A. MOGARAY
Ingénieur général des Ponts et Chaussées
Délégué général du Comité Scientifique

A. PASQUET
Directeur de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.

R. RUDEAU
Directeur général de l'Aménagement urbain à la Préfecture de Paris.

J. VASSEUR
Président du Comité Consultatif du CSTB.

TRAVAUX

ORGANE OFFICIEL TECHNIQUE DE LA FEDERATION NATIONALE DES TRAVAUX PUBLICS ET DE SES SYNDICATS AFFILIES

ORGANE OFFICIEL TECHNIQUE DU SYNDICAT NATIONAL DU BETON ARME ET DES TECHNIQUES INDUSTRIALISEES

REVUE MENSUELLE
N° 482 MAI 1975

23	La centrale électro-nucléaire de Tihange	J. Cabanius P. Nihoul
32	L'enceinte de sécurité de la centrale nucléaire de Tihange	J. Chaudesaigues P. Moreau
39	La chute de Gamsheim, sur le Rhin	R. Fritsch Y. Le Mey
50	Tunnel autoroutier du Gran Sasso	J. Boutille P. Lunardi
59	La reconstruction de la passerelle suspendue du Parc des Buttes Chaumont à Paris	Y. Lefresne
67	Pour préserver l'environnement, les compresseurs et brise-béton insonorisés	P. Mille
71	Informations	
82	Appels d'offres	

Editions Science et Industrie. S.A. au cap. 1 248 240 F
6, av. Pierre 1^{er} de Serbie, 75116 Paris, T. 723.61.54.
C.C.P. Paris 1 302 08. R.C. Paris 57 B 8 035

Abonnements avec La Route : France 165 F, Etr. 195 F

Prix de ce numéro : 27 F



NOTRE COUVERTURE :

Vue générale du site de la centrale nucléaire Tihange I en partant du premier plan :
La Meuse - Les réfrigérants atmosphériques d'appoint.
Le canal de prise d'eau de réfrigération.

Les installations de production d'énergie et l'enceinte étanche du réacteur.

Maître d'ouvrage : Société Belgo-Française d'Energie Nucléaire Mosane.

Etude et réalisation du Génie Civil du lot réacteur :

Association momentanée des entreprises :
Campeon Bernard, pilote technique, Ed. François et M. Delens.

La Revue Travaux s'attache pour l'information de ses lecteurs à permettre l'expression de toutes les opinions scientifiques et techniques. Mais les articles sont publiés sous la responsabilité de leurs auteurs.

Tous droits de reproduction, adaptation, totales ou partielles, sous quelque forme que ce soit, sont expressément réservés (Copyright by Science et Industrie).

TUNNEL AUTOROUTIER DU GRAN SASSO
TRAVERSE'E DE LA FAILLE DE LA VALLE FREDA

Tunnel autoroutier du Gran Sasso

Traversée de la Faille de la Valle Freda

J. Boutitie

Ingenieur ENSG - Directeur du Bureau d'Etudes de SIF
ENTREPRISE BACHY - Paris

P. Lunardi

Ingenieur Docteur de l'Université de Padoue
Directeur du Bureau d'Etudes de COGEFAR, Milan

1 SITUATION GENERALE - CARACTERISTIQUES DU TUNNEL DU GRAN SASSO D'ITALIA

La liaison autoroutière Rome (Autoroute du Soleil) - Mer Adriatique est actuellement en service jusqu'à la ville de L'Aquila, située au pied du massif des Abruzzes. Le tronçon en cours de réalisation L'Aquila-Villa Vomano, long de 51 km, doit passer en souterrain sous le massif du Gran Sasso (point culminant Corno Grande 2912 m) qui fait partie de la chaîne orientale des Appennins Abruzzes (fig. 1).

1.1 Caractéristiques du souterrain (fig. 2)

La traversée en souterrain, longue de 10 170 m, comporte deux galeries distinctes, une pour chaque sens de circulation, distantes d'axe en axe de 50 à 100 m avec un bypass de liaison tous les 900 m environ. Les tunnels sont exécutés à partir de deux attaques, à chacune de leur extrémité :

Versant SW : Attaque Assergi longue de 5 100 m avec une pente montante de 0,2 %.

Versant NE : Attaque Casale San Nicola, de même longueur, et de pente montante 1,6 %.

Caractéristiques des tunnels :

Section d'excavation moyenne : 80 m².

Section utile : 55 m².

Largeur de la voie de roulement : 7,50 m.

Cotes de départ : Côté Assergi 958, côté Casale San Nicola 889.

Couverture maximum au-dessus des souterrains : 1 300 m.

Le projet de ventilation comporte deux puits situés à environ 2 000 m de l'entrée de chaque attaque et profonds respectivement de 250 m et 70 m. Côté Casale il est prévu en outre une galerie de service entre les deux souterrains et parallèle à ceux-ci sur une longueur d'environ 2 600 m. Sa cote est inférieure à celles des tunnels et ses dimensions légèrement plus modestes (excavation 56 m² section utile 40 m²).

Puits de ventilation et galerie de service sont en communication directe par des rameaux de liaison avec des deux tunnels.

1.2 Contexte géologique

Il s'agit essentiellement d'un massif sédimentaire à caractère prédominant calcaire et dolomite. L'attaque côté Casale San Nicola est caractérisée cependant par des formations marneuses d'âge tertiaire et ce sur 3 000 m de longueur environ.

Les formations calcaires et dolomitiques ont subi les effets d'une tectonique intense, qui a provoqué la subdivision du massif en blocs découpés par deux séries de failles :

— Failles de direction appénique sensiblement perpendiculaires à l'axe des galeries.

— Failles de direction anti-appénique parallèles à l'axe

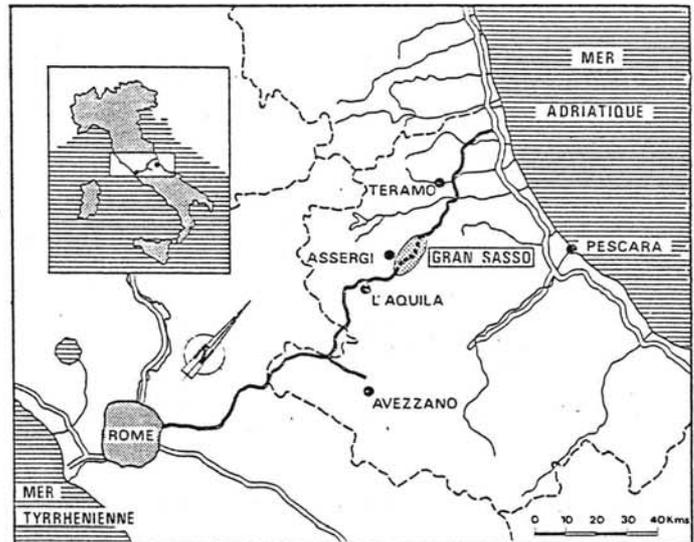
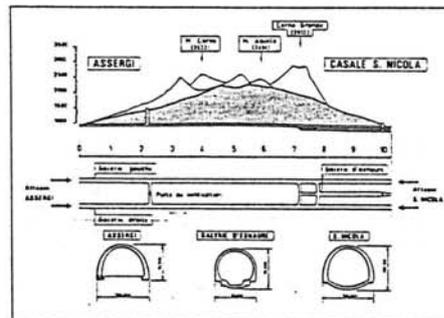


Fig. 1 Tunnel du Gran Sasso - Situation géographique.

