

application de la mécanique des roches aux tunnels autoroutiers exemple des tunnels du Fréjus (côté Italie) et du Gran Sasso

Première Partie

par

P. Lunardi

Maître de Conférences

Université de Florence

Responsable géotechnique pendant l'exécution des deux tunnels.

Introduction

On présentera ici les expériences acquises au cours des travaux de creusement de deux grands tunnels : celui du Fréjus (côté italien), galerie unique d'environ 13 km presque entièrement creusée dans des formations métamorphiques, et celui du « Gran Sasso » constitué par deux galeries de 10,170 km, actuellement presque terminées et réalisées dans des formations sédimentaires.

Deux tunnels, deux histoires qui seront exposées séparément dans le but de broser un tableau synthétique et complet de ce qui a été fait comme études et comme recherches expérimentales sur le massif rocheux et son comportement au cours du creusement.

On sait que la Mécanique des Roches peut aider l'auteur du projet d'une galerie pour une réalisation correcte, surtout au moment du choix des méthodes de creusement et pour les adapter au genre de formations traversées, ainsi qu'au moment de la définition du genre et de l'importance du soutènement provisoire, de l'épaisseur des revêtements définitifs et des délais dans lesquels il convient d'intervenir pour ces opérations.

Cette contribution au projet peut être obtenue en définissant les caractéristiques géomécaniques et géostratigraphiques des formations rocheuses intéressées par le creusement, ainsi que les contraintes initiales et leur orientation. En exceptant les cas, plutôt rares, où l'on peut disposer, pendant la phase du projet, d'une galerie d'essai le long de l'axe du futur tunnel pour effectuer les études géologiques et géotechniques nécessaires, le projet est normalement mis au point et pratiquement élaboré à nouveau au cours des travaux en fonction de l'avancement et des différents phénomènes qui suivent l'adaptation des roches aux

nouveaux états d'équilibre induits par l'ouverture des cavités.

C'est à ce point que la Mécanique des Roches peut intervenir avec un programme de recherches plus ou moins complet, qui peut compromettre, ou non, la réalisation correcte des travaux. Malheureusement l'espace et le temps accordés aujourd'hui à ce genre de recherches est encore trop modeste et, dans la plupart des cas, ce qu'on peut réaliser constitue le résultat de petites batailles faites à titre personnel avec les exécutants des travaux, avec les maîtres d'œuvre, et avec le directeur même des travaux.

Ceci explique pourquoi les résultats de ces recherches ne sont pas toujours aussi satisfaisants qu'ils le devraient et pourquoi, parfois, on est obligé de se rabattre sur des solutions et des interventions qui ne sont pas toujours orthodoxes et à hasarder des conclusions qui ne sont pas assez étayées par l'expérience.

Beaucoup d'éléments ont été recueillis et élaborés pendant la phase d'exécution des deux tunnels; on va tenter d'en faire une synthèse et l'on présentera :

- les résultats des observations et des études géostratigraphiques, hydrogéologiques, géomécaniques sur la roche et sur le massif rocheux;
- les interventions de consolidation de la cavité, les différents modes, les quantités et le moment de leur mise en œuvre;
- le comportement des galeries pendant le creusement, après la consolidation, en ce qui concerne les contrôles superficiels et profonds;
- l'adaptation de l'ensemble rocheux aux nouvelles valeurs des contraintes induites par le creusement.

Fréjus - Côté italien

1 Caractéristiques de l'ouvrage

Le tunnel routier du Fréjus relie la vallée de l'Arc, en France, à la vallée de Rochemolles, en Italie, en passant sous la ligne italo-française de partage des eaux en correspondance du Mont Fréjus (3019 m) (fig. 1).

L'axe de la galerie, pour les 6400 m du côté italien, après avoir décrit un ample tournant dans les premiers 400 m à partir de l'entrée, se maintient en ligne droite, si l'on excepte un tournant à grand rayon près du p. m. 4000, jusqu'à la frontière avec la France. Les recouvrements vont de 0 à 700 m pendant les premiers 1500 m de la galerie pour rester ensuite pratiquement constants jusqu'au p. m. 4000 où ils recommencent à augmenter jusqu'à un maximum de 1700 m au p. m. 6250.

Les principales données concernant l'ouvrage sont :

- Section moyenne de creusement de la galerie : 90 m².
- Dimension de la cavité : 9 × 12 m.
- Abattage de la roche par explosif.
- Avancement au moyen de volées variables de 1,00 m à 4,50 m.
- Avancement moyen quotidien : 7,50 m.

- Soutènement provisoire effectué au front de taille par boulonnage systématique et béton projeté.
- Revêtement définitif en béton exécuté sur toute la section à environ 400 m du front de taille.

2 Géologie du tunnel

Le tunnel autoroutier, du côté italien, traverse exclusivement la formation des calcschistes (schistes lustrés) constituée d'une succession monotone de parashistes calcaires intercalés avec d'autres qui sont argileux ou arénacés avec des composants minéralogiques représentés à 80 ou 90 % par la calcite et le quartz, par la muscovite et la chlorite.

Dans les calcschistes sont englobés des corps lentiformes sporadiques de roches vertes, métamorphosées aussi, et, en second lieu, d'autres corps sialiques.

D'après l'hypothèse des recouvrements charriés des Alpes, formulée dès les premières années du vingtième siècle par E. Argand et toujours acceptée comme conception de principe, malgré les variations substantielles subies, les premiers sédiments de la formation des « Schistes Lustrés » commencèrent à se déposer à l'intérieur du géosynclinal des Alpes (zone piémontaise) pendant le trias supérieur, et ont été accompa-

