

# La traversée d'accidents géologiques: l'exemple du franchissement de la faille de la Valle Fredda par le tunnel autoroutier du Gran Sasso

Pietro Lunardi, Milano

## 1. Introduction

Dans la réalisation d'un ouvrage souterrain, il peut se produire, au cours des opérations normales d'avancement, des phénomènes de déformation sur le front de taille ou dans la cavité. S'ils sont importants, ces phénomènes pourraient entraîner des arrêts de travail très prolongés et des répercussions négatives considérables sur le plan économique ainsi que sur celui des contrats et sur celui de la sécurité. Généralement, toutes les fois qu'ils se produisent, ils font l'objet d'une stricte confidentialité. Les motifs sont très nombreux et notamment:

- le fait qu'ils fassent souvent l'objet de disputes de type contractuel pouvant déboucher sur des contentieux très délicats voire interminables;
- des exigences d'image qui poussent à rendre de préférence publics les succès et pas les échecs.

Or il serait tout à fait profitable de parler également de ces derniers car il est possible d'en tirer des enseignements utiles en vue d'une meilleure conception, d'une meilleure construction et, en définitive, d'une augmentation accrue de la sécurité des excavations telles qu'on les exige aujourd'hui.

Si nous analysons les causes des déformations qui se produisent le plus souvent dans les tunnels, nous voyons, en première analyse qu'il peut s'agir:

- de déformations provoquées par des négligences dans la conception et dans la construction ou encore résultant d'un respect non scrupuleux du projet par le maître d'ouvrage;
- de déformations provoquées par la traversée d'accidents géologiques.

Le présent rapport examine tout particulièrement ces dernières alors que nous renvoyons la discussion sur les autres à plus tard.

Parlant de déformations provoquées par la traversée d'accidents géologiques, il est important de bien nous

mettre d'accord sur ce dont il s'agit réellement et sur les raisons pour lesquelles elles se produisent.

Toute singularité modifiant la régularité de l'équilibre géologique, tectonique ou hydrologique du massif à traverser et rendant nécessaire d'adopter des contre-mesures appropriées pour surmonter l'obstacle, peut être considérée comme un accident géologique.

La traversée de ces accidents dans le tunnel, au cours des opérations d'avancement, peut aboutir à des phénomènes de déformation notamment si elle survient à l'improviste et en l'absence de la préparation nécessaire du chantier.

La figure 1 montre la liste des accidents géologiques les plus courants et fournit pour chacun d'eux, les indications de prévisibilité / imprévisibilité en fonction du moyen d'investigation adopté. Les accidents géologiques peuvent effectivement être prévisibles ou imprévisibles selon:

- le type d'accident;
- les moyens de prospection utilisés dans la campagne géognostique préventive (sondages traditionnels à partir de la surface, galerie pilote, etc.);
- les conditions sur le contour de l'ouvrage à réaliser, autrement dit les couvertures en jeu et la morphologie du terrain à traverser.

Une campagne géognostique bien faite et correctement conçue permet de prévoir la plupart des accidents géologiques. Il en est toutefois quelques-uns qui restent imprévisibles même après des campagnes géognostiques coûteuses et approfondies. Un exemple: Les coups de toit qui, contrairement à ce que nous pourrions nous attendre, peuvent se produire d'une manière apparemment tout à fait fortuite, même sous des couvertures faibles. Rappelons à ce sujet le tunnel de Quincetto (Autostrada dei Trafori) où se sont produits des phénomènes de ce genre dans les gneiss amphibolytiques sous moins de 300 m de couverture à cause des con-

traintes élevées emmagasinées par les roches au cours des processus tectoniques et criogénétiques.

Les accidents tectoniques vraiment imprévisibles sont toutefois peu nombreux. Tout dépend, dans une large mesure – nous l'avons déjà dit – de ce que nous sommes disposés à dépenser en investigations géognostiques préliminaires. Ceci implique le besoin de procéder à des choix faits sur la base d'une évaluation correcte des coûts et des bénéfices qui en résultent. Aujourd'hui, conscients des conséquences négatives que peuvent provoquer des accidents tectoniques inattendus, nous dépensons bien plus que par le passé pour les investigations préliminaires. Elles deviennent un véritable investissement pour l'économie et la sécurité des excavations qui pourront ensuite se dérouler régulièrement,

dans le respect des délais et des coûts prévus par les devis.

Lorsque les couvertures sont relativement basses et lorsque la morphologie des sites le permet, les investigations peuvent consister en une série de sondages poussés depuis la surface et au-delà de la hauteur du projet, le long de l'axe du tracé. En revanche, lorsque les couvertures sont élevées et lorsque la longueur de l'ouvrage à réaliser n'est pas excessivement réduite, elles peuvent consister à perforer par tunnelier une galerie pilote de diamètre réduit le long de l'axe du futur tunnel. Enfin, si la conformation morphologique particulière, la couverture des sites, l'importance de l'ouvrage ou autre déconseillaient ces deux types d'investigation, il est toujours possible de procéder, au cours de

l'avancement, à des sondages horizontaux systématiques, lancés en amont du front de taille pour une profondeur appropriée.

Opérant de cette manière, il est possible de limiter les problèmes provoqués par les accidents géologiques aux très rares situations vraiment imprévisibles.