Fig. 2 Profil en long du tunnel. Caractéristiques des galeries de circulation et de service.



Il en résulte du point hydrogéologique, un réservoir considérable de calcaire fracturé, perméable « en grand » et dont l'alimentation est favorisée par une dépression topographique de grande surface : le Campo Imperatore. Le profil stratigraphique au droit des tunnels, établi par le professeur Calambert de l'Université de Liege est représenté sur la figure 3. Les difficultés susceptibles d'être rencontrées dans les galeries sont donc de deux ordres :

— Problèmes liés à la perméabilité du calcaire et à l'importance de la charge hydrostatique au droit des souterrains : Couverture moyenne de 1 200 m sur pres de 5 km, soit la moitié du tracé, charge hydraulique pouvant être supérieure à 600 m.

— Problèmes dus à l'hétérogénéité des caractéristiques mécaniques du rocher en particulier à la traversée des accidents tectoniques.

Le problème de l'exhaure n'a d'ailleurs pas échappé au projeteur. Outre les conduits d'évacuation normaux, la galerie de service de l'attaque Casale San Nicola est prolongée à toutes fins utiles jusqu'à

la grande faille inverse qui fait buter les marnes tertiaires imperméables sur les calcaires aquifères constituant l'essentiel du massif.

2 CIRCONSTANCES DE L'ACCIDENT SURVENU AU DROIT DE LA FAILLE DE LA VALLE FREDA

La faille de la Valle Freda de direction anti-appénique (transversale par rapport à l'axe des tunnels) fait buter deux compartiments calcaires, l'un d'âge crétacé, l'autre jurassique à 2 000 m environ de l'extrémité côté Assergi.

L'avancement se poursuivait alors normalement pour les deux galeries suivant la méthode choisie par l'entreprise dans un calcaire plus ou moins fissuré mais de bonne tenue :

— Excavation à l'explosif en pleine section par tranches de 3 m de longueur environ.

— Pose de cintres et prérevêtement en béton projeté, simple boulonnage de la calotte dans les zones les plus compactes.

— Reconnaissance systématique à l'avancement avant percement par forages destructifs de 35 à 40 m de longueur.

La faille a été rencontrée en galerie gauche au PM 1997,25. Depuis le PM 1990 des venues d'eau normales, mais persistantes, étaient observées tant sur les parements que dans les forages pilotes destructifs. Au PM 1996, le 8 septembre 1970, l'eau d'exhaure de 3 forages apparaît blanchâtre et chargée de sédiments. Il est décidé alors de ralentir l'avancement de la grande section qui atteint 1997,25 et de poursuivre par une galerie de petite section à titre de reconnaissance sur quelques mètres

Cette dernière atteint 1999,20 le 9 septembre 1970 et donne lieu au front d'attaque et sur le parement gauche à une irruption brutale d'eau chargée d'éléments fins dont le débit atteint rapidement 700 l/sec. Après obturation par blindage en planches de la galerie et pose de tubes de drainage, le débit se maintient au même niveau pendant 4 jours consécutifs avec accumulation de sédiments au front qui atteint 7,50 m de hauteur le 13 septembre.

C'est le 14 septembre 1970 que débute un déboufrage important de façon brutale avec un débit d'eau chargée à 4 500 l/seconde en pointe qui ne peut être absorbé par les conduites d'exhaure. Un véritable torrent envahit tout le radier de la galerie gauche et, débouchant à l'air libre, suit normalement le fond de vallée, allant inonder partiellement la partie basse du village d'Assergi. Des travaux de terrassements immédiatement entrepris, canalisent le flot loin des zones habitées.

Les jours suivants le phénomène ne fait que s'amplifier, le déboufrage se faisant par pulsations successives avec des pointes de débit de 20 m³/sec. alternant avec des accalmies.

Dans la galerie droite le front ne présente aucune anomalie, les forages pilotes débitant de l'eau claire. L'avancement en pleine section est stoppé le 9 septembre 1970 au PM 1985,40.

Les dispositions suivantes sont alors prises :

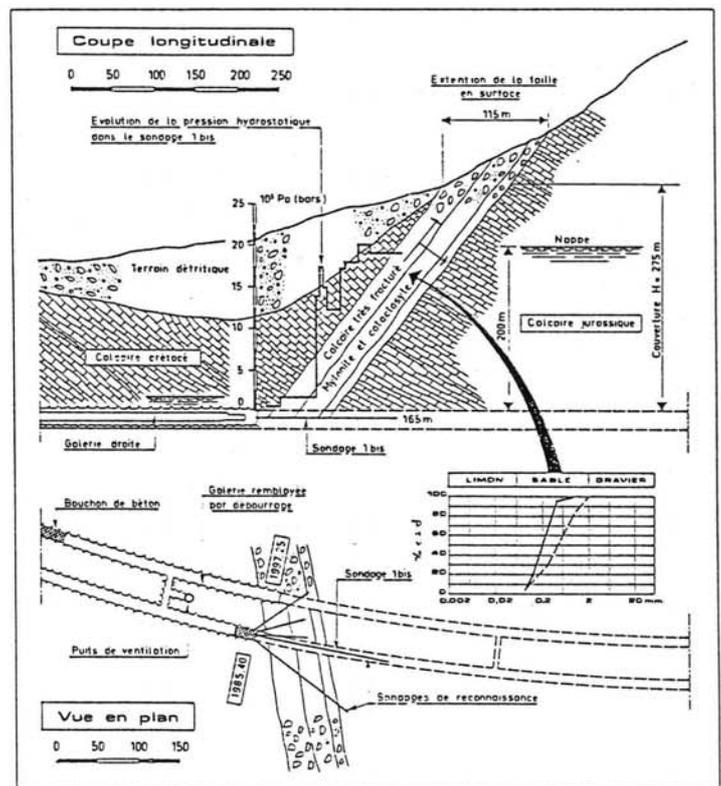
— Galerie gauche : Exécution d'un bouchon en béton de 10 m d'épaisseur, à 500 m environ en arrière du front d'attaque, à l'emplacement du bypass.

A travers ce bouchon obturant la section complète du tunnel, sont placés un certain nombre de tubes d'exhaure de Ø 10" munis de vannes, permettant le contrôle du débit évacué.

— Galerie droite : Constitution d'un masque en béton de 6 m d'épaisseur au front d'attaque.

Aménagement d'une chambre de travail sur 12 m de longueur avec revêtement bétonné de 2 m d'épaisseur, se raccordant en arrière, au revêtement normal du tunnel.

Fig. 4 Reconnaissance de la faille de la Valle Fredda Plan et coupe de l'accident.

