

FRANCHISSEMENT D'UN ACCIDENT TECTONIQUE MAJEUR PAR LE TUNNEL DU GRAN SASSO
CROSSING OF A MAJOR TECTONIC FAULT IN THE GRAN SASSO TUNNEL
DURCHFahren EINER GRÖßEREN TEKTONISCHEN STÖRUNGSZONE BEIM BAU DES GRAN SASSO-
TUNNELS

J. BOUTITIE, Ing. ENSG, Directeur Bureau Etudes S. I. F. – Entreprise Bachy, Paris, France

P. LUNARDI, Dr.-Ing., Directeur Bureau Etudes Cogefar, Milano, Italie



Reprint from the Proceedings of the 6th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering
Tiré-à-part des Comptes rendus du 6^e Congrès Européen de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations
Sonderdruck aus den Konferenzberichten der 6. Europäischen Konferenz für Bodenmechanik und Grundbau

FRANCHISSEMENT D'UN ACCIDENT TECTONIQUE
MAJEUR PAR LE TUNNEL DU GRAN SASSO

FRANCHISSEMENT D'UN ACCIDENT TECTONIQUE MAJEUR PAR LE TUNNEL DU GRAN SASSO
 CROSSING OF A MAJOR TECTONIC FAULT IN THE GRAN SASSO TUNNEL
 DURCHFAHREN EINER GRÖßEREN TEKTONISCHEN STÖRUNGSZONE BEIM BAU DES GRAN SASSO-TUNNELS

J. BOUTITIE, Ing. ENSG, Directeur Bureau Etudes S. I. F. - Entreprise Bachy, Paris, France
 P. LUNARDI, Dr.-Ing., Directeur Bureau Etudes Cogefar, Milano, Italie

SUMMARY

- Tectonic fault filled with crushed cohesionless soils under a high water pressure of 2 MPa. - Advance ground consolidation ahead of tunnel driving by means of a combined high pressure grouting of silicate gels and cement bentonite mixes. - Rock relief drainage on fault sides. - Very accurate work programme split in several stages on account of large section galleries. - Detailed controls and tests on the treated ground.

ZUSAMMENFASSUNG

- Durchqueren einer tektonischen Störungszone, die mit Gesteinsgrus verfüllt war, der unter hohem Wasserdruck stand (2 MPa). - Verfestigung der anstehenden Gesteinsschichten vor dem Tunnelausbruch durch eine kombinierte Silikat- und Bentonit/Zementinjektion unter hohem Injektionsdruck. - Entwässerung der Kontaktgesteine der Störungszone. - Aufstellung eines genauen mehrstufigen Arbeitsprogrammes wegen des grossen Tunnelquerschnittes. - Durchführung von Kontrollen und Versuchen im verfestigten Untergrund.

1°) Situation Générale - Circonstances du déboufrage au contact de la faille

1.1. - Caractéristiques du souterrain

- Le massif du GRAN SASSO d'ITALIA est traversé sur 10.170 m par l'autoroute assurant la liaison entre la ville de ROME et la mer Adriatique. Le franchissement en souterrain comporte deux tunnels parallèles excavés en section moyenne de 80 m² à partir de deux attaques d'extrémité, ASSERGI au S.W., CASALE SAN NICOLA au N.E.

- Le profil géologique correspondant à la traversée du massif est représenté sur la figure n° 1. Il s'agit essentiellement d'un ensemble sédimentaire à prédominance calcaire et dolomitique découpé en blocs par deux séries de failles, parallèles et perpendiculaires à l'axe des tunnels. Ce massif constitue un réservoir aquifère perméable en grand dont l'alimentation est favorisée par la présence d'une dépression topographique de grande surface, le CAMPO IMPERATORE.

L'excavation des tunnels dans ces conditions devait se heurter à deux types de difficultés :

- 1°) Charge hydrostatique importante sur la plus grande partie du tracé (600 m d'eau au PM 5000).
- 2°) Hétérogénéité des caractéristiques mécaniques du rocher en particulier à la traversée des accidents tectoniques.