En ce qui concerne les accidents tectoniques et les déformations qui s'ensuivent, la littérature technique, pour les raisons citées plus haut, est avare de rapports réellement exhaustifs. Cela est tout à fait regrettable car il est toujours commode de pouvoir se référer à des expériences passées sur des thèmes aussi délicats. Ce rapport essaie à sa manière de contribuer à combler cette lacune. Il s'agit de l'expérience faite par l'auteur il y a plus de vingt ans à l'occasion des travaux de réalisation du tunnel du Gran Sasso, lorsque l'avancement du tunnel se heurtait sans qu'on s'y attende le moins du monde à la faille de Valle Fredda, constituée de calcaires fortement mylonitisés et intéressée par une nappe d'eau d'une hydrostatique de 200 m par rapport à la hauteur du tunnel.

Figure 1 Types d'accidents géologiques

|                                                                            |  | PRÉVISIBILITÉ              |
|----------------------------------------------------------------------------|--|----------------------------|
| failles ou plis                                                            |  | <br>très élevée<br>élevée  |
| eau en pression                                                            |  | <br>très élevée<br>élevée  |
| eau en pression dans terrains sans cohésion                                |  | <br>très élevée<br>élevée  |
| coups de toit                                                              |  | <br>faible<br>très faible  |
| roche fluant sous le poids de la montagne                                  |  | <br>très élevée<br>moyenne |
| gonflement par phénomènes de altération physico-chimique                   |  | <br>très élevée<br>élevée  |
| états de contrainte anormaux dans le milieu liés à l'instabilité de pentes |  | <br>élevée<br>élevée       |
| gaz                                                                        |  | <br>très élevée<br>moyenne |
| gradients thermiques élevés                                                |  | <br>très élevée<br>élevée  |
| contacts tectoniques anormaux                                              |  | <br>très élevée<br>élevée  |
| cavités karstiques                                                         |  | <br>faible<br>très faible  |



par galerie pilote

par adéquates investigations de surface et profondes

La description générale des caractéristiques de l'ouvrage sera suivie de la description détaillée de la traversée de l'accident géologique et de ses conséquences. Suivront la description des investigations faites pour l'étude du phénomène et des travaux effectués pour surmonter le problème ainsi que les conclusions que nous en avons pu tirer.

## 2. Généralités sur le tunnel du Gran Sasso

### 2.1 Caractéristiques du souterrain

La traversée en souterrain, longue de 10'170 m, a comporté 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 ont été exécutés à partir de deux attaques, à chacune de leur extrémité:

- Versant SO: Attaque Assergi longue de 5100 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 (fig. 3):

Section d'excavation moyenne: 80 m<sup>2</sup>

Section utile: 55 m<sup>2</sup>

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:  
1300 m

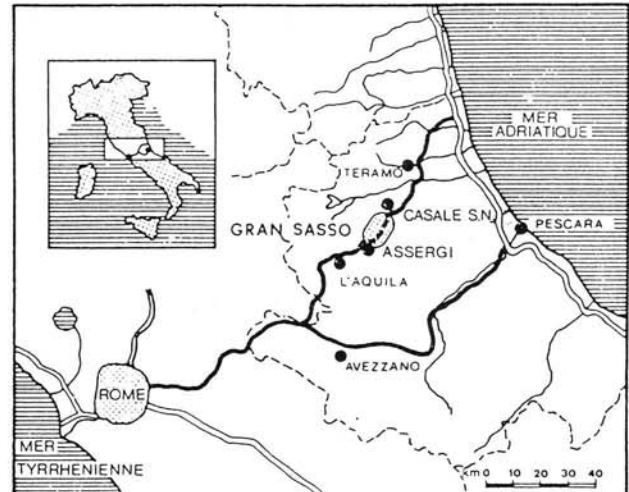
Le projet de ventilation comporte deux puits situés à environ 2000 m de l'entrée de chaque attaque et profonds respectivement de 250 m et 70 m. Côté Casale, il est prévu en outre une galerie de service entre les deux souterrains et parallèle à ceux-ci sur une longueur d'environ 2600 m. Sa cote est inférieure à celles des tunnels et ses dimensions légèrement plus modestes (excavation 56 m<sup>2</sup>, section utile 40 m<sup>2</sup>).

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

### 2.2 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

Figure 2 Tunnel du Gran Sasso, situation géographique



des formations marneuses d'âge tertiaire et ce sur 3000 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:

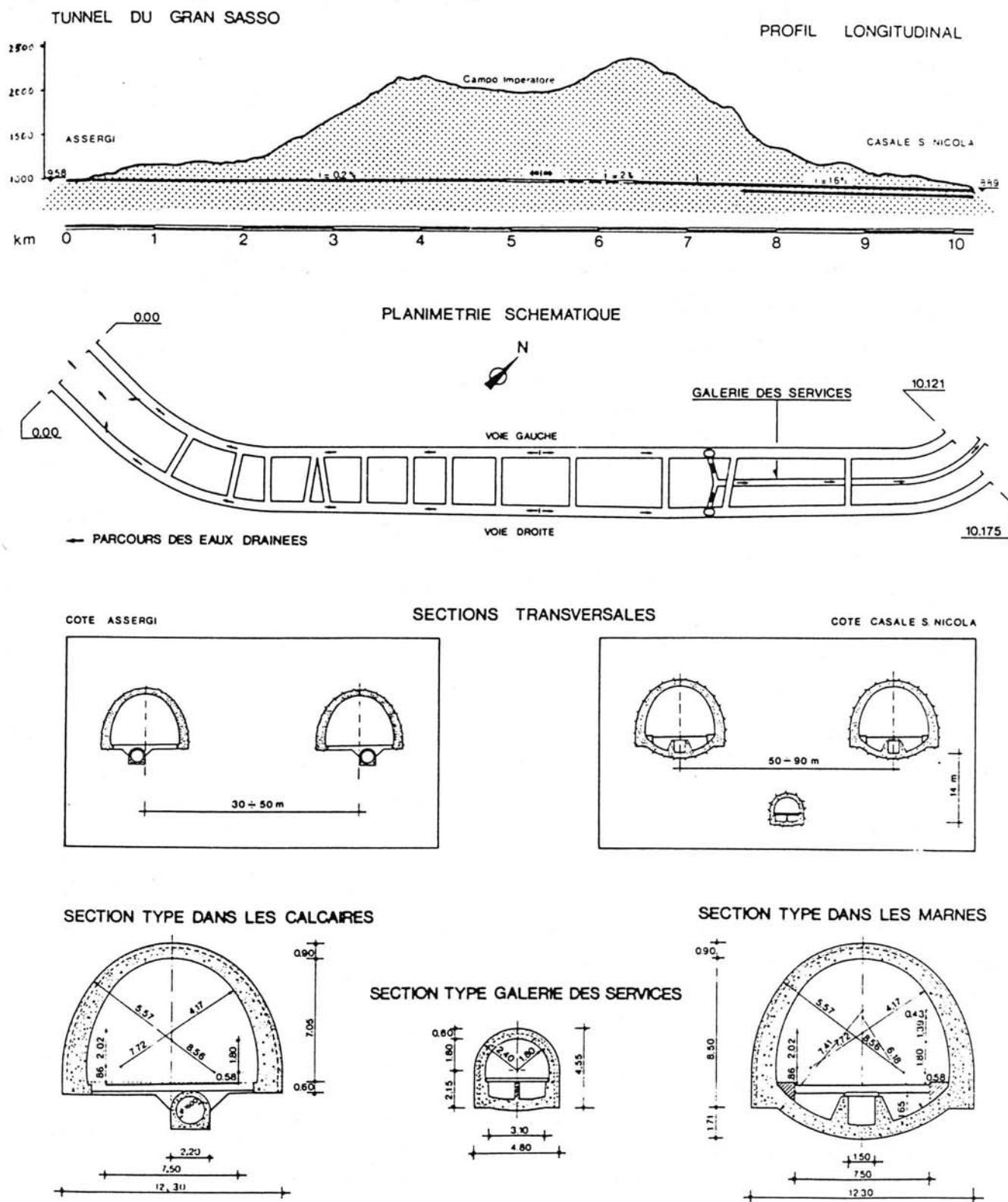
- Failles de direction apennine sensiblement perpendiculaires à l'axe des galeries.
- Failles de direction anti-apennine parallèles à cet axe.

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 est représenté sur la figure 4. 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 1200 m sur près 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.

Figure 3 Profil en long du tunnel. Caractéristiques des galeries de circulation et de service



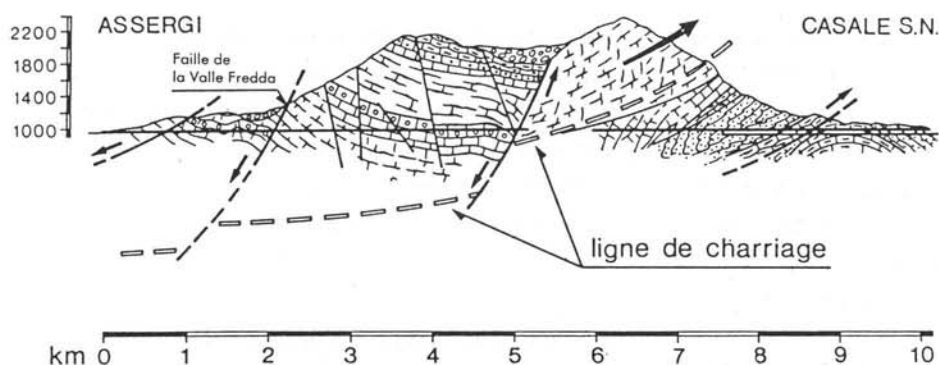


Figure 4  
Profil stratigraphique-  
tectonique à la traversée du  
massif du Gran Sasso

| FORMATION CALCAIRE - DOLOMITIQUE                          |  | FORM. MARNO-CALCAIRE       |                           |
|-----------------------------------------------------------|--|----------------------------|---------------------------|
| BLOC SURGLISSE                                            |  | BLOC TECTONISE             |                           |
| TECTONIQUE DE DETENTE<br>série normale                    |  | TECTONIQUE DE COMPRESSION  |                           |
|                                                           |  | série inverse              | série normale             |
| JURASSIQUE et CRETACE<br>calcaires dolomitiques calcaires |  | CRETACE<br>calcaires tect. | MIOCENE S.<br>flysch grès |
| AQUIFERE                                                  |  | IMPERMEABLE                |                           |

### 3. Circonstances de l'accident survenu au droit de la faille de la Valle Fredda

La faille de la Valle Fredda de direction antiapennine (transversale par rapport à l'axe des tunnels) fait buter deux compartiments calcaires, l'un d'âge crétacé, l'autre jurassique à 2000 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 dans la 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/s. 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 débouillage important de façon brutale avec un débit d'eau chargée à 4500 l/s 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 débouillage se faisant par pulsations successives avec des pointes de 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 by-pass. A travers ce bouchon obturant la section complète du tunnel, sont

placés un certain nombre de tubes d'exhaure de  $\varnothing 10''$  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.

L'ensemble de ces travaux était terminé le 30 septembre 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/s.