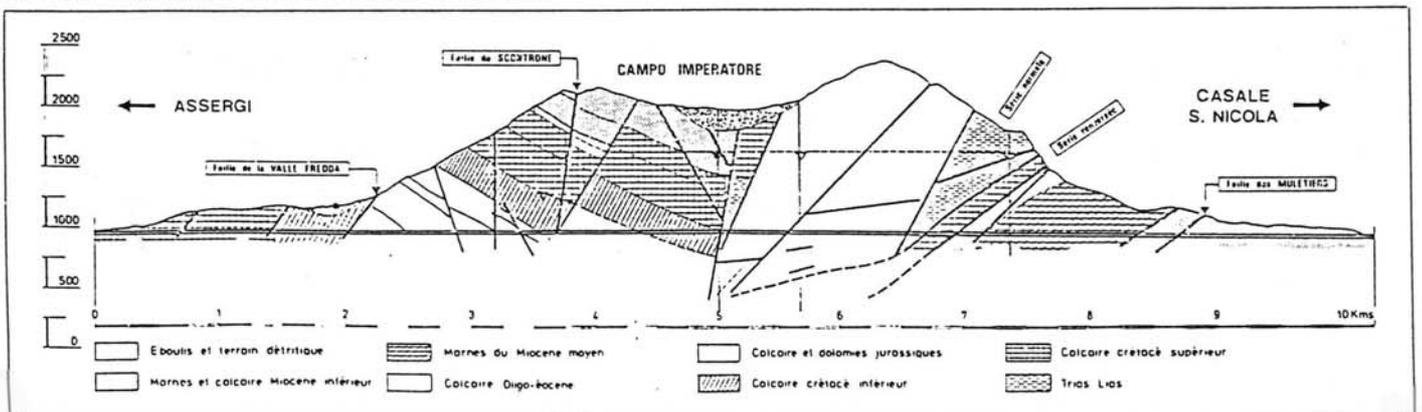


3 RECONNAISSANCE DE LA FAILLE (fig. 4)

L'ensemble de ces travaux était terminé le 30-9-1970, les débits d'exhaure à l'entrée de chacune des 2 galeries se stabilisant sensiblement à la même valeur comprise entre 200 et 300 l/seconde.

Une reconnaissance par sondages carottés fut entreprise dès le mois d'octobre 1970 à partir du front de la Galerie Droite.

Fig. 3 Profil stratigraphique à la traversée du massif du Gran Sasso.



6 sondages exécutés en carottage continu permirent de déterminer la position des éponges amont et aval de la faille ainsi que la nature des matériaux à traverser.

Bien qu'intéressant une zone de terrain « vierge », n'ayant donné lieu à aucun débouillage, la réalisation des sondages fut longue et délicate, compte tenu de la nature du remplissage (mylonite broyée sans cohésion) et surtout de la pression hydrostatique croissante vers l'éponte amont. Toutes dispositions furent prises pour éviter des irrptions d'eau et de matériaux non contrôlés en tête de chaque sondage : avant-tube scellé dans le béton du masque et le calcaire crétacé, sas de sécurité avec vannes à passage total pour entrée et sortie des carottiers, presse étoupe sur les tiges de forage et tubes de revêtement, contrôle rigoureux permanent du débit d'exhaure.

3.1 Dispositions géométriques et caractéristiques du terrain

La figure 4 indique en plan et en élévation les résultats obtenus. La faille présente un pendage vers le front d'environ 50° et se caractérise en plan par une inclinaison de 60° sur l'axe des galeries. La puissance de l'accident dans l'axe de la galerie gauche est évaluée à 60 mètres, l'éponte aval se trouvant à 50 m du PM 1985.

La partie centrale constituant le noyau de la fracture est caractérisée, sur 30 m d'épaisseur environ, par un calcaire complètement mylonitisé présentant l'aspect d'un silt, alternant avec des zones broyées d'aspect brechique et de granulométrie plus étalée (cataclasite).

De part et d'autre de ce noyau une zone de transition de calcaire très fracturé, constitue un passage au rocher franc des éponges amont et aval fissuré et aquifère.

3.2 Caractéristiques hydrauliques

Une série de piézomètres placés dans les éponges et dans le remplissage de l'accident permit de compléter le relevé des pressions statiques observées dans les sondages de reconnaissance.

La charge hydrostatique croît régulièrement de 0,3 MPa au niveau du crétacé aval jusqu'à 2 PMA (20 bars) dans l'éponte amont jurassique.

La zone mylonitisée de très faible perméabilité constitue ainsi un écran quasi étanche derrière lequel la charge hydrostatique dans le calcaire jurassique pouvait atteindre une valeur proche de la totalité de la hauteur des terrains de couverture.

Cet écran créait un gradient élevé dans des terrains broyés sans cohésion, la perte de charge atteignant plus de 1,5 MPa sur 30 m de distance. En surface la présence d'une cuvette remplie de matériaux détritiques et alluvionnaires au contact de la faille, ne pouvait qu'améliorer les conditions d'alimentation des calcaires fissurés des éponges.

L'analyse des caractéristiques de la faille de la Valle Freda, permet d'expliquer à posteriori le débouillage brutal du Pm 1997 en Galerie Gauche, débouillage

qui provoqua un comblement de la totalité de la section du tunnel sur 100 m de longueur environ.

La poursuite des travaux après traversée de l'accident a montré le caractère très particulier de cette faille en ce qui concerne l'importance de la zone mylonitisée et broyée.

Les accidents de même direction et de rejet équivalent (Failles de Scontrone, de Formica) ont été franchis sans aucune difficulté, l'épaisseur de terrain broyé étant nulle ou très peu importante.

Parallèlement aux travaux de reconnaissance, l'éponte aval de calcaire crétacé a été drainée à partir d'une auréole de forages de 25 m de profondeur, créant ainsi un premier rabattement au large de la zone de consolidation et de percement.

Reconnaissance et drainage de l'éponte aval ont été exécutés du 5 octobre 1970 au 8 février 1971.

4 DEFINITION DE LA METHODE DE CONSOLIDATION AVANT PERCEMENT

4.1 Principes généraux

La consolidation des terrains préalablement à l'excavation des tunnels, a été basée sur les principes ci-après :

— Constitution par injection de produits appropriés d'un cylindre de terrain consolidé coaxial au futur percement.

L'épaisseur et les caractéristiques mécaniques de l'anneau ainsi traité, doivent assurer la stabilité de l'excavation avant mise en place du soutènement provisoire, puis du revêtement définitif. La consolidation par silicatation et cimentation combinées en présence d'une forte charge hydraulique, est une méthode maintenant connue et appliquée avec succès dans le cas de galeries de dimensions plus modestes.

— Abaissement de la charge hydrostatique par drainage systématique des deux éponges aval et surtout amont, de façon à diminuer autant que possible la pression régnant à l'extérieur de la zone de terrain consolidé.

— Consolidation et percement en deux phases successives étant donnée l'importance de la section des galeries :

a) Traitement préalable et percement, par bonds successifs si nécessaire, d'une galerie circulaire de diamètre 3,50 à 4 m disposée dans l'axe des futurs tunnels.

b) A partir de cette galerie, consolidation de l'anneau de terrain permettant en dernière phase l'excavation de la pleine section.

— Compte tenu des circonstances de l'accident, la traversée débutera par la galerie droite en terrain vierge. Les travaux concernant la galerie gauche, particulièrement délicats du fait de la présence d'une zone totalement remaniée par le débouillage, pourront ainsi être entrepris ensuite à partir des deux côtes amont et aval de l'accident.

4.2 Etablissement du projet de traitement

4.2.1. Dimensionnement de l'anneau traité

L'étude théorique du problème a été conduite en assimilant l'excavation et le volume de terrain traité à des cylindres coaxiaux de rayons respectifs r et R .

En admettant que la zone traitée se présente après percement comme une enveloppe cylindrique épaisse, soumise sur sa face externe à une certaine pression, il est possible de déterminer par application des théories classiques de mécanique du sol, les conditions de stabilité de l'anneau de terrain consolidé ainsi définies :

— épaisseur, explicitée par le rapport $\frac{R}{r}$ —
— caractéristiques mécaniques nécessaires pour l'anneau consolidé.