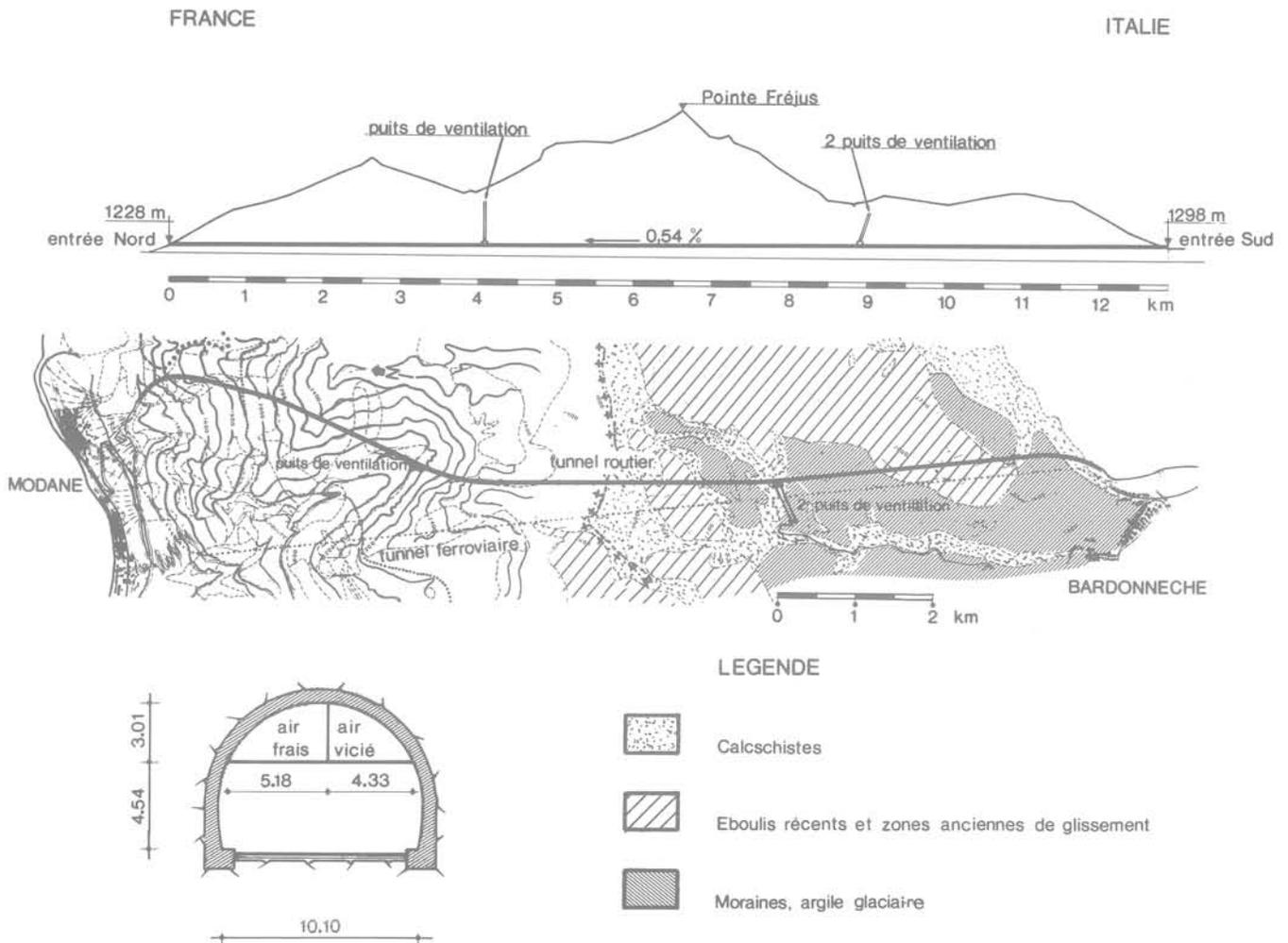


Fig. 1

gnées par des effusions ophiolithifères sous-marines pendant le Malm et le Crétacé inférieur.

Avec le début des mouvements des Alpes (Crétacé supérieur) la « zone piémontaise » a subi, d'après P. Vialon, des plissements Est-Ouest accompagnés par du métamorphisme. Le soulèvement général de la zone extérieure et de la zone piémontaise pendant tout l'Éocène a déclenché vers la moitié de cette période les phénomènes de glissement vers l'avant-pays (Est-Ouest).

Le glissement de la nappe piémontaise remonte à l'Oligocène inférieur, pendant la phase paroxystique de plissement de toute la zone interne, et a été accompagné par des phénomènes de métamorphisme et d'arrière-glissement.

Dans le Pliocène-Quaternaire, pendant la seconde grande période de plissement, la zone intérieure a été modelée en synclinaux et anticlinaux, jusqu'à parvenir à l'actuel arrangement tectonique.

L'épaisseur de la formation des calcschistes, évaluée à environ 1 000 m apparaît sur place comme augmentée jusqu'à 2 500 à 3 000 m par l'effet des plissements et des surgissements intervenus pendant les différentes phases orogéniques.

3 Étude géologique et géomécanique pour le comportement de la cavité

En se rappelant ce qui a été dit précédemment au sujet des connaissances dont on dispose au moment du projet, sur la situation géostructurale, géotechnique et hydrologique du massif que l'on doit traverser, le tunnel autoroutier du Fréjus représente une exception.

En effet, les auteurs du projet ainsi que ceux qui l'exécutèrent ont pu se servir, avant même le début des travaux, d'une intéressante série de données et d'indications obtenues soit au cours du creusement du tunnel ferroviaire qui est tout proche, soit du creusement d'une petite galerie d'essai d'environ 1 000 m de long, tous deux parallèles à l'axe de la future galerie autoroutière. Ces informations concernaient :

- la lithologie, qui indiquait la présence de calcmicaschistes tout au long du tracé;
- l'hydrologie qui signalait la présence d'une quantité d'eau modeste et assez bien localisée;
- la possibilité de déformations différées. En effet, les essais effectués par Bernede, Habib (1968) dans le revêtement du tunnel ferroviaire qui a été creusé lentement par élargissements successifs et revêtu en maçonnerie non reliée sous pression à la roche, signalaient l'existence de phénomènes de déformations dans les calcschistes qui, au cours d'une centaine d'années ont engendré sur le revêtement des pressions radiales de l'ordre de 0,2 MPa;
- la nécessité, pendant l'exécution du tunnel ferroviaire, de passer, pour des questions de stabilité, d'une section polycentrique plutôt rabaisée à une section ovale;
- les caractéristiques géomécaniques du calcschiste avec des indications structurales.

La connaissance de ces données a permis de faire un choix précis du système de creusement et du type le plus approprié de système de consolidation de la cavité. Pour ce dernier, on a choisi le boulonnage systématique pendant l'avancement. D'autre part, on a

pu organiser une série de contrôles et de mesures à faire pendant l'avancement du creusement, de façon à obtenir des éléments utiles au projet et à la vérification des structures du revêtement définitif.

Les résultats de l'étude géostructurale et géomécanique, conduite systématiquement dès les premiers mètres de la galerie et après chaque tir, sont résumés sur la figure 2.

L'étude géologique générale a conduit aux résultats suivants :

— **L'examen lithologique** a permis d'identifier trois types fondamentaux, (fig. 3) :

- 1) Calcschiste carboné (Schistosité peu évidente. Compact avec des couches de l'ordre du décimètre (juqu'à 1 m). Peu d'inclusions de calcite ou de quartz en fractures recimentées).
- 2) Calcschiste phylladique (Schistosité marquée avec beaucoup de mica et de graphite). Failles très fréquentes. Peu d'inclusions de calcite).
- 3) Calcschiste en listeaux (Schistosité évidente. Généralement riche de niveaux où prédomine la calcite, caractérisés par des plis à rayon court et très fréquents. Plus grand pourcentage d'inclusions de calcite et quartz par rapport aux lithotypes précédents).