1.2. Rencontre de la faille de la VALLE FREDA - Accident du PM 1997

- La faille de la VALLE FREDA, transversale par rapport à l'axe des tunnels, a été rencontrée par la galerie gauche à 2.000 m environ de son extrémité côté ASSERGI. Elle met en contact anormal deux compartiments calcaires, l'un d'âge crétacé, l'autre jurassique, tous deux fortement aquifères.
- L'accident s'est produit en galerie gauche, alors que l'avancement se poursuivait normalement en grande section dans un rocher fissuré mais de bonne tenue.

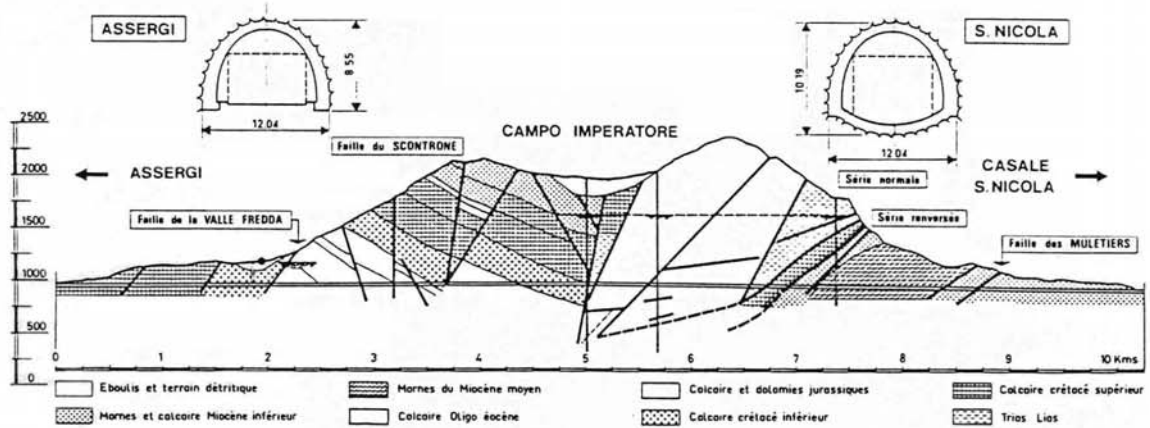


Fig. 1 - Profil stratigraphique à la traversée du massif du GRAN SASSO - Stratigraphic profile across GRAN SASSO mountain.

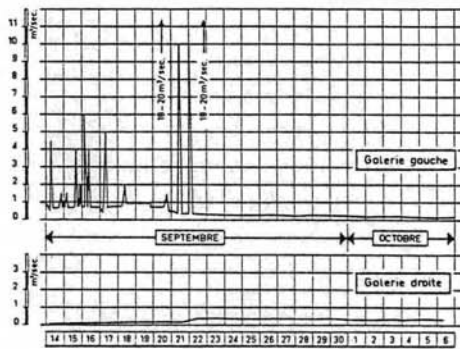


Fig. 2 - Accident du PM 1997 en galerie gauche. Evolution des débits en fonction du temps.

Ground discontinuity on left gallery at chainage 1997. Water discharges in connection with the time.

Une irruption brutale d'eau chargée de sédiments se produisit au front d'attaque au PM 1997, le débit atteignant 700 l/s, puis 4.500 l/s avec accumulation progressive de sédiments au front. Le phénomène s'amplifie les jours suivants, les pulsations successives du débit jusqu'à 20 m³/s sont représentées sur le graphique de la figure n° 2.

Une accalmie durable se produisit au bout d'une semaine environ, après remblaiement de la galerie sur plus de 100 m de longueur. Les mesures conservatoires indispensables sont alors prises dans les conditions suivantes :

- Obturation complète de la galerie gauche par un bouchon de béton placé 500 m en arrière du PM 1997.