Le calcul a été fait en prenant en compte non seulement les pressions dues au poids des terres et à la charge hydrostatique au-dessus de l'anneau, mais également la « pression du courant » engendrée par le gradient hydraulique, résultant de la percolation de l'eau dans le terrain traité.

Pour chaque phase de travail les valeurs du rapport $\frac{R}{r}$

— ont pu ainsi être déterminées en fonction de la

résistance attendue des différents types de terrains injectés au cours de la traversée de la faille. Les

valeurs de $\frac{R}{r}$ obtenues varient de 1,5 (calcaire frac-

turé) à 3 (Mylonite), la cohésion du terrain consolidé étant comprise entre 1 et 0,4 MPa.

4.2.2 Définition du traitement par injections

La consolidation est effectuée en deux phases successives pour chaque tranche de terrain traité :

a) injection de gel de silice assurant l'imprégnation des zones les plus fines (mylonite et cataclasite) ;
b) injection à haute pression de coulis stable bentonite-ciment augmentant la résistance obtenue en première phase par effet de clivage.

Dans les zones de calcaire fissuré, l'injection de gel est réduite ou supprimée, la consolidation étant assurée essentiellement par le coulis bentonite-ciment. L'injection est réalisée à partir d'auréoles de forages tronconiques couvrant progressivement la totalité du volume de terrain à consolider. La technique utilisée est celle du forage et injection « à l'avancement » par tranches successives de longueur limitée avec reforage systématique sur la profondeur déjà injectée. L'espacement entre forages est évidemment fonction de la nature des terrains ainsi que de la longueur unitaire des tranches injectées. L'expérience a conduit à adopter les valeurs suivantes :

Espacement des forages en extrémité d'auréole :
3 m pour le calcaire fracturé,
2,50 m dans la mylonite.

Longueur des tranches : calcaire : 3 à 5 m.
mylonite : 1 à 2,5 m.

Recyclage éventuel en fin de traitement, après contrôles.

Coulis utilisés : — Mélanges classiques bentonite-ciment malaxés à haute turbulence

C
— compris entre 0,5 et 1)

E
— Gel de silicate de soude à haute résistance et basse viscosité. Le mélange des solutions est réalisé automatiquement à l'aide de pompes doseuses. Produits de base :

— Silicate de soude 35-37° B°, $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Na}_2\text{O}} = 3,3$.

— Réactifs organiques C 508 et C 600 (brevet Progil-Sif).

Volumes injectés et pressions mis en œuvre :
Au stade de l'établissement du projet les quantités de matériaux et les pressions à mettre en œuvre furent fixés dans les conditions suivantes (traitement des zones broyées : mylonite et cataclasite). Quantités de produits injectés :

— Coulis bentonite-ciment : 10 % du volume théorique injecté.

— Gel de silice : 30 % du volume théorique injecté.
Pressions maximales : pour le gel 6 à 8 MPa - pour le coulis bentonite-ciment : 10 à 12 MPa.

5 DESCRIPTION DES TRAVAUX DE CONSOLIDATION ET DE PERCEMENT

5.1 Galerie Droite (fig. 5)

5.1.1 Galerie axiale de diamètre 3,50 m

Compte tenu de la position de l'éponte aval de la faille, consolidation et percement furent exécutés en deux bonds successifs, le premier tronçon permettant la réalisation d'une chambre de travail axiale (chambre n° 2) implantée dans le calcaire crétacé au plus près de l'aponte aval. Le second tronçon concerne la traversée de la faille proprement dite et pénètre dans le calcaire jurassique au-delà de l'éponte amont.

Premier tronçon :

- Traitement sur 45 m à partir du Pm 1985.
- Percement sur 35 m au-delà du béton du masque.

Les terrains intéressés sont constitués de calcaires fissurés d'âge crétacé. Le diamètre du cylindre traité est fixé à 11 m à l'extrémité du traitement au droit de la chambre de travail axiale 2.

L'épaisseur du terrain traité à l'extrados de la chambre était de 3 m correspondant à un rapport

$$\frac{R}{r} \sim 2.$$

Le dispositif des forages de traitement comporte trois auréoles tronconiques exécutées à l'aide d'un jumbo spécial à axe horizontal portant deux perforatrices rotatives hydrauliques.

L'espacement des forages en extrémité d'auréole était fixé normalement à 3 m.

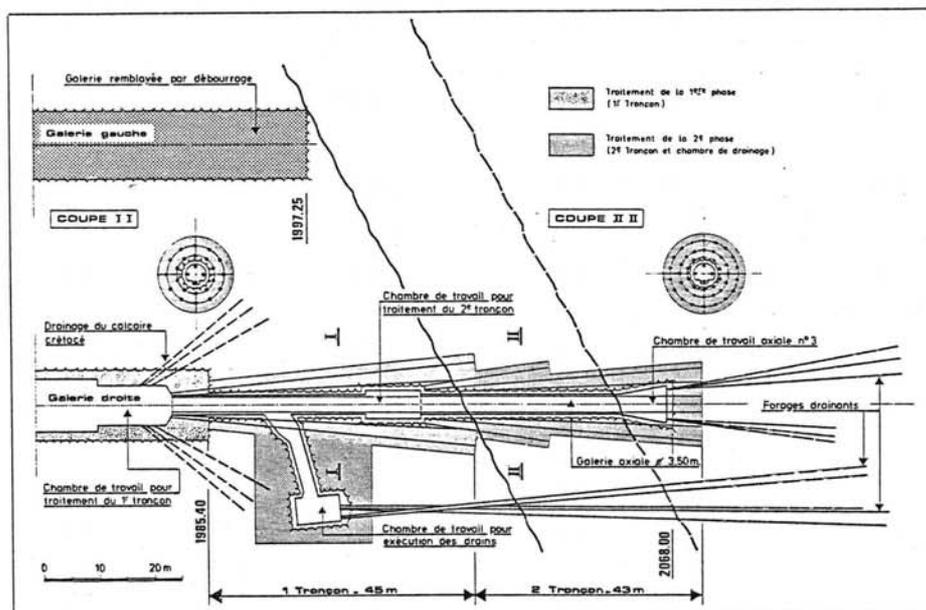


Fig. 5 Galerie Droite
Différentes phases de traitement et de percement (Galerie axiale Ø 3,50 m).

Un bouchon de terrain injecté de 10 m d'épaisseur assurait la stabilité du front de la chambre n° 2 au voisinage immédiat de la faille.

Il constituait en outre un appui efficace pour le traitement du deuxième bond en évitant les résurgences de coulis vers l'aval.

Le percement fut exécuté sans difficultés au marteau piqueur sans explosif avec pose de cintres et béton projeté à titre de pré-revêtement.

Délais d'exécution :

- Injection à partir de la chambre axiale 1 : 8-2-71 au 12-5-71.
- Percement sur 41 m y compris chambre de travail n° 2 : 13-5-71 au 19-6-71.

Deuxième tronçon : Traversée de la faille.

- Traitement jusqu'à 60 m au-delà de la chambre axiale n° 2.
- Percement sur 48 m (Pm 2068 dans le calcaire jurassique).

Ce deuxième bond, beaucoup plus délicat, concerne les terrains broyés du remplissage de la faille. Il comporte une troisième chambre de travail dans le calcaire jurassique amont permettant reconnaissance et drainage au-delà de l'accident.