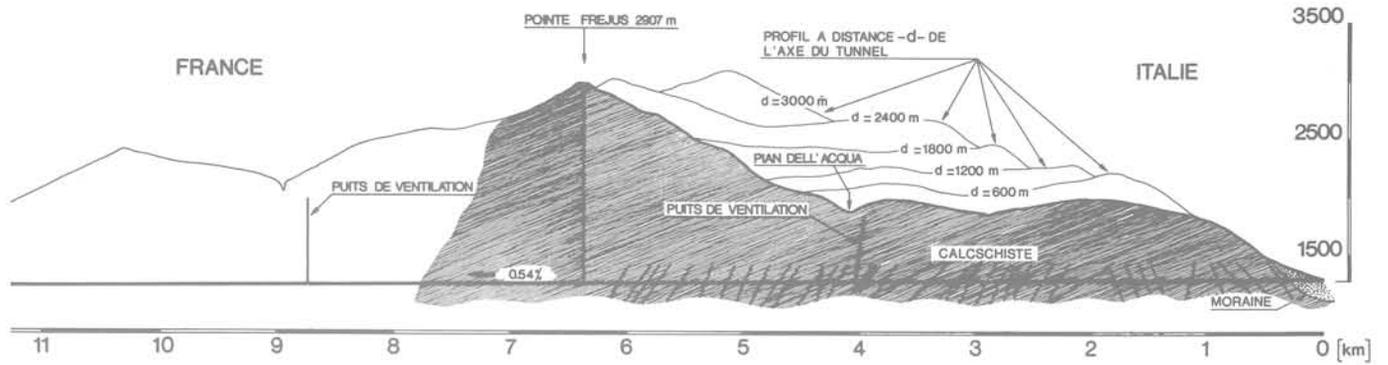
Ces trois types lithologiques, auxquels correspondent naturellement des caractéristiques mécaniques très différentes, s'alternent dans la masse métamorphique avec une extrême fréquence et d'une manière désordonnée, donnant ainsi à la formation un aspect, à petite échelle, extrêmement hétérogène. On ne peut parler d'homogénéité que dans le cas d'un aspect et d'un comportement à grande échelle.

— **L'examen structural** (fig. 2) a concerné le classement et la détermination des différents systèmes de discontinuités, (schistosité, failles, joints), qui de façon différente, d'après les diverses orientations, ont influencé la stabilité des creusements et le comportement du massif rocheux.

Du point de vue structural, la formation de calcschistes est marquée par une épaisse schistosité planaire, avec une immersion à peu près uniforme vers le N.O., une pente variable de 5° à 25°, et par une texture en listeaux avec de nombreuses discontinuités tectoniques. La plupart de ces discontinuités ont été recimentées par des filons de calcite et de quartz et, les plus récentes, par des dépôts de calcite d'origine hydrothermale.

Quant à l'orientation, l'importance et la fréquence des surfaces de discontinuité, on a observé pendant les études préliminaires et pendant le creusement, 4 systèmes principaux de joints conjugués (K1, K2, K3, K4) qui ont été reportés en projection équilatérale. Ce genre de représentation a été utilisée en particulier pour prévoir l'influence que l'enchevêtrement de plusieurs discontinuités peut avoir sur la stabilité de la cavité et pour réaliser le schéma de boulonnage le plus rationnel possible, en évitant ainsi des formes d'instabilité comme celle de la figure 4.

Le relevé systématique des **discontinuités les plus importantes** (failles) a confirmé (fig. 2) une correspondance assez satisfaisante entre les prévisions établies d'après l'étude des principales discontinuités mises en évidence par l'observation des photographies aériennes et la rencontre effective en souterrain de ces mêmes discontinuités. De cette façon on a pu prévoir à temps la nécessité de déplacer vers la France la



ETUDE GEOLOGIQUE	LITHOTYPES	calcschistes carbonés * calc. phylladiques *** calc. en listeaux **	
	RELEVÉ STRUCTURAL	faille de compression faille d'extension	
	INDICE DE FRACTURATION	[ml/m ²] 0.75 0.50 0.25 0.00	
	SCHISTOSITE	α° α° = 10°-25°	20°, 11°, 11°, 25°, 25°, 25°
	VENUES D'EAU	▼ concentrés W diffuses	W, WW, W, W, W, W
	PRELEVEMENT D'ECHANTILLONS	γ _d , σ ₁ , σ ₁ , c, φ E _s , v, V ₁ , fluage	
ETUDE GEOMECANIQUE	LAB.		
	SITU	VERIN CYLINDRIQUE E _s	
	VERIN PLAT σ _{pd}		

Fig. 2



Fig. 3a Calcschistes carbonés

Fig. 3b Calcschistes phylladiques

Fig. 3c Calcschistes en listeaux

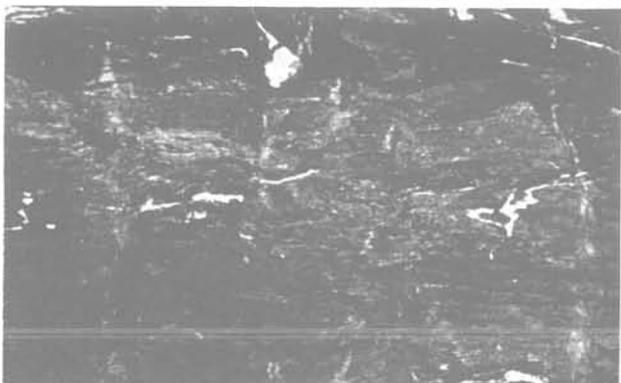




Fig. 4

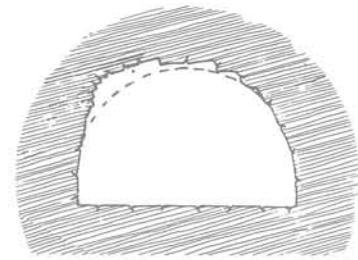
centrale de ventilation qui, d'après le projet, aurait dû se trouver dans une zone particulièrement difficile à cause de la présence de systèmes importants de failles.

Les systèmes principaux, avec une fréquence de l'ordre d'une centaine de mètres, constitués de failles généralement très étendues et ouvertes, donc intéressées par des circulations d'eau, se présentent associés à des bandes cataclastiques. Lorsque leur disposition est plus ou moins défavorable par rapport à l'axe du tunnel et en relation avec d'autres systèmes plus petits de fractures, les systèmes principaux ont donné lieu à des situations locales graves d'instabilité, ce qui a entraîné des sur-épaisseurs considérables du revêtement.