#### 4. Reconnaissance de la faille

Une reconnaissance par sondages carottés fut entreprise dès le mois d'octobre 1970 à partir du front de la Galerie droite (fig. 5).

6 sondages exécutés en carottage continu permirent de déterminer la position des épontes 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, sans de sécurité et sortie des carottiers, presse étoupe sur les tiges de forage et tubes de revêtement, contrôle rigoureux permanent du débit d'exhaure.

##### 4.1 Dispositions géométriques et caractéristiques du terrain

La figure 5 indique en plan et en élévation les résultats obtenus. La faille présente un pendage vers le front d'environ  $50^\circ$  et se caractérise en plan par une inclinaison de  $60^\circ$  sur l'axe des galeries. La puissance de l'accident dans l'axe de la galerie gauche est évaluée à 60 m, 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 cal-

caire complètement mylonitisé présentant l'aspect d'un silt, alternant avec des zones broyées d'aspect bréchique 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 épontes amont et aval fissuré et aquifère.

##### 4.2 Caractéristiques hydrauliques

Une série de piézomètres placés dans les épontes et dans le remplissage de l'accident nous ont permis 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 MPa (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 des épontes.

L'analyse des caractéristiques de la faille de la Valle Fredda, 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.



- 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 côtés amont et aval de l'accident.

## 5.2 Etablissement du projet de traitement

### 5.2.1 Dimensionnement de l'anneau traité

L'étude théorique du problème a été menée 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 terrains consolidé ainsi définies:

- épaisseur, explicitée par le rapport  $R/r$
- 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  $R/r$  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  $R/r$  obtenues varient de 1,5 (calcaire fracturé) à 3 (mylonite), la cohésion du terrain consolidé étant comprise entre 1 et 0,4 MPa.

### 5.2.2 Définition du traitement par injections

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

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

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, 2,5 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/E compris entre 0,5 et 1.

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° Be,  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 3,3$ ; 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 fixées 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.

## 6. Description des travaux de consolidation et de percement

### 6.1 Galerie droite (fig. 6)

#### 6.1.1 Galerie axiale de diamètre 3,5 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'éponte 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  $R/r \sim 2$ .

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 extré-

mité d'auréole était fixé normalement à 3 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 prérevêtement.

Délais d'exécution:

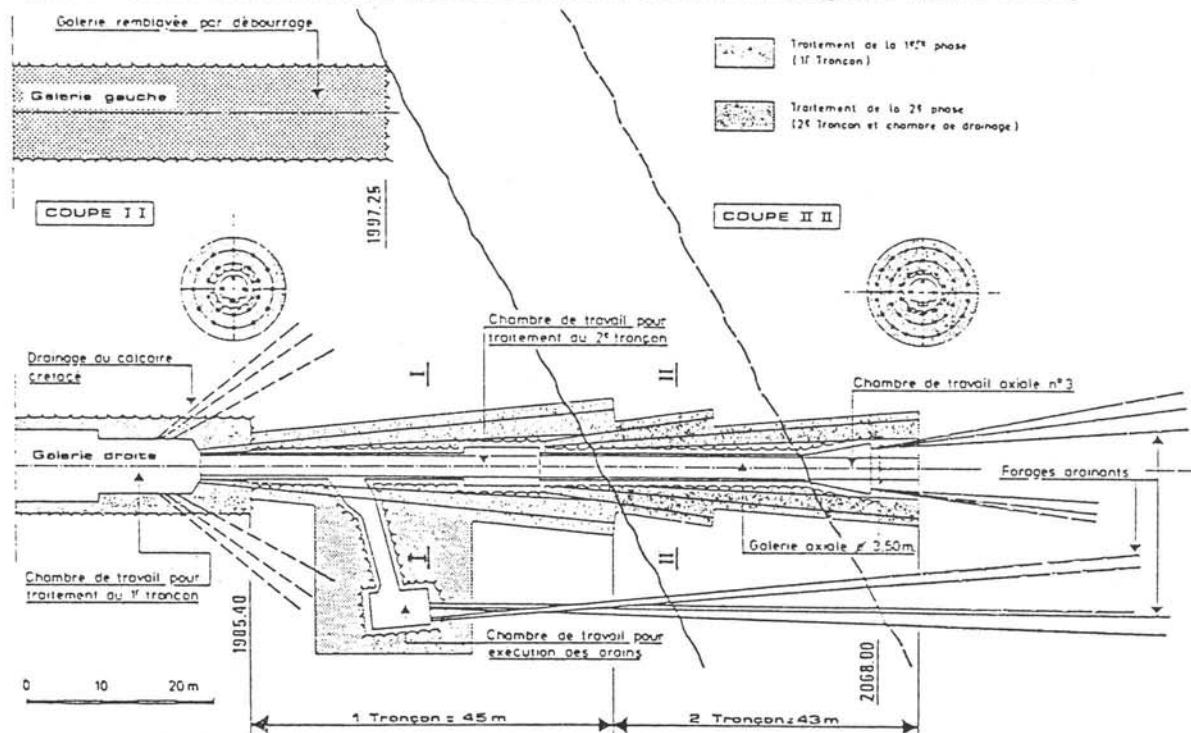
- Injection à partir de la chambre axiale 1: 8-2-71 au 12-5-71.
- Percement sur 41 m y compris chambre de travail n. 2: 13-5-71 au 19-6-71.

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 la reconnaissance et le 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  $R/r \sim 3$ .