L'épaisseur du terrain traité à l'extrados de la galerie fut fixée à 4 m, correspondant à un rapport

$$\frac{R}{r} \sim 3.$$

Le dispositif des forages de traitement, réalisés à l'aide de deux perforatrices placées dans la chambre de travail 2, comprend quatre auréoles tronconiques, l'espacement entre forages en extrémité d'auréoles étant de 2,5 m.

Les quantités de matériaux injectés furent conformes aux prévisions du projet en ce qui concerne le gel, mais nettement inférieures pour le coulis argile ciment, malgré les pressions de refus élevées.

Au cours de la même période, un dispositif de drainage de l'éponte amont fut réalisé à partir d'une chambre latérale placée à droite du futur tunnel.

La réalisation de la galerie d'accès et de la chambre elle-même, fut précédée d'un traitement de consolidation et d'étanchement dans le calcaire crétacé.

Le drainage comporte 18 drains forés de 80 à 100 m de longueur, tubés et cimentés au droit de l'accident et pénétrant de 20 à 45 m dans le jurassique (diamètre utile 3"). L'efficacité de ce dispositif fut spectaculaire. La pression hydrostatique fut abaissée de moitié en moins d'un mois, pour un débit total d'exhaure des drains forés compris entre 400 et 600 l/s.

La figure 6 rend compte de l'évolution des débits et pressions maxima au cours des différentes phases de travail, la figure 7 donne une idée du dispositif dans la chambre de drainage.

Le percement de la galerie circulaire axiale se fit dans d'excellentes conditions avec terrassement au marteau piqueur sans explosif. Des cintres HEA 160 furent placés à l'avancement tous les mètres, avec prérevêtement immédiat en béton projeté sur 15 cm d'épaisseur (voir figure 8 montrant la tenue parfaite du front). Un anneau de béton complète le revêtement après exécution de l'excavation jusqu'au jurassique.

Délais d'exécution :

- Injection chambre 2, chambre de drainage, drains : 28-6-71 au 16-12-71.
- Percement jusqu'au Pm 2068 y compris chambre de travail n° 3 : 10-11-71 au 18-1-72.

5.1.2 Traitement préalable et percement en grande section (fig. 9)

Le traitement du terrain correspondant à l'ouverture en pleine section, était projeté initialement à l'aide d'une série de forages radiaux exécutés autour de la galerie axiale. Le projet fut modifié de façon à permettre de poursuivre sans attendre, parallèlement au traitement de terrain, l'excavation de la galerie dans le calcaire jurassique au-delà du Pm 2068.

La méthode choisie avait un double avantage :

1. Réduire encore la charge hydrostatique (drainage par la galerie axiale elle-même) et par là diminuer l'épaisseur du traitement nécessaire au percement de la grande section.
2. Reconnaître immédiatement par galerie le calcaire jurassique au-delà de l'accident. La galerie axiale fut ainsi poursuivie sans revêtement à l'abri d'un pilotage systématique par sondages carottés de 200 m de longueur et exécutés à partir de niches latérales en dégageant ainsi le gabarit de la galerie.

Les forages de traitement furent donc exécutés à partir de 3 chambres latérales implantées dans le calcaire des épointes comme indiqué sur la figure 9. Disposés sensiblement longitudinalement par rapport à l'axe du tunnel, ils furent implantés de façon à assurer la consolidation d'un cylindre de diamètre 21 mètres dans le calcaire fracturé (4 m d'épaisseur

Fig. 7 Galerie Droite
Chambre latérale de drainage : Vue générale des têtes des drains.

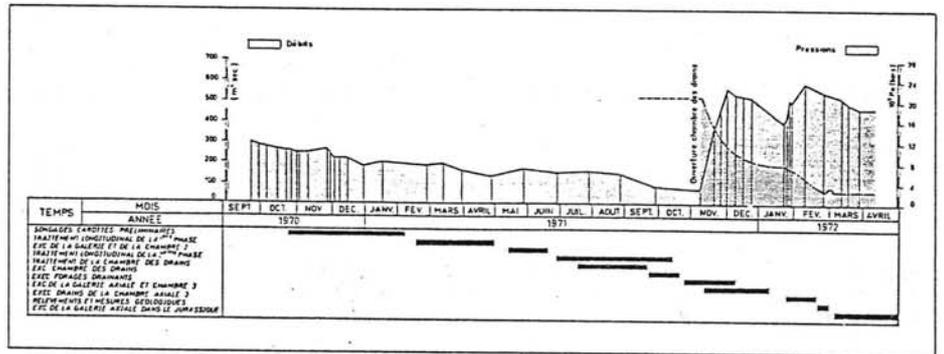
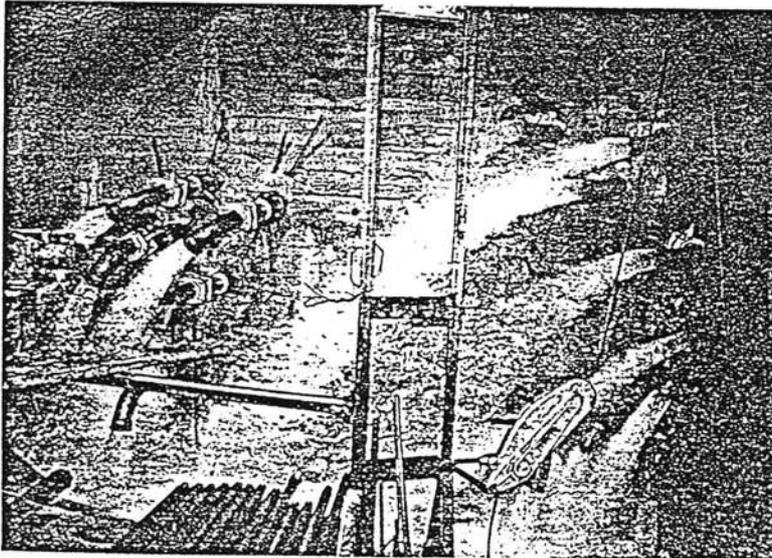


Fig. 6 Galerie Droite
Evolution des débits d'exhaure et des pressions hydrostatiques au cours des différentes phases de travail.

$$R = 1,6 \text{ et } 25 \text{ m au droit des zones mylonitisées (6 m d'épaisseur de traitement, } r = 2).$$

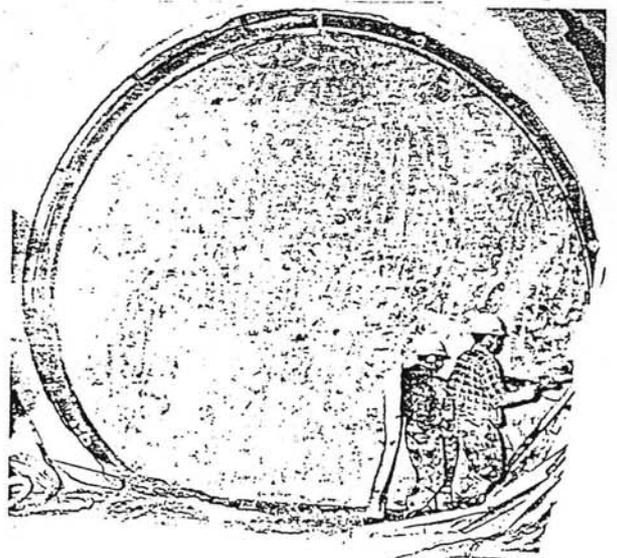
La réduction de l'épaisseur de l'anneau traité fut rendue possible par la chute de pression hydrostatique (stabilisée à 0,3 MPa) sous l'effet du drainage dû à la poursuite de la galerie axiale au-delà de la faille. Les conditions d'injection et les critères d'espacement entre forages furent identiques à ceux fixés pour le traitement de la petite galerie.