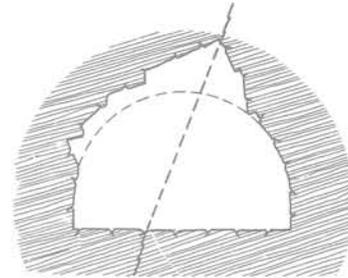
Les systèmes plus petits, constitués par des fractures généralement fermées et peu étendues avec une périodicité de l'ordre d'une dizaine de mètres, représentent des solutions de continuité plus ou moins latentes dont l'importance est accrue par les tirs. Le relevé de l'index de fracturation moyen sur les fronts de taille, fournit, par rapport à la valeur maximale enregistrée dans la galerie, des valeurs moyennes et grandes dans les premiers 3200 m et des valeurs sensiblement inférieures pour le reste, si l'on excepte des zones singulières où, d'ailleurs, l'important index de fracturation peut être mis en relation avec les interventions de stabilisation de la cavité au moyen de cintres et de béton projeté.

La schistosité principale est de type planaxial. Elle est caractérisée par une orientation des micas et par la disposition en plans des substances carbonneuses. Le long des plans de schistosité on observe souvent des signes de glissement avec des miroirs de faille. Le massif rocheux se divise donc très facilement le long de ces plans, et pour cette raison, très souvent, avec une disposition sub-horizontale (fig. 5), on a des décollements faciles avec des hors-profils en calotte, tandis que les piédroits restent stables.

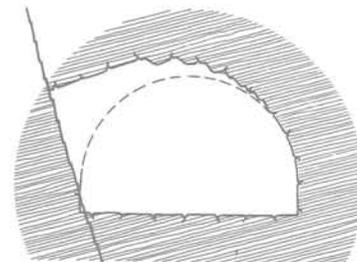
Dans ces conditions, les dimensions de l'excavation ont une importance déterminante pour la stabilité : ainsi, au Fréjus, alors qu'une bonne stabilité avait été observée dans la galerie d'exploration, on a rencontré de gros problèmes d'instabilité locale dans la calotte du tunnel autoroutier qui ont imposé le boulonnage systématique du creusement (fig. 6 et 7).



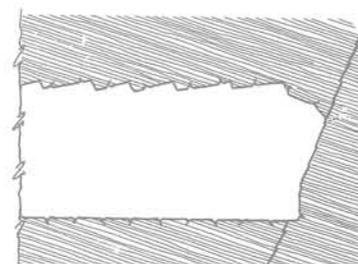
1



2



3



4

Fig. 5 Influence de la schistosité et des failles sur la stabilité locale du creusement dans le tunnel du Fréjus



Fig. 6



Fig. 7



Fig. 8

La schistosité a influencé d'une façon importante le comportement de la cavité comme on le verra à propos des convergences et, en définitive, est responsable de l'anisotropie des déformations du profil du creusement.

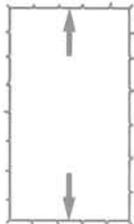
Des venues d'eau ont été observées pendant le creusement sous forme diffuse et exceptionnellement sous forme concentrée (fig. 2). A la fin des travaux, le débit maximum enregistré a été de l'ordre de 7 l/s. Localement, en correspondance avec des joints de schistosité en présence de graphite, ou de petites failles remplies de matériau tectonisé, une circulation d'eau réduite favorisait les détachements et l'instabilité locale le long du contour de la cavité.

L'étude géomécanique de la matrice et du massif rocheux a été conduite en même temps en laboratoire et « *in situ* ». L'anisotropie typique et prononcée des calcschistes a conduit à les traiter, au point de vue géomécanique et pour la programmation des essais de laboratoire, comme une roche douée d'isotropie transversale individualisant les 2 directions d'anisotropie dans un sens respectivement parallèle et perpendiculaire à la schistosité (fig. 8). On a donc eu soin d'obtenir, autant que possible, des éprouvettes orientées de façon à pouvoir être soumises à des essais effectués dans des directions parallèle ou perpendiculaire à la schistosité. La roche possède une anisotropie prononcée associée à un comportement fragile en compression simple.

En outre, l'on remarque (fig. 9) que :

- la schistosité a fortement influencé les grandeurs σ_r et V_L et, dans une moindre mesure σ_r et E_S ;
- d'importantes différences ont été enregistrées entre les résultats des essais de déformabilité sur des échantillons en laboratoire et les résultats obtenus sur le massif rocheux pendant les essais à la paroi ou dans des niches (fig. 10);
- les phénomènes de fluage sont absents dans le cas d'essais sur matrice;
- la vitesse des ondes élastiques mesurée « *in situ* » est nettement différente (fig. 9) de celle obtenue en laboratoire;
- les valeurs de la résistance ultime du massif σ_{gr} , mesurées avec des essais de vérin plat sur la paroi, représentent un petit pourcentage de la résistance σ_r de la matrice (fig. 11 et 12).

En définitive on s'aperçoit que la schistosité, qui accompagne les différents systèmes de discontinuité répartis et enchevêtrés d'une façon variable dans le massif rocheux, altère dans la plupart des cas les caractéristiques mécaniques de ce dernier, rendant ainsi peu utilisable pour la définition du projet les valeurs des paramètres obtenues par les essais de laboratoire.

TUNNEL DU FREJUS				
ESSAIS DE LABORATOIRE		σ_f [MPa]	108	86
		σ_t [MPa]	12.4	25
		E_s [MPa]	52000	55000
		ν	0.21	0.18
		* C [MPa]		pour T_{max} 0.28 pour T_{ult} 0.00
		* ϕ		pour T_{max} 45° pour T_{ult} 35°
		FLUAGE	1) POUR EPROUVETTES CHARGÉES UN PEU AU-DESSUS DE LA LIMITE ELASTIQUE ON A CONSTATE UN FLUAGE AU DEBUT PUIS UNE STABILISATION DES DEFORMATIONS AU BOUT DU 3ème JOUR ENVIRON 2) POUR EPROUVETTES CHARGÉES NETTEMENT AU-DELA DE LA LIMITE ELASTIQUE ON A CONSTATE UNE RUPTURE DE L'ECHANTILLON AU BOUT DE 30 MINUTES A l'heure	
		V_L [m/s]	3400	5900
		γ_d [KN/m ³]	0.27	
		ESSAIS EN SITU		E_s [MPa]
σ_{gd} [MPa]	20			
V_L [m/s] moyen	de P.M. 1100 a P.M. 2800 2000			de P.M. 2800 a P.M. 6300 2500
E_{dyn} [MPa]	pour $V_L = 2000$ m/s			10000
	pour $V_L = 2500$ m/s			15500

* MESURES LE LONG DES JOINTS DE SCHISTOSITE EN PRESENCE DE GRAPHITE

Fig. 9

4 Comportement des galeries pendant le creusement, interventions, contrôles, observation.

L'adaptation de la roche au nouvel état d'équilibre qui fait suite à l'ouverture d'une cavité s'est manifestée dans la série des calcschistes sous des formes différentes selon les situations géostrucuturales et les états des contraintes liées à l'évolution des charges lithostatiques.