- Confortation du front en galerie droite (PM 1985) par constitution d'un masque en béton de 6 m d'épaisseur et aménagement d'une chambre de travail de 12 m de longueur.

2°) Reconnaissance et caractéristiques de la faille

La chambre de travail aménagée en galerie droite permet d'entreprendre une reconnaissance détaillée de la faille par sondages carottés dans une zone de terrain vierge n'ayant donné lieu à aucun débouillage.

La figure 3 indique en plan et en élévation les résultats obtenus à partir de 6 sondages exécutés dans des conditions particulièrement difficiles (charge d'eau importante, terrain sans cohésion) :

- La partie centrale du remplissage constituant le noyau de la fracture est caractérisée par un calcaire complètement broyé et mylonitisé présentant l'aspect brechique et de granulométrie plus étalée (cataclasite). De part et d'autre de ce noyau des zones de transition de calcaires très fracturés constituent le passage au rocher plus massif des épontes amont et aval, fissuré et aquifère.

- Les différentes mesures piézométriques indiquent une charge hydrostatique croissant régulièrement de 0,3 MPa au niveau du crétacé aval jusqu'à 2 MPa à l'amont.

L'analyse de ces résultats permet d'expliquer à posteriori le débouillage brutal du PM 1997 en galerie gauche. La zone mylonitisée de très faible perméabilité constitue un écran quasi étanche derrière lequel la charge hydrostatique dans le calcaire jurassique fracturé pouvait atteindre une valeur proche de la totalité des terrains de couverture. Cet écran créait un gradient élevé dans des terrains dépourvus de cohésion, la perte de charge atteignant plus de 1,5 MPa sur 30 m de distance.

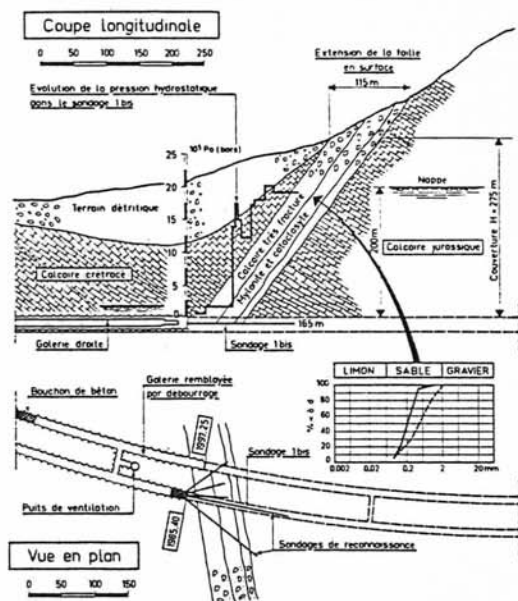


Fig. 3 - Reconnaissance de la faille de la VALLE FREDA
Plan et coupe de l'accident
VALLE FREDA fault investigation. Plan view and
section.

3°) Consolidation du terrain avant percement

3.1. Principes généraux

L'excavation des tunnels au droit de la faille a été précédée d'une consolidation des terrains par injection combinée avec un drainage des épontes suivant le schéma général ci-après :

1°) Constitution par cimentation et silicatisation combinées d'un cylindre de terrain consolidé coaxial au futur percement.

2°) Abaissement de la charge hydrostatique régnant à l'extérieur de la zone de terrain consolidé par injection. Les caractéristiques de la faille permettaient d'espérer un abaissement sensible de la pression par drainage systématique du calcaire de l'éponte amont.

3°) Consolidation préalable et excavation en deux phases successives compte tenu de l'importance de la section des tunnels :

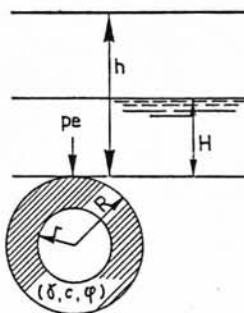
- En première phase traitement de terrain et percement d'une petite galerie dans l'axe du futur tunnel.
- A partir de cette galerie exécution de la consolidation correspondant à la section complète, puis excavation et revêtement du tunnel.