Les travaux de consolidation concernant la grande section y compris les travaux préliminaires de protection des chambres de travail, furent exécutés du 26 février 1972 au 6 septembre 1972.

L'excavation du tunnel fut entreprise plus tard pour des raisons de planning de l'entreprise générale. Les terrassements exécutés au marteau piqueur sans emploi d'explosif ne posèrent aucune difficulté, la pose de cintres précédant de plusieurs mètres le prérevêtement en béton projeté : la figure 10 donne une bonne idée de la nature du terrain consolidé et de sa tenue pendant l'excavation.

— Le volume total des travaux de consolidation concernant la galerie droite se décompose de la façon suivante :

Fig. 8 Galerie Droite
Terrain injecté (mylonite) au front de la galerie axiale de diamètre 3,50 m en cours de percement.



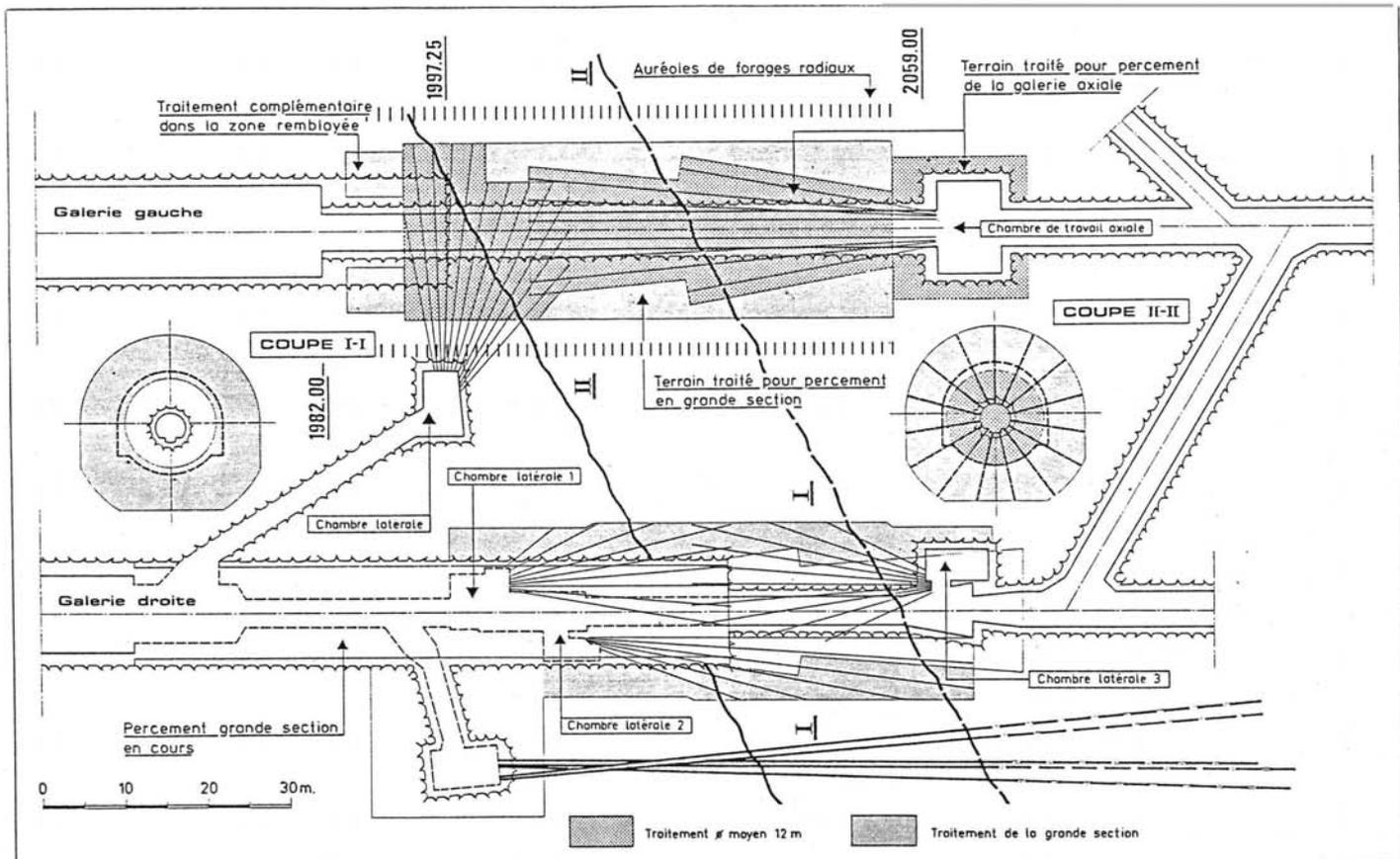


Fig. 9 Galeries Droite et Gauche
Différentes phases de travail (Galerie axiale et pleine section).

- Forages à l'avancement : 12 300 ml.
- Reforages : 61 500 ml.
- Injections bentonite-ciment : 3 150 tonnes (ciment + bentonite).
- Injection gel de silice : 5 340 tonnes (silicate + réactif).

5.2 Galerie Gauche (fig. 9)

La présence de terrain remanié et plus ou moins décomprimé par le débouillage au Pm. 1997

ne pouvait que rendre particulièrement délicats traitement de terrain et percement du tunnel gauche. Les bonnes conditions dans lesquelles fut exécutée la traversée de l'accident par la voie droite conduisit le maître de l'œuvre à confirmer son choix de maintenir le tracé de l'ouvrage sans déviation pour le franchissement de la faille. La chute de la pression hydrostatique à 0,1 MPa constituait en outre un élément favorable à ce projet. Il fut même possible de commencer le terrassement partiel de la zone remblayée après destruction du bouchon de béton. La figure 11 illustre cette phase de travail aux environs du Pm 1975.

5.2.1 Galerie axiale de \varnothing 3,50 m

Cette première phase de traitement concernant la galerie axiale fut réalisée à partir de deux chambres de travail :

- l'une située dans l'axe du tunnel dans l'éponte amont de calcaire jurassique (masque en béton au Pm 2059) ;
- l'autre latérale, à droite du tunnel et axée perpendiculairement à ce dernier au niveau du Pm 1997. Sa galerie d'accès part de la chambre n° 1 de la galerie droite, à l'aval de l'accident (fig. 9). Le traitement et le percement ont été exécutés en un seul bond entre les Pm 1982 et 2059.

Fig. 10 Galerie Droite
Terrassement en grande section Aspect du terrain injecté au front (impregnation au gel et claquages au coulis argile-ciment).



Fig. 11 Galerie Gauche
Terrassement dans la zone remblayée au Pm 1975.