L'observation et les contrôles systématiques effectués

tout au long du parcours du tunnel, du côté italien, ont permis de suivre la réponse du massif rocheux aux nouveaux équilibres et d'obtenir une série de données qui dans leur ensemble (fig. 13) offrent un tableau plutôt convaincant du comportement du tunnel routier après le creusement.

En ce qui concerne les **interventions de consolidation** adoptées et mises en œuvre immédiatement au front de taille, le choix a été limité aux deux types traditionnels : les cintres avec béton projeté et le boulonnage systématique intégré avec quelques centimètres de béton projeté.

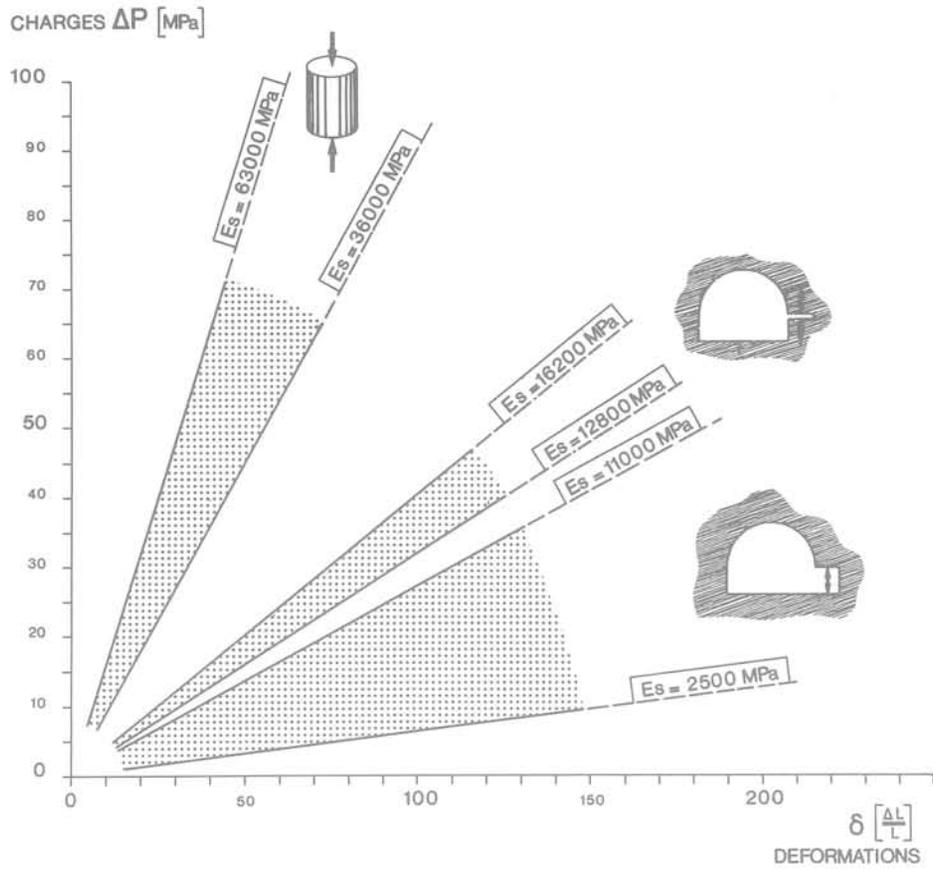


Fig. 10 Résultats des essais de déformabilité

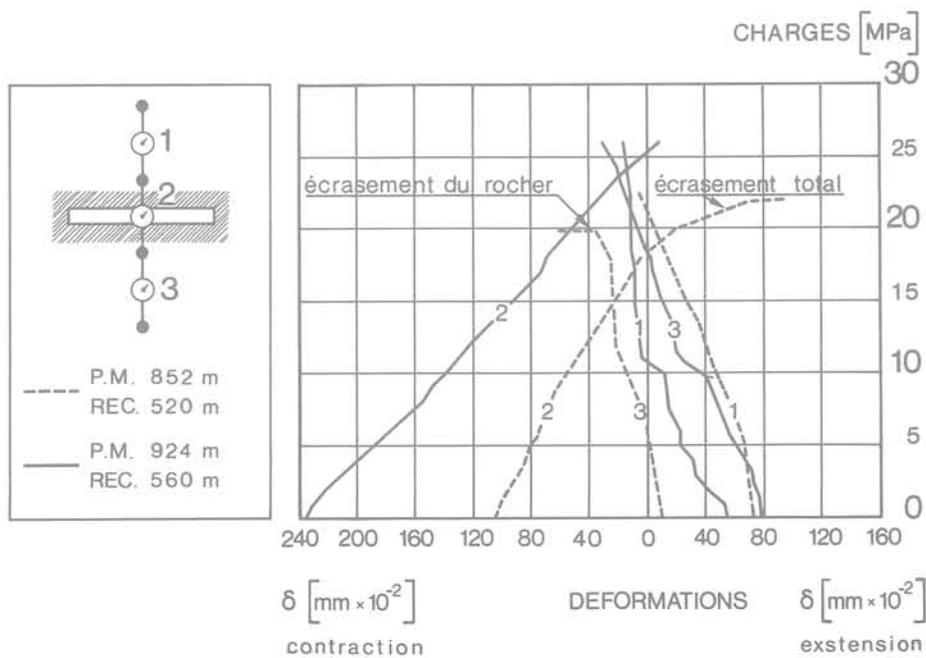


Fig. 11 Mesure de contrainte à la paroi par vérin plat

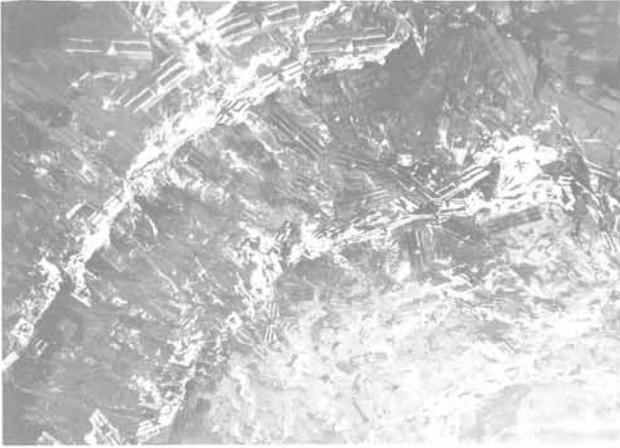


Fig. 14

Les cintres ont été mis en œuvre systématiquement dans les moraines (180 m) de l'entrée du tunnel et localement le long du tracé en correspondance avec d'importantes failles, ou avec des faisceaux de matériau tectonisé, ou avec des zones où les infiltrations avaient altéré et dégradé le rocher au contour, c'est-à-dire en définitive dans les zones caractérisées par un fort index de fracturation. Dans son ensemble, ce genre d'intervention a été fait sur 10 % de la longueur du tunnel. Le boulonnage systématique a été adopté, par contre, dans les 90 % restant. Il a été réalisé avec des boulons (\varnothing 24 mm) à ancrage ponctuel au moyen de tête expansible à six ailes et des tiges de 3,50 à 5,00 m de longueur disposées sur le périmètre de la cavité, avec une densité variable fonction des différentes situations de stabilité. Sur la figure 13 on peut observer comment le boulonnage a été mis progressivement au point pendant l'avancement des travaux, en fonction de l'évolution des phénomènes de décompression de la cavité liés au recouvrement, agissant sur l'entraxe des boulons, sur la longueur des tiges et sur la qualité de l'acier (fig. 14).