Figure 6 Galerie droite: différentes phases de traitement et de percement (galerie axiale  $\varnothing$  3,50 m)



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 7 rend compte de l'évolution des débits et pressions maxima au cours des différentes phases de travail, la figure 8 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 pla-

cés à l'avancement tous les mètres, avec prérevêtement immédiat en béton projeté sur 15 cm d'épaisseur (voir figure 9 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: 26-6-71 au 16-12-71.
- Percement jusqu'au Pm 2068 y compris chambre de travail n. 3: 10-11-71 au 18-1-72.

### 6.1.2 Traitement préalable et percement en grande section (fig. 10)

Le traitement du terrain correspondant à l'ouverture en pleine section, était projeté initialement à l'aide d'une série de forages radiaux exécutés depuis la galerie axiale. Le projet fut modifié de façon de 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 présentait 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.

Figure 7 Galerie droite: évolution des débits d'exhaure et des pressions hydrostatiques au cours des phases de travail

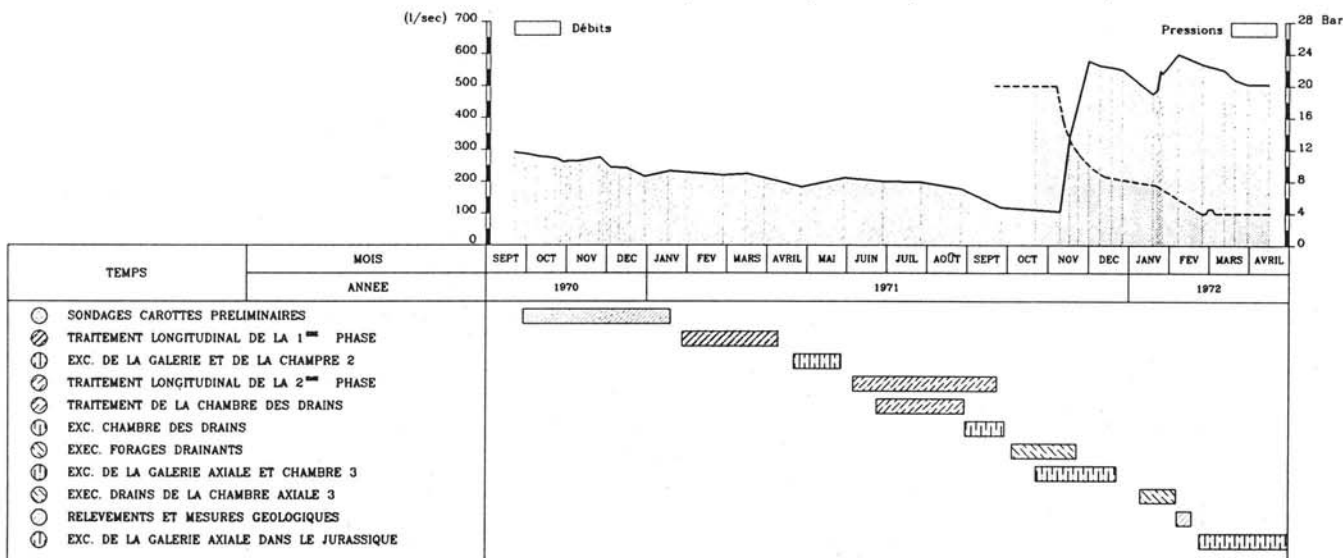


Figure 8  
Galerie droite - Chambre latérale de drainage:  
Vue générale des têtes des drains

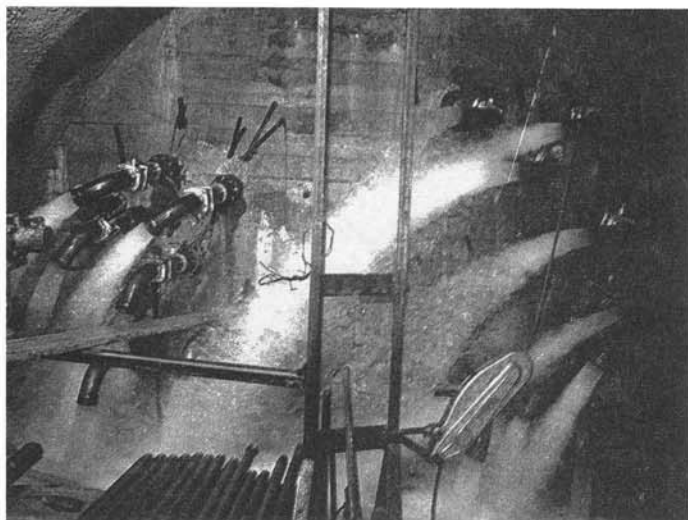


Figure 9  
Galerie droite: terrain injecté (mylonite) au front  
de la galerie axiale de diamètre 3,50 m en cours  
de percement