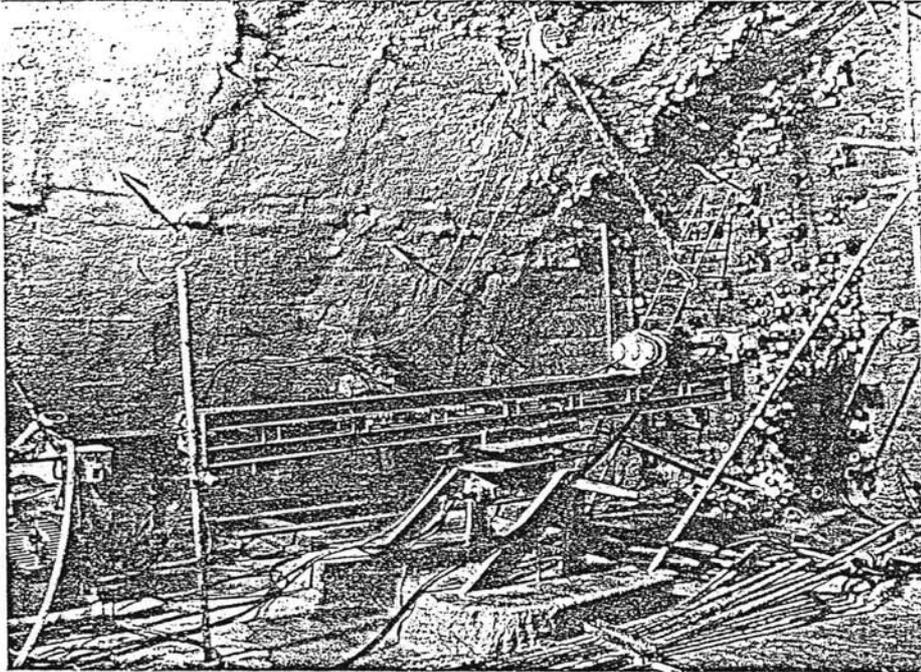


Fig. 12 Galerie Gauche
Chambre de travail amont. Perforatrice hydraulique en cours de travail.

Le diamètre du cylindre de terrain traité a été fixé à 12 m correspondant à une valeur de $\frac{R}{r} = 3$ (4 m d'épaisseur à l'extrados de la galerie).

Les forages de traitement étaient disposés longitudinalement par rapport à l'axe du souterrain à partir de la chambre amont (fig. 12). La chambre latérale aval, après une reconnaissance complémentaire de l'épente au droit du débouillage permit l'exécution d'une série d'auroles de forages de traitement transversaux de part et d'autre du Pm 1997.

Les modalités d'exécution des forages et injections d'une part, de l'excavation d'autre part, furent semblables à celles mises au point pour la galerie de droite. Il faut signaler cependant :

— En ce qui concerne le traitement, un recyclage systématique d'un forage sur deux en particulier dans la zone de débouillage, ainsi qu'un contrôle particulièrement soigné du traitement par carottage avant percement.

— En ce qui concerne l'excavation depuis l'aval, quelques difficultés pour le démarrage de la galerie dans le matériau de remplissage non traité au Pm 1982.

Le traitement de terrain a été réalisé du 18 septembre 1972 au 21 février 1973 y compris les contrôles avant démarrage de l'excavation.

A la fin mars 1973, les 2 attaques de percement (amont et aval) faisaient leur jonction, matérialisant la

traversée de la faille de la Valle Freda dans l'axe des deux tunnels.

5.2.2. Traitement de terrain et percement en grande section

Compte tenu du planning général d'avancement des travaux (poursuite de la galerie de petit diamètre dans l'axe du tunnel droit) la galerie axiale gauche se trouvait entièrement disponible pour le traitement de terrain relatif à la pleine section. Les injections ont donc été réalisées à partir d'une série d'auroles de forages radiaux, perpendiculaires à l'axe du tunnel et exécutées depuis la galerie elle-même.

Le diamètre du cylindre de terrain traité a pu être réduit à 22 m (épaisseur de terrain injecté 4,5 m, $\frac{R}{r} = 1,7$), la charge hydrostatique étant particulière-

ment faible.

Un complément de traitement en diamètre 21 m a été réalisé au droit de la zone remblayée entre les Pm 1985 et 1997 eu égard aux difficultés de percement de la petite galerie à son attaque aval. Le dispositif de forage comporte 44 auroles de forages radiaux, tubés dans la partie déjà injectée correspondant au cylindre de diamètre 12 m. L'équidistance entre auroles était de 1,25 m, les forages étant distants de 5 à 6 m à leur extrémité sur une même aurole, suivant la nature des terrains.

Les injections furent exécutées suivant la méthodologie précédemment décrite à partir de la centrale implantée dans le tunnel gauche à l'amont du bouchon de béton (fig. 13).

Les contrôles systématiques en fin de traitement conduisirent à exécuter quelques forages et injections complémentaires à proximité immédiate et en amont du Pm 1997.

Le traitement de terrain fut mené à bien entre mai et septembre 1973, parallèlement au percement de la galerie droite en pleine section.

Les travaux de percement ont été conduits sans aucune difficulté suivant la même technique pour les deux tunnels (fig. 14).

— Volume des travaux de consolidation en galerie gauche :

Forages : 14 100 ml.

Reforage : 54 600 ml.

Injection bentonite-ciment : 2 490 tonnes (ciment + bentonite).

Gel de silice : 4 095 t (silicate + réactif).

6 RESULTATS DES CONTROLES EFFECTUES SUR TERRAIN CONSOLIDE

6.1 Caractéristiques mécaniques

Avant chaque phase d'excavation, une série de forages carottés ont été exécutés dans la masse

Fig. 13 Galerie Gauche
Premier plan : Centrale d'injection.
Arrière plan : Bouchon de béton établi au moment de l'accident perforé pour la reprise de l'avancement depuis l'aval.





Fig. 14 Galerie Gauche
Excavation en grande section après traitement de terrain à partir de la galerie axiale.

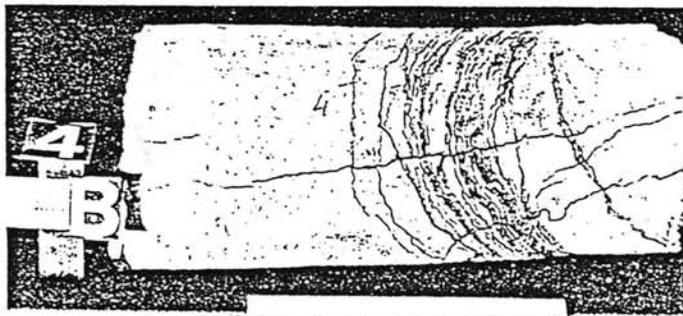
du terrain traité de façon à contrôler tant l'homogénéité de la consolidation que la résistance du terrain injecté. Les hypothèses faites au stade du projet pour la détermination de l'épaisseur de l'anneau traité, comportaient des valeurs minimales de caractéristiques mécaniques à obtenir pour assurer la stabilité de l'excavation au cours du percement.

Ce contrôle s'est avéré satisfaisant dans la majorité des cas et n'a impliqué aucune injection complémentaire, mis à part un traitement réduit: en galerie gauche au voisinage du Pm 1997 sous le radier de l'ouvrage (point d'origine du déboufrage d'octobre 1970).

Nous indiquons ci-après les moyennes des résultats obtenus sur plusieurs dizaines d'échantillons carottés (carottier double \varnothing 115 mm) et analysés en laboratoire. Ils concernent les zones broyées intéressant la galerie droite :

— Mylonite (très fine granulométrie) :
Densité $\gamma_d = 2,4$ à $2,7$.

Fig. 15 Echantillon carotté dans une zone de mylonite injectée. (Impregnation au gel et claquage au coulis ciment-bentonite).