Entre les p. m. 200 et 4300 la densité du boulonnage a été progressivement augmentée de 10 à 20 boulons par mètre linéaire (fig. 13). On a aussi augmenté la longueur des tiges. Après le p. m. 4300 sont apparus des phénomènes de rupture brusque et soudaine des têtes de boulons, provoqués par le déplacement des plaques d'ancrage (fig. 15) à la suite de l'expansion excessive de la roche au contour de la cavité. On a eu recours, dans ce cas, à une double mesure (fig. 13) : l'adoption d'aciers moins durs avec augmentation de l'allongement relatif pratique de 3 % à 7 % et l'adoption de tiges plus longues, jusqu'à 5 m, afin d'avoir à disposition une plus grande déformabilité dans le domaine élastique.

Le choix d'un tel système de consolidation de la cavité, adopté tout d'abord en fonction de la structure schisteuse du calcschiste et en vue de phénomènes importants de décompression, même différés (tunnel ferroviaire), s'est révélé, dans ce cas particulièrement heureux pour une série de raisons, comme :

- la grande possibilité d'adaptation de ce genre d'intervention aux différentes conditions d'équilibre de la cavité;

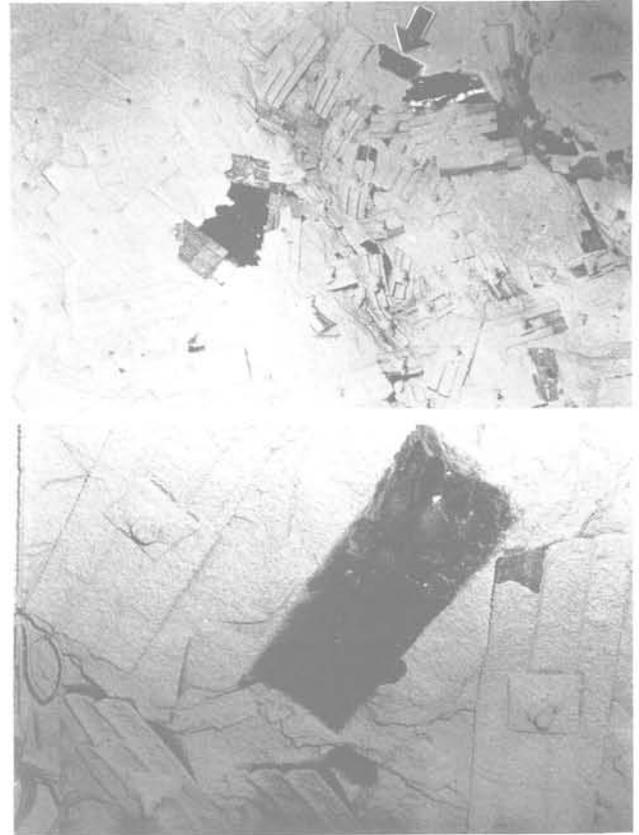


Fig. 15



Fig. 16

- la capacité de régler les phénomènes de déformation en créant des pressions maximales de confinement extrêmement modestes, de l'ordre de 0,3 à 0,4 MPa, même dans les cas où les pieds des boulons n'étaient certainement pas bloqués dans un massif rocheux resté dans le domaine élastique;
- la possibilité d'être introduit dans les travaux du front de taille sans donner lieu à des temps morts.