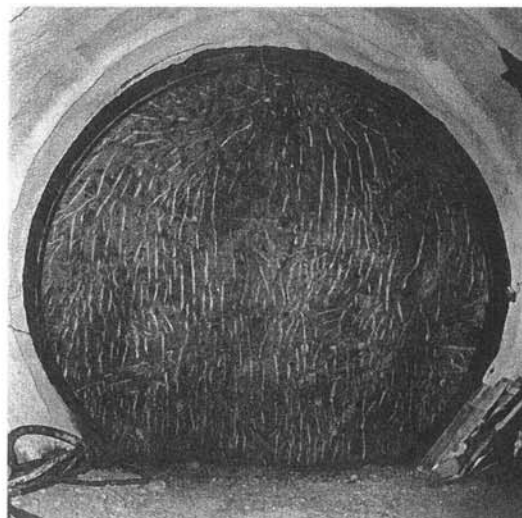
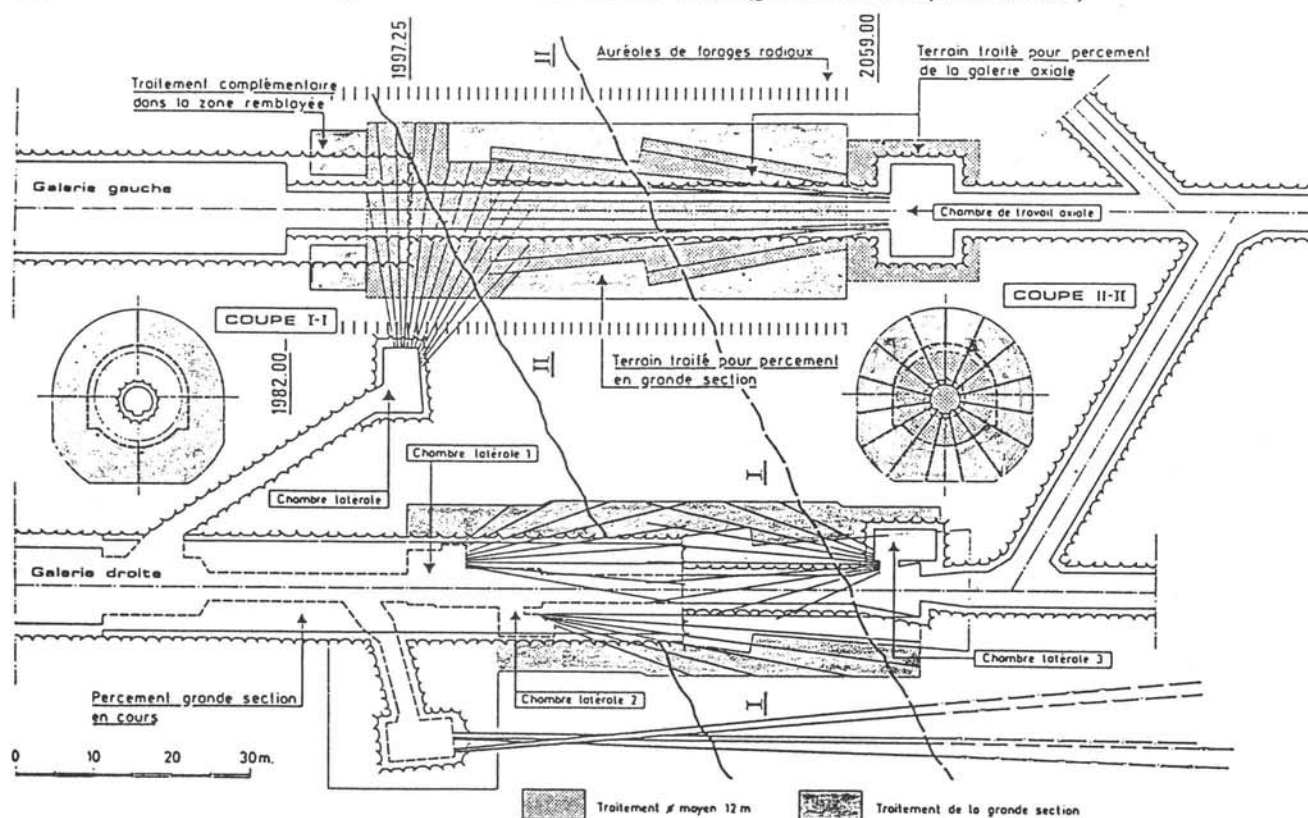


Figure 10 Galeries droite et gauche: différentes phases de travail (galerie axiale et pleine section)



Les forages de traitement furent donc exécutés à partir de 3 chambres latérales implantées dans le calcaire des épontes comme indiqué sur la figure 10. 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 m dans le calcaire fracturé

(4 m d'épaisseur de terrain traité,  $R/r = 16$ ) et 25 m au droit des zones mylonitisées (6 m d'épaisseur de traitement,  $R/r = 2$ ). La réduction de l'épaisseur de l'anneau traité fut rendue possible par la chute de pression hydrostatique (stabilité 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 11 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:

- forages à l'avancement: 12'300 m
- reforages: 61'500 m
- injections bentonite-ciment: 3150 tonnes (ciment + bentonite)
- injection gel de silice: 5340 tonnes (silicate + réactif)

Figure 11

Galerie droite: terrassement en grande section.  
Aspect du terrain injecté au front (imprégnation au gel et claquages au coulis argile-ciment)



## 6.2 Galerie gauche (fig. 10)

La présence de terrain remanié et plus ou moins décomprimé par le débouffrage au Pm 1997 ne pouvait que rendre particulièrement délicats le traitement de terrain et le percement du tunnel gauche. Les bonnes conditions dans lesquelles fut exécutée la traversée de

l'accident par la voie droite conduisit le maître d'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.