3.2. Etude du dimensionnement de l'anneau de terrain traité

Le problème consiste à déterminer théoriquement l'épaisseur et les caractéristiques mécaniques du terrain consolidé de sorte que la stabilité de l'excavation soit assurée avant mise en place du soutènement provisoire puis du revêtement définitif.

L'étude théorique a été conduite en assimilant le percement et le volume de terrain consolidé à des cylindres coaxiaux de rayons respectifs r et R .

L'étude de l'effondrement d'un souterrain dans un matériau de Coulomb (c, ϕ) a été menée à bien en supposant que la rupture se produit lorsque la zone de plastification atteint la surface libre (Caquot - Kerisel 1956). Le calcul aboutit à la détermination de la contrainte radiale dans le soutènement, à la verticale de la clef de voûte, nécessaire pour éviter la ruine de l'ouvrage.



Le calcul peut être fait dans les mêmes conditions en considérant un anneau de terrain consolidé (R) autour de l'excavation (r) soumis à un écoulement radial convergent. (Habib 1973).

Si p_e est la contrainte maximum que l'anneau traité peut supporter, p_i la pression exercée par le soutènement du souterrain, on obtient :

$$p_e + c \cotg \phi - \frac{\gamma_i + \gamma_w}{j-2} R - \frac{A}{j-1}$$

$$= \left[p_i + c \cotg \phi - \frac{\gamma_i + \gamma_w}{2} r - \frac{A}{j-1} \right] \left(\frac{R}{r} \right)^j$$

$$\text{ou } j = \text{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)$$

$$\text{et } A = \frac{\gamma_w H}{\text{Log} \frac{R}{r}}$$

Si l'on se place à la verticale de la clef de voûte :

$$p_e = \gamma(h-H) + \gamma_i H + \gamma_w H \text{ et en faisant } p_i = 0$$

il est possible de déterminer l'épaisseur de l'anneau consolidé en fonction des caractéristiques mécaniques des terrains injectés à la traversée de la faille.

Pour chaque phase de travail, les valeurs de R ont pu être ainsi théoriquement fixées en fonction des dimensions de l'excavation (r) et de la résistance attendue des différents types de terrains traversés.

Les valeurs de $\frac{R}{r}$ obtenues varient entre 1,5 pour le calcaire fracturé et 3 pour la mylonite, la cohésion du terrain traité étant comprise entre 1 et 0,4 MPa.

4°) Description de travaux de consolidation et d'excavation

4.1. Conditions d'exécution du traitement de terrain

- La consolidation est effectuée par tranches successives, "à l'avancement", à partir d'auréoles de forages couvrant progressivement le volume de terrain à consolider. La nature des matériaux à injecter (calcaire fissuré, broyé, mylonite) conditionne l'espacement entre forages de traitement ainsi que la longueur unitaire de tranches de forages successivement perforées et injectées.

- L'injection de tous les forages est conduite en deux phases successives :

1°) Injection de gel de silice assurant l'impregnation des zones les moins perméables (mylonite, cataclaste). Les produits de base des solutions gélifiantes à basse viscosité étaient constitués de silicate de soude 35-37° Baumé et de réactifs organiques (Durcisseurs C 508 et C 600 - Brevet PROGIL-S.I.F.).

2°) Injection à haute pression de coulis stables bento-nite-ciment augmentant la résistance obtenue en première phase par effet de clavage.

4.2. Description des différentes phases de travail

Compte tenu des circonstances de l'accident, la traversée débuta 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, ne furent entrepris qu'ensuite à partir des deux épontes amont et aval de l'accident, l'abaissement de la charge hydrostatique par drainage ayant son effet maximum.

La figure 4 représente en plan les différentes opérations effectuées pour la traversée de l'accident.