Résistance à la compression simple : $R_c = 3$ à 6 MPa
(30 à 60 bars)

— Cataclasite calcaire (calcaire broyé, aspect brechique) :

$\gamma_d = 2,4$ à $2,7$

$R_c = 8$ à 9 MPa

L'aspect des carottes (fig. 15, 16 et 17) indique bien une imprégnation complète par le gel de silicate dans les zones broyées les plus fines, le coulis argile-ciment étant venu claver l'ensemble par claquages successifs et augmenter la résistance mécanique.

6.2 Examen microscopique sur lames minces

Une étude plus poussée a permis de se rendre compte du mode d'imprégnation du gel dans les zones mylonitisées. Une recherche microscopique

sur lames minces a été conduite en colorant la silice colloïdale par une solution à 2 % de vert malachite (solution organique).

Cet examen a permis de déceler trois modes différents d'imprégnation du terrain par le gel de silice :

- Remplissage de microfissures et vides préexistants. Ceci est visible dans les zones de cataclasite non complètement broyées.
- Imprégnation homogène dans les zones entièrement mylonitisées.
- Diffusion du gel à partir de voies préférentielles, plus ou moins ramifiées (effet attribué aux fortes pressions d'injection).

Une détermination statistique sur les sections les plus représentatives a été faite à l'aide d'une grille d'intégration dans le but d'évaluer la quantité de gel présente dans le terrain traité. Pour les trois modes d'imprégnation ci-dessus décrits, on a pu relever les résultats suivants :

Fig. 16 Echantillon carotté de « cataclasite » injectée

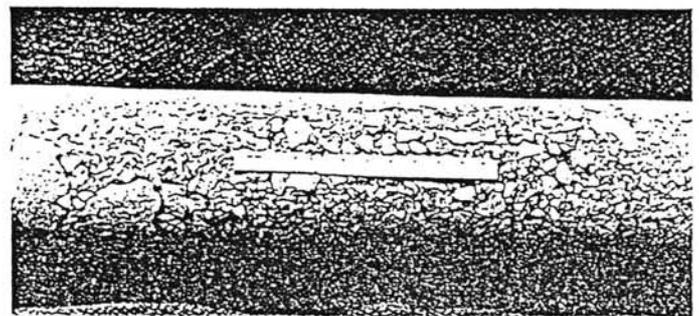


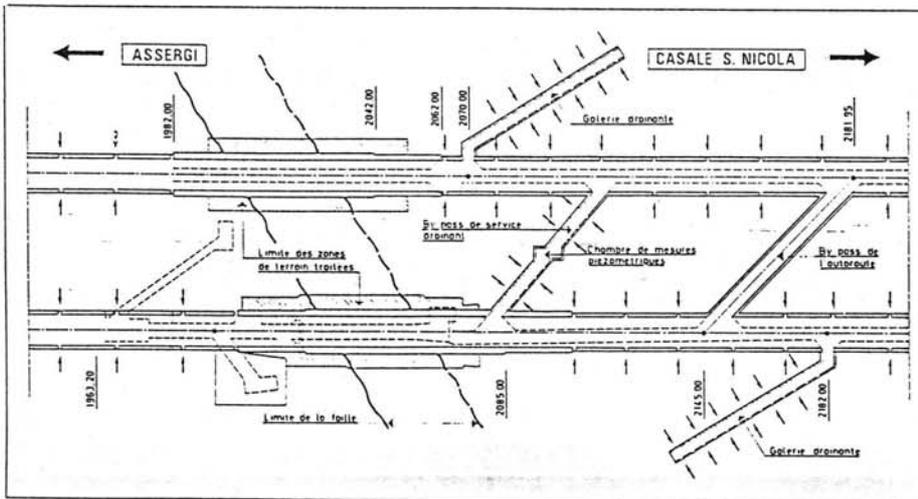


Fig. 17 Carotte de calcaire fracturé après traitement.

- Remplissage de vides et fissures préexistantes : 3 à 5 % du volume du terrain.
- Diffusion à partir de circulations préférentielles : 15 % du volume du terrain.
- Imprégnation homogène : 25 % du volume du terrain.

L'ensemble des plaques minces observées montre dans tous les cas un bon remplissage des vides entre grains assurant la consolidation effective du terrain broyé.

Fig. 18 Vue en plan des galeries terminées. Dispositif de drainage définitif.



7 DRAINAGE DEFINITIF DERRIERE LE REVETEMENT

L'anneau de terrain traité ne peut être considéré comme rigoureusement étanche surtout à titre définitif. On peut donc craindre, en l'absence de tout dispositif approprié, une reconstitution de la pression hydrostatique derrière le revêtement des tunnels, pression pouvant atteindre la valeur initialement mesurée, soit 2 MPa.

Il n'était pas réaliste de prendre en compte une telle charge, ce qui conduisait à des épaisseurs de béton armé considérables (et qui impliqueraient une excavation de section supérieure).

On a donc prévu un dispositif de drainage établi à titre définitif à la base des piédroits de la voûte, au droit des zones de calcaire fissuré à l'amont et à l'aval de la faille, permettant de maintenir la pression hydrostatique à une faible valeur.

Ce réseau de drainage comporte (fig. 18) :

- dans les tunnels eux-mêmes, des forages rayonnants débouchant dans un drain de base en radier et collaturé par le réseau d'exhaure disposé sous l'ouvrage ;

— des galeries spécifiques de drainage implantées dans le calcaire jurassique de l'éponte amont. La direction de ces galeries est sensiblement perpendiculaire à celle de la faille de la Vallée Freda de façon à recouper de façon optimale les fractures et fissures du calcaire.

Une chambre de mesure piézométrique permet le contrôle permanent de différentes prises de pression établies tant dans la masse des terrains broyés que dans les épontes de la faille.

Les problèmes posés par le franchissement d'accidents tectoniques majeurs comportant des terrains broyés sans cohésion sous forte charge d'eau, ont souvent été résolus par la méthode des injections de consolidation préalablement au percement. Les exemples concernant des galeries d'aménagement hydroélectrique ne manquent pas tant en France (Roselend, Mont Cenis) qu'à l'étranger : Hongrin Léman (Suisse), Litani, (Liban)...

L'originalité des travaux réalisés dans le Tunnel du Gran Sasso, pour la traversée de la faille de la Vallée Freda, réside dans les modalités d'application de la méthode à des conditions particulièrement difficiles :

1. Section d'excavation considérable (80 m²).
2. Traversée au droit de terrain remanié par débouillage sans déviation du tracé pour le franchissement de l'accident.

Les difficultés n'ont pu être surmontées et les problèmes résolus, que grâce à la collaboration étroite et permanente entre maître d'œuvre et constructeurs. Le succès obtenu est également dû à l'expérience des entreprises générales et spécialistes, l'imbrication des travaux de Génie Civil et de traitement de terrain impliquant là aussi une collaboration exemplaire.

— Maître d'œuvre : Società Autostrade Romane Abruzzesi p. A. (Sara). Directeur-général : M. Francesco Bruni.

— Ingénieurs conseils : M. Baldouin, Geotecnica Milano; M. Taroni, Entreprise Farsura, Milano.

— Entreprise générale : Cogefar S.p.A. Milano. Directeur des travaux : M. Antiga.

Les travaux spécialisés (forages, injections, drains, sondages de reconnaissance) ont été réalisés par l'association des Entreprises S.I.F. - Entreprise Bachy, Paris et Geotecnica, Milan.