### 6.2.1 Galerie axiale de diamètre 3,5 m

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

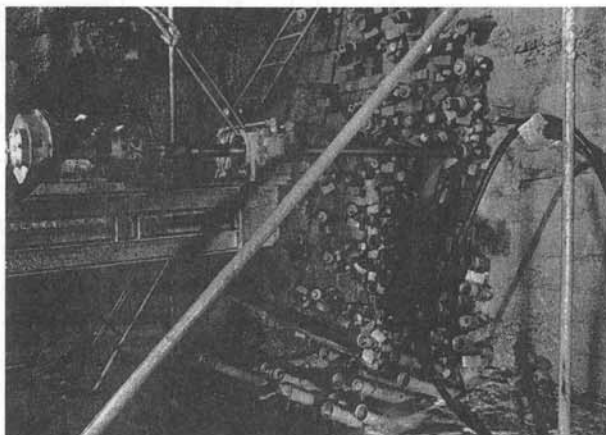
- l'une située dans l'axe du tunnel dans l'éponte amont de calcaire jurassique (masque en béton au Pm 2059),
- l'autre latérale, à droite du tunnel et axée perpendiculairement à ce dernier au niveau du Pm 1997. Sa galerie d'accès part de la chambre n. 1 de la galerie droite, en aval de l'accident (fig. 10). Le traitement et le percement ont été exécutés en un seul bond entre les Pm 1982 et 2059.

Le diamètre du cylindre de terrain traité a été fixé à 12 m correspondant à une valeur de  $R/r = 3$  (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'éponte au droit du débouffrage permit l'exécution d'une série d'auréoles de forages de traitement transversaux de part et d'autre du Pm 1997.

Figure 12

Galerie gauche: chambre de travail amont. Perforatrice hydraulique en cours de travail



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 Fredda dans l'axe des deux tunnels.

### 6.2.2 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'auréoles 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,  $R/r = 1,7$ ), la charge hydrostatique étant particulièrement 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 auréoles de forages radiaux, tubés dans la partie déjà injectée correspondant au cylindre de diamètre 12 m. L'équidistance entre auréoles était de 1,25 m, les forages étant distants de 5 à 6 m à leur extrémité sur une même auréole, suivant la nature des terrains.

Les injections furent exécutées suivant la méthodologie précédemment décrite à partir de la centrale implantée dans le tunnel gauche en amont du bouchon de béton.

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

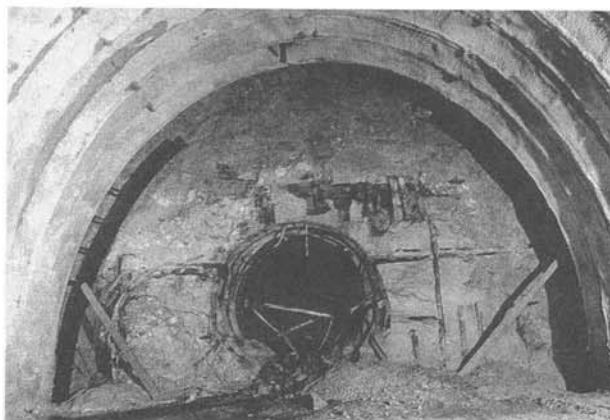
Le traitement de terrain fut mené à bien entre mai et septembre 1973, parallèlement au percement de la galerie droite en pleine section.

Les travaux de percement ont été conduits sans aucune difficulté suivant la même technique pour les deux tunnels (fig. 13).

Volume des travaux de consolidation en galerie gauche:

- forages: 14'100 m
- reforage: 54'600 m
- injection bentonite-ciment: 2490 tonnes (ciment + bentonite).
- gel de silice: 4095 t (silicate + réactif)

Figure 13  
Galerie gauche: excavation en grande section après traitement de terrain à partir de la galerie axiale



## 7. Résultats des contrôles effectués sur terrain consolidé

### 7.1 Caractéristiques mécaniques

Avant chaque phase d'excavation, une série de forages carottés ont été exécutés dans la masse 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 traité, comportaient des valeurs minimales de caractéristiques mécaniques à obtenir pour assurer la stabilité de l'excavation au cours du percement.

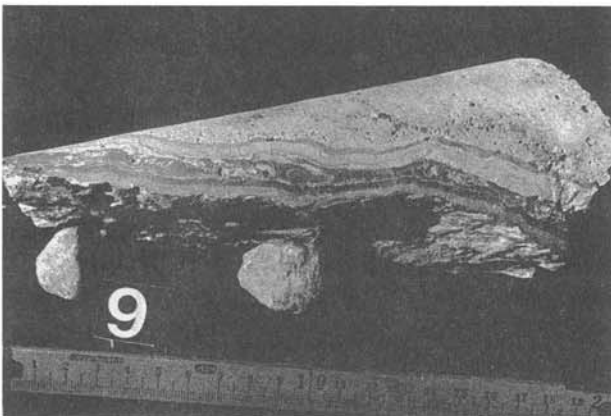
Ce contrôle s'est avéré satisfaisant dans la majorité des cas et n'a impliqué aucune injection complémentaire, mis à part un traitement réduit en galerie gauche au voisinage du Pm 1997 sous le radier de l'ouvrage (point d'origine du débouillage d'octobre 1970).

Nous indiquons ci-après les moyennes des résultats obtenus sur plusieurs dizaines d'échantillons carottés (carottier double Ø 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  $2,7$ ; résistance à la compression simple:  $R_c = 3$  à  $6$  MPa (30 à 60 bars)
- Cataclasite calcaire (calcaire broyé, aspect bréchi-que):  $\gamma_d = 2,4$  à  $2,7$ ;  $R_c = 8$  à  $9$  MPa

L'aspect des carottes (fig. 14) 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.

Figure 14  
Echantillon carotté dans une zone de mylonite injectée (imprégnation au gel et claquage au coulis ciment-bentonite)



### 7.2 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 des 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:

- 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.