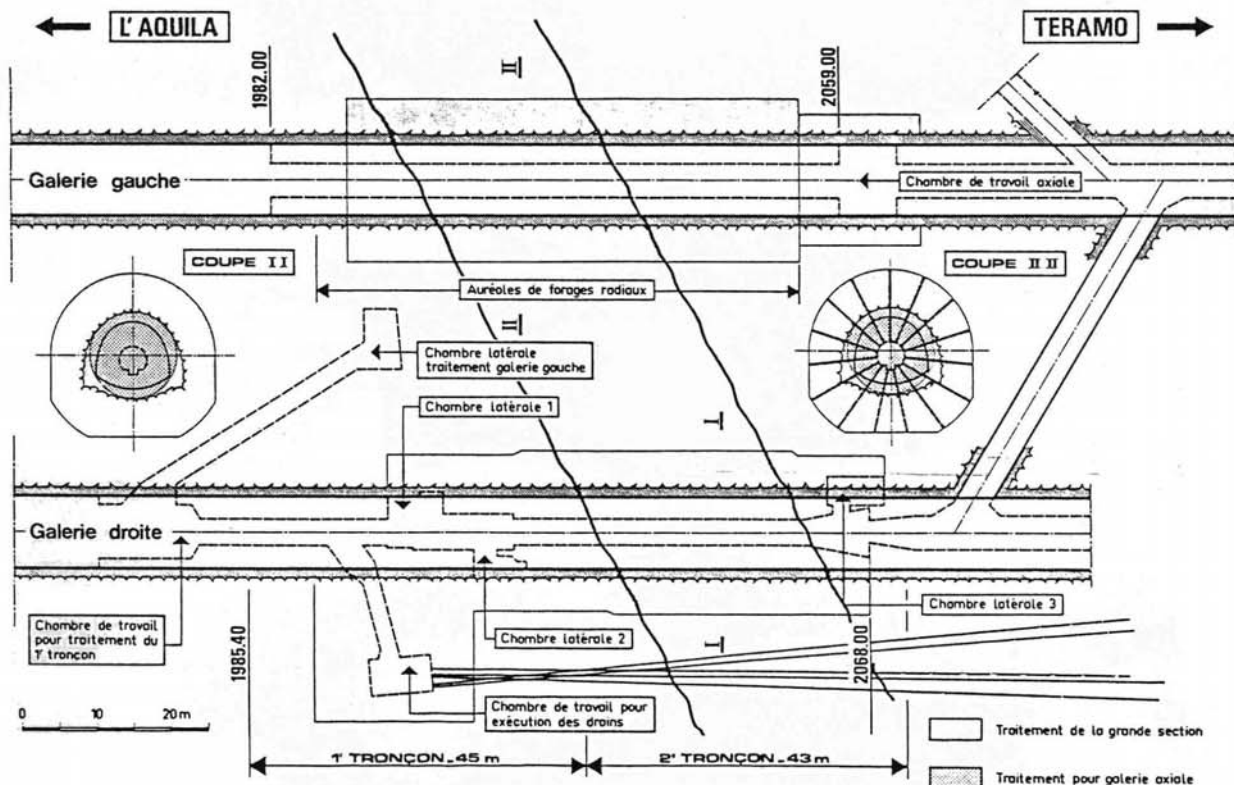


Fig. 4 - Schéma des différentes phases de travail de consolidation du terrain avant percement.
Successive stages in the ground treatment before tunnel driving.

4.2.1. Galerie droite

- En première phase consolidation et percement d'une galerie axiale de Ø 3,50 m depuis le masque aval (PM 1985) jusqu'au jurassique amont (PM 2068). Ces opérations furent effectuées en deux tronçons successifs de 45 m de longueur environ; le premier dans le calcaire fracturé approchait au plus près l'éponte aval de l'accident, le second effectuait la traversée proprement dite de la faille. Avant percement du deuxième bond, 18 drains forés de 100 m de longueur unitaire permirent d'abaisser de moitié la charge hydrostatique, le débit d'exhaure correspondant étant en moyenne de 600 l/seconde.