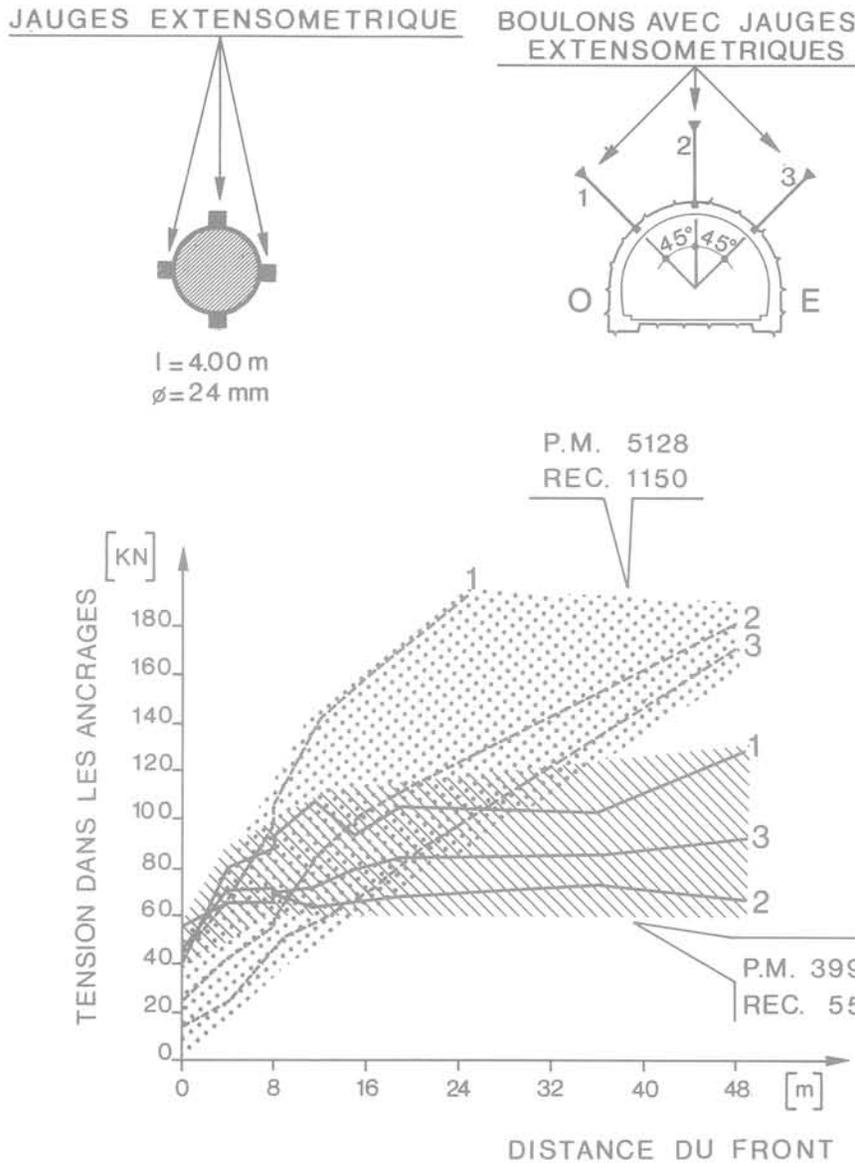


Fig. 17 Variation dans le temps de la tension dans les boulons d'ancrage

La mise au point progressive des schémas de boulonnage a été obtenue aussi, grâce à une série de contrôles effectués « *in situ* » au moyen d'extensomètres électriques collés sur les tiges des boulons déjà placés (fig. 16).

Les résultats des mesures qui avaient pour but de relever la variation dans le temps de la tension des boulons, (fig. 17), ont mis en évidence que même pour des petites valeurs du serrage initial, en liaison avec d'importants phénomènes de déformation, les boulons se mettent en charge rapidement jusqu'aux valeurs de service.

En comparant les contraintes sur les boulons dans deux stations qui correspondent à des recouvrements différents, l'entrée en charge est notamment plus rapide dans le cas du recouvrement le plus grand et, en domaine élastique, les valeurs maximales de résistance sont rapidement atteintes. Enfin des diminutions brusques des contraintes se produisent lors des tirs et sont observables jusqu'à une distance maximale de la station de mesure de deux diamètres à partir du front de taille.

La cavité après consolidation était systématiquement et constamment contrôlée par des mesures de **convergence** effectuées sur six bases d'après le schéma de la figure 18.

Les stations de mesure mises en œuvre (trente environ) ont fourni une série de résultats qui permettent de tirer un certain nombre de conclusions :

- a) A partir des convergences de la figure 13, il est évident qu'elles sont en général influencées par le recouvrement croissant, mais elles paraissent localement influencées par la présence d'accidents tectoniques avec des calcschistes laminés et dégradés. Les convergences sont de quelques centimètres, pour un recouvrement inférieur à 600 m et vont jusqu'à 25 cm pour un recouvrement compris entre 600 et 1700 m.

Les valeurs reportées sur la courbe sont les maximales après 60 jours pour les bases A et D. les convergences les plus fortes ont été enregistrées entre les p. m. 4500 + 5800 et elles ne sont pas en correspondance avec le plus grand recouvrement,

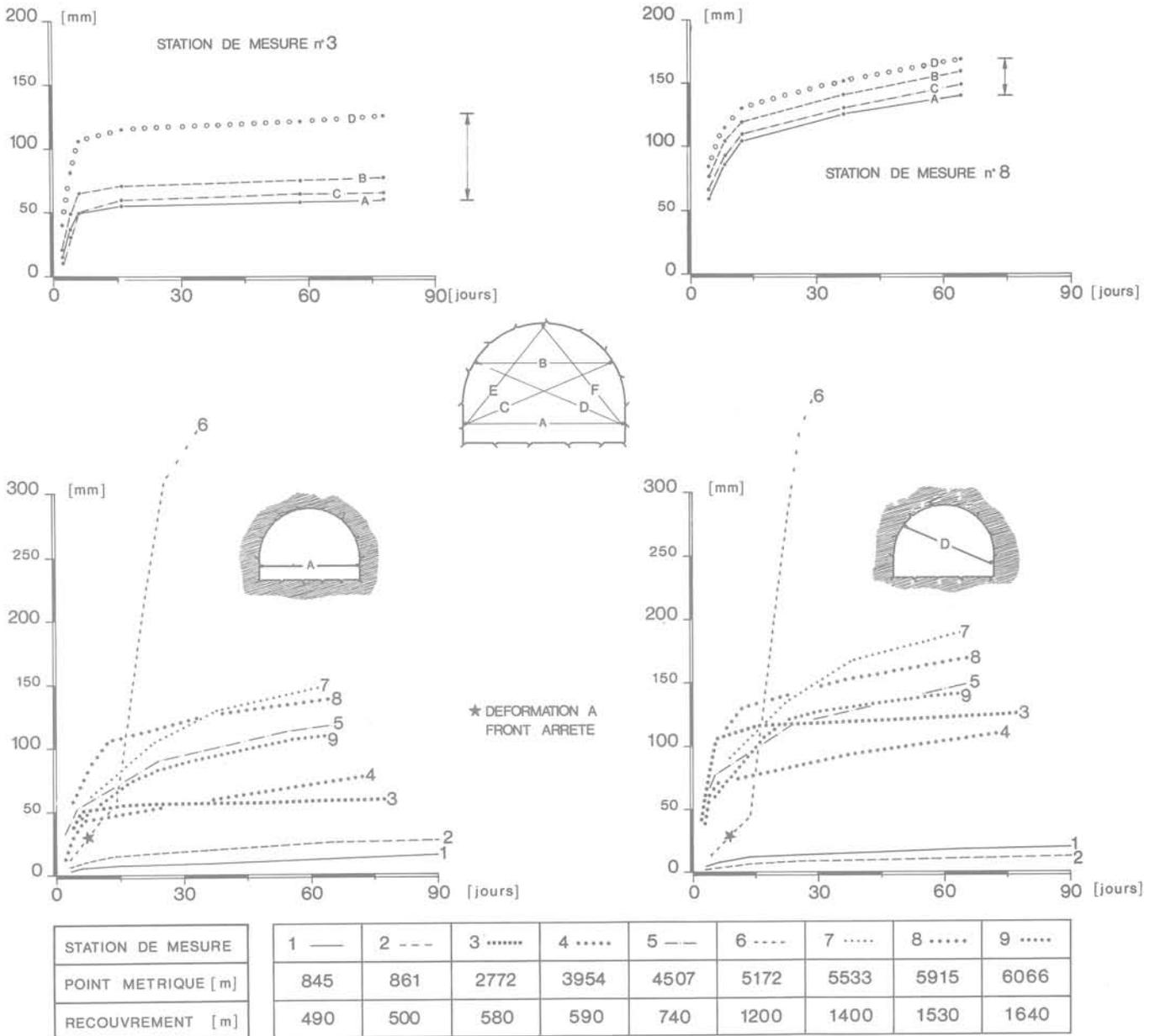


Fig. 18 Convergence

ni la conséquence de l'aggravation des conditions lithologiques, structurales et géomécaniques du calcschiste. Ceci a pu être vérifié au moyen de mesures sismiques sur la paroi et à partir de l'index de fracturation de la roche.