## 8. Drainage définitif derrière le revêtement

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. 15):

- dans les tunnels eux-mêmes, des forages rayonnants débouchant dans un drain de base en radier et collature 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 Valle Fredda 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.

## 9. Considérations conclusives

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.

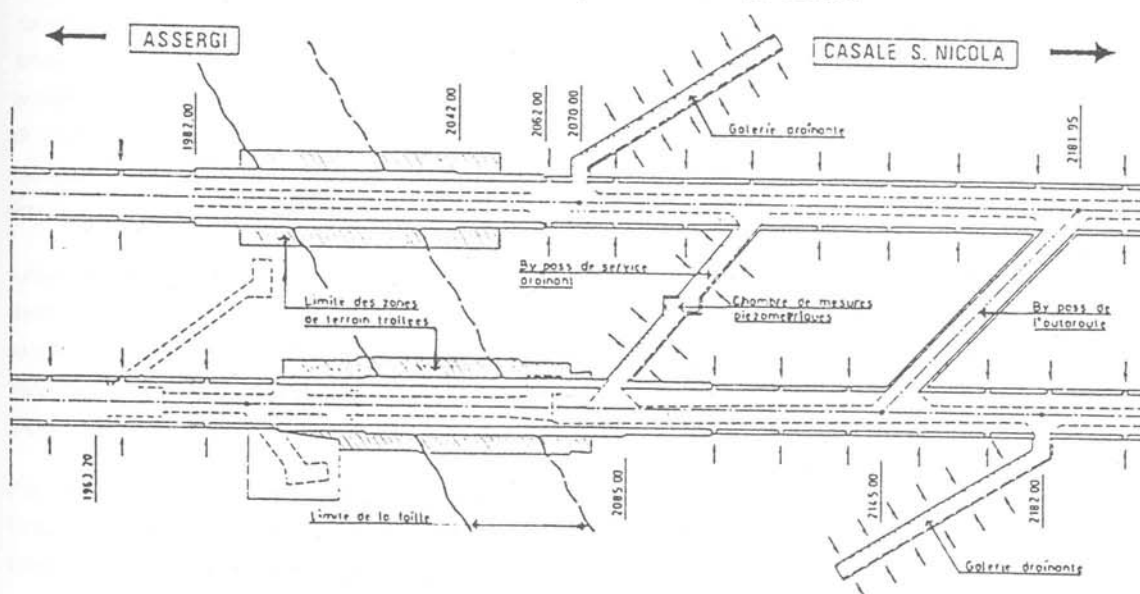
L'originalité des travaux réalisés dans le Tunnel du Gran Sasso, pour la traversée de la faille de la Valle Fredda, réside dans les modalités d'application de la méthode à des conditions particulièrement difficiles:

- Section d'excavation considérable (80 m<sup>2</sup>).
- Traversée au droit de terrain remanié par débouillage sans déviation du tracé pour le franchissement de l'accident.

Dans ce cas particulier, il était difficile d'imaginer de tomber sur de l'eau à 20 bars de pression sous 250 m de couverture seulement. Il y a lieu toutefois de préciser que si des investigations correctes avaient été faites sur le terrain au moyen de sondages de la surface ou lors de l'avancement du tunnel, l'accident géologique en question aurait, sans le moindre doute, été détecté en temps voulu de sorte qu'il aurait été possible d'y faire face correctement dès le début et d'éviter toutes les conséquences négatives dont nous avons parlé.

Tenant compte du fait que la faille de Valle Fredda a comporté un arrêt de chantier de plus de un an et demi, des coûts supérieurs à ceux d'une galerie pilote de petit diamètre, d'une longueur de 10 km environ, nous comprenons clairement l'intérêt qu'il y a à investir dans des investigations préliminaires afin d'éviter, le plus possible, les déformations liées aux accidents géologiques. Dans la mesure où la possibilité existe réellement d'étudier à priori et à fond les accidents sur lesquels nous risquons de tomber au cours des travaux d'excavation, il sera procédé à élaborer, avant de commencer la construction, à un projet ciblé et complet les concernant.

Figure 15 Vue en plan des galeries terminées. Dispositif de drainage définitif



En revanche, lorsque les caractéristiques de l'ouvrage à réaliser ou lorsque l'accès aux lieux d'investigation interdisent cette possibilité, il est nécessaire, dans tous les cas, d'opérer de manière à pouvoir les définir à distance – par exemple au moyen de sondages dans l'avancement, lancés au-delà du front de taille – et renvoyer au moment de la construction la mise au point du projet définitif (méthode observationnelle). C'est ce qui fut fait au Gran Sasso, après dépassement de la faille de Valle Fredda pour réussir à prévenir et à affronter d'autres situations similaires en présence de pressions d'eau jusqu'à 60 bars.

Agissant de la sorte, il est possible d'avancer dans le tunnel, toujours prêts à affronter et à surmonter la plupart des accidents géologiques dont nous connaissons à l'avance le type et l'emplacement.

### Bibliographie

- [1] J. Boutitie, P. Lunardi - *Franchissement d'un accident tectonique majeur par le tunnel du Gran Sasso* - 6<sup>e</sup> Congrès Européen de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondation. Vienne, 1976
- [2] P. Lunardi, P.G. Catalano - *Il traforo autostradale del Gran Sasso* - Edizioni COGEFAR S.p.A. Milan, 1979
- [3] P. Lunardi - *Applications de la mécanique des roches aux tunnels autoroutiers. Exemple des tunnels du Fréjus (côte Italie) et du Gran Sasso* - Revue Française de Géotechnique n. 12 (1979)