- Le traitement de terrain correspondant à la pleine section fut réalisé à partir de trois chambres latérales placées dans les épontes calcaires de façon à dégager complètement le gabarit de la galerie axiale. Ce dispositif a été choisi de façon à permettre de poursuivre sans attendre, parallèlement au traitement de terrain, le percement de la galerie dans le calcaire jurassique au delà du PM 2068. L'excavation fut ainsi poursuivie pendant le traitement de terrain à l'abri d'un pilotage systématique par sondages carottés de 200 m de longueur. Le drainage complémentaire par la galerie elle-même permit en outre d'abaisser encore la charge hydrostatique et de réduire l'épaisseur de l'anneau de terrain traité ($\frac{R}{r} = 2$ au droit de la mylonite).

4.2.2. Galerie gauche

Les bonnes conditions dans lesquelles fut exécutée la traversée de l'accident par la voie droite conduisit le maître de l'oeuvre à confirmer son choix de maintenir le tracé de l'ouvrage sans déviation malgré la présence de terrains remaniés et décomprimés par le déboufrage du PM 1997.

- La première phase de traitement correspondant à la petite galerie axiale fut conduite à partir de deux chambres de travail, l'une à l'amont (PM 2059), l'autre latérale dans le calcaire crétacé aval. Traitement et percement furent réalisés en un seul bond entre les PM 1982 et 2059.

- En ce qui concerne la section complète, le traitement de terrain fut réalisé à partir d'une série d'auréoles de forages radiaux, perpendiculaires à l'axe du tunnel et exécutées depuis la galerie axiale elle-même. L'excavation des souterrains en terrain traité ne posa pas de problèmes particuliers. Les terrassements furent réalisés au marteau piqueur sans emploi d'explosif, la pose de cintres précédant de plusieurs mètres un prérevêtement en béton projeté.

- Les quantités de travaux correspondant au traitement de terrain pour chacun des deux tunnels sont explicitées dans le tableau ci-après :

	Galerie droite	Galerie gauche
- Forages à l'avancement (ml)	12.300	14.100
- Reforages (ml)	61.500	54.600
- Injections bentonite-ciment (to.)	3.150	2.490
- Injection Gel (silicate + réactif) (tonnes)	5.350	4.095

5°) Contrôle des caractéristiques du terrain traité

5.1. Caractéristiques mécaniques

Une série de forages de contrôle carottés ont été exécutés dans la masse du terrain traité de façon à contrôler l'homogénéité et la résistance du terrain injecté avant chaque phase de percement.

Les caractéristiques indiquées ci-dessous concernent les zones broyées carottées en galerie droite (deuxième tronçon traversée de la faille proprement dite).

Nature du terrain	Densité apparente γ	Résistance à la compression simple : Rc
Mylonite (très fine)	2,31 à 2,65	3 à 6 MPa
Calcaire broyé, brèche (cataclaste)	2,31 à 2,65	7 à 9 MPa

5.2. Imprégnation par le gel de silice - Examen microscopique

- Une recherche microscopique sur lames minces a été conduite après coloration de la silice colloïdale par adsorption. L'utilisation d'une grille d'intégration a permis en outre d'évaluer la quantité de gel présente dans le terrain injecté.

- Trois modes d'imprégnation du terrain par le gel de silice ont pu ainsi être différenciés :

a) Remplissage de microfissures et de vides préexistants
Cet aspect semble caractéristique des zones de cataclaste et de calcaire incomplètement broyé (Volume de gel: 3 à 5 % du volume total du terrain).

b) Imprégnation homogène dans les zones entièrement mylonitisées mêmes les plus fines (25 % du volume du terrain).

c) Diffusion du gel à partir de voies préférentielles plus ou moins ramifiées d'où les éléments calcaires semblent avoir été chassés par l'injection (effet attribué aux fortes pressions dans des zones décomprimées) (Volume de gel ~ 15 % du volume total du terrain).

L'ensemble des plaques minces observées montre un excellent remplissage des vides entre grains de calcaire assurant la consolidation effective du terrain broyé.