- b) En ce qui concerne une même station de mesure, les convergences ont été en général influencées par la schistosité presque toujours tangente au rein gauche du tunnel tout le long du parcours. C'est pourquoi, bien que les convergences aient été mesurées sur 6 bases, on a reporté sur le diagramme les résultats des bases les plus significatives : la base A entre les piédroits et la base D qui, étant subnormale à la direction de la schistosité, a subi presque toujours les déformations les plus élevées.

Pour mieux mettre en évidence le comportement anisotrope qui caractérise la déformation de la cavité, le rapport $\frac{D}{A}$ a été évalué par rapport à la

longueur des bases et a été exprimé sur un diagramme en fonction des recouvrements. On remarque alors que l'anisotropie est beaucoup plus prononcée là où la convergence est plus petite et vice versa.

- c) On rencontre encore ce phénomène en analysant les courbes des convergences relatives à des stations à recouvrements différents (fig. 18). On peut remarquer qu'au fur et à mesure que croît le recouvrement, et par conséquent que les déformations augmentent, il y a une tendance à l'isotropie. A ce propos il est intéressant de noter que les convergences mesurées sur la cavité déjà revêtue en béton sont tout à fait isotropes même lorsque les stations de mesures de la paroi rocheuse avaient montré une forte anisotropie.
- d) Si l'on observe les courbes de convergence relatives, par exemple aux bases D et A, on remarque immédiatement une allure anormale au p. m. 5172 où il y a une station comme toutes les

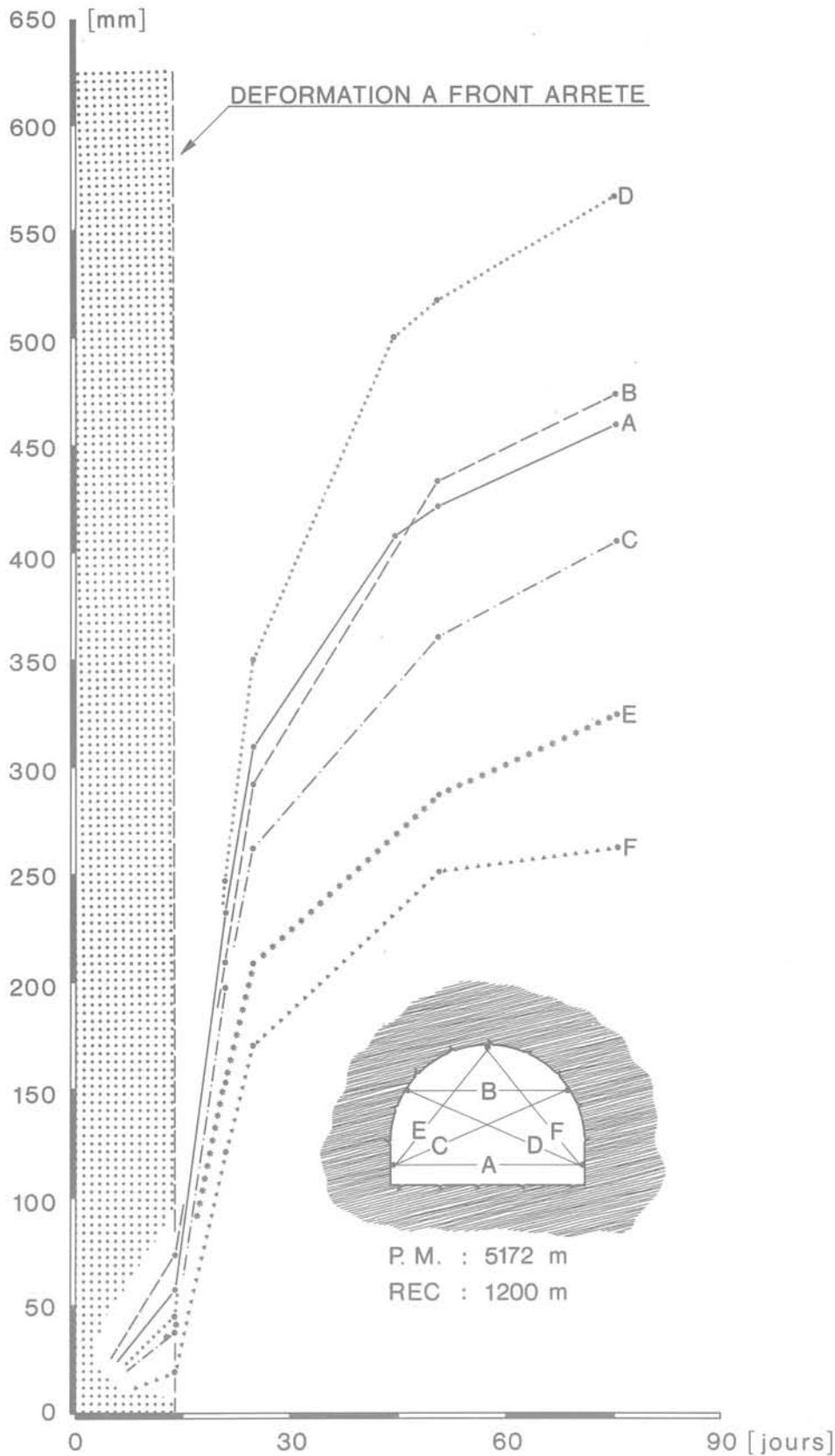


Fig. 19 Convergence

autres, sans accidents géologiques particuliers, ni eau, ni recouvrement singulier. Ces courbes décrivent la déformation de la cavité en un point où, le 7 août 1977, les travaux ont été arrêtés à cause des vacances d'été pour être repris 15 jours après.

La station mise en œuvre à 2 m du front (fig. 19) a

présenté pendant les 15 jours d'arrêt, une déformation maximale d'environ 10 cm. A la reprise du travail la convergence a repris très brusquement jusqu'à 60 cm après 3 mois de mesures environ. Pendant l'interruption des travaux, la cavité avait été consolidée jusqu'à un mètre du front avec à peu près 30 boulons par mètre linéaire, mais aucune