5.3. Essais in situ au vérin plat

Ces essais furent exécutés dans la galerie axiale droite au voisinage des PM 2003 et PM 2006, les vérins plats étant placés sur les parements de la petite galerie dans une zone de calcaire crétacé très fracturé et localement brechique.

La figure 5 représente le déroulement de ces essais (évolution des trois extensomètres) pour lesquels la contrainte à la rupture est de l'ordre de 12 MPa.

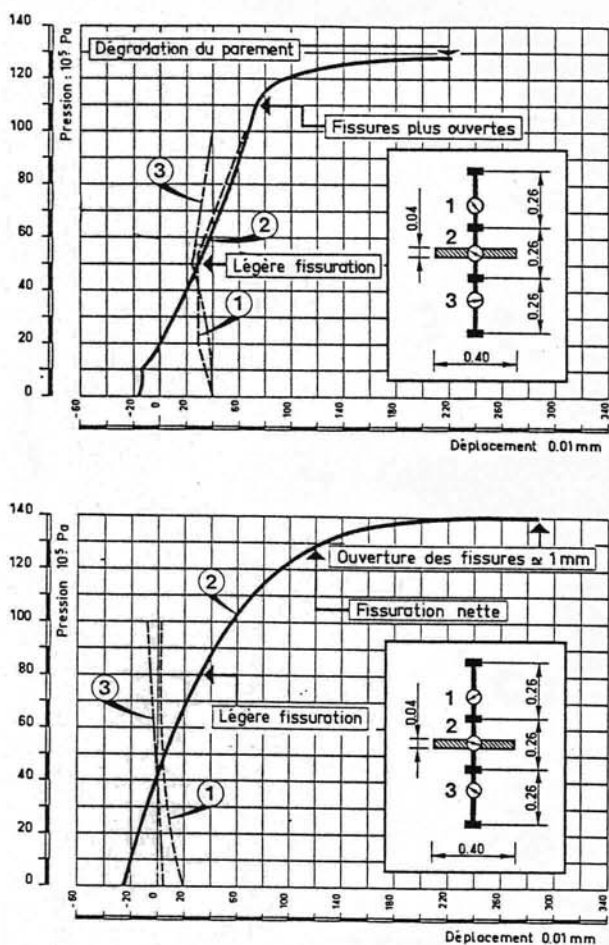


Fig. 5 - Galerie droite : PM 2003 et 2006 - Essais au vérin plat

Right gallery : Flat jack tests at chainage 2003 and 2006 m.

6°) Conclusion

La consolidation par injections de terrains difficiles est une méthode connue et appliquée avec succès pour la réalisation d'excavations souterraines de dimensions modestes.

L'expérience acquise dans le cadre des galeries d'aménagements hydroélectriques a permis de mettre au point une technologie particulière permettant de surmonter les difficultés rencontrées en présence de terrains broyés sans cohésion sous forte charge hydrostatique (Aménagements de ROSELEND, MONT CENIS, HONGRIN-LEMAN, LITANI, etc...)

Le franchissement de la faille de la VALLE FREDA par deux galeries autoroutières a nécessité une adaptation originale de ces méthodes à des conditions particulièrement sévères. Il fallait en effet réussir à stabiliser une section d'excavation considérable (80 m² pour chaque galerie) et par ailleurs éviter une déviation du tracé original en traversant l'accident au droit de terrains remaniés par un débouillage important.

Les contrôles et essais effectués sur les matériaux consolidés par injection ont permis de mieux connaître les caractéristiques du terrain ainsi traité et par là les limites d'application de ces techniques.

Bibliographie

- BALDOVIN G. (1972) : Symposium international de construction des cavités souterraines
Lucerne - Septembre 1972 -
p. 69 - 79
- CAQUOT A. et KERISEL J. (1956) :
Traité de Mécanique des Sols
p. 477 à 481
- HABIB P. (1973) : Précis de Géotechnique
p. 142 à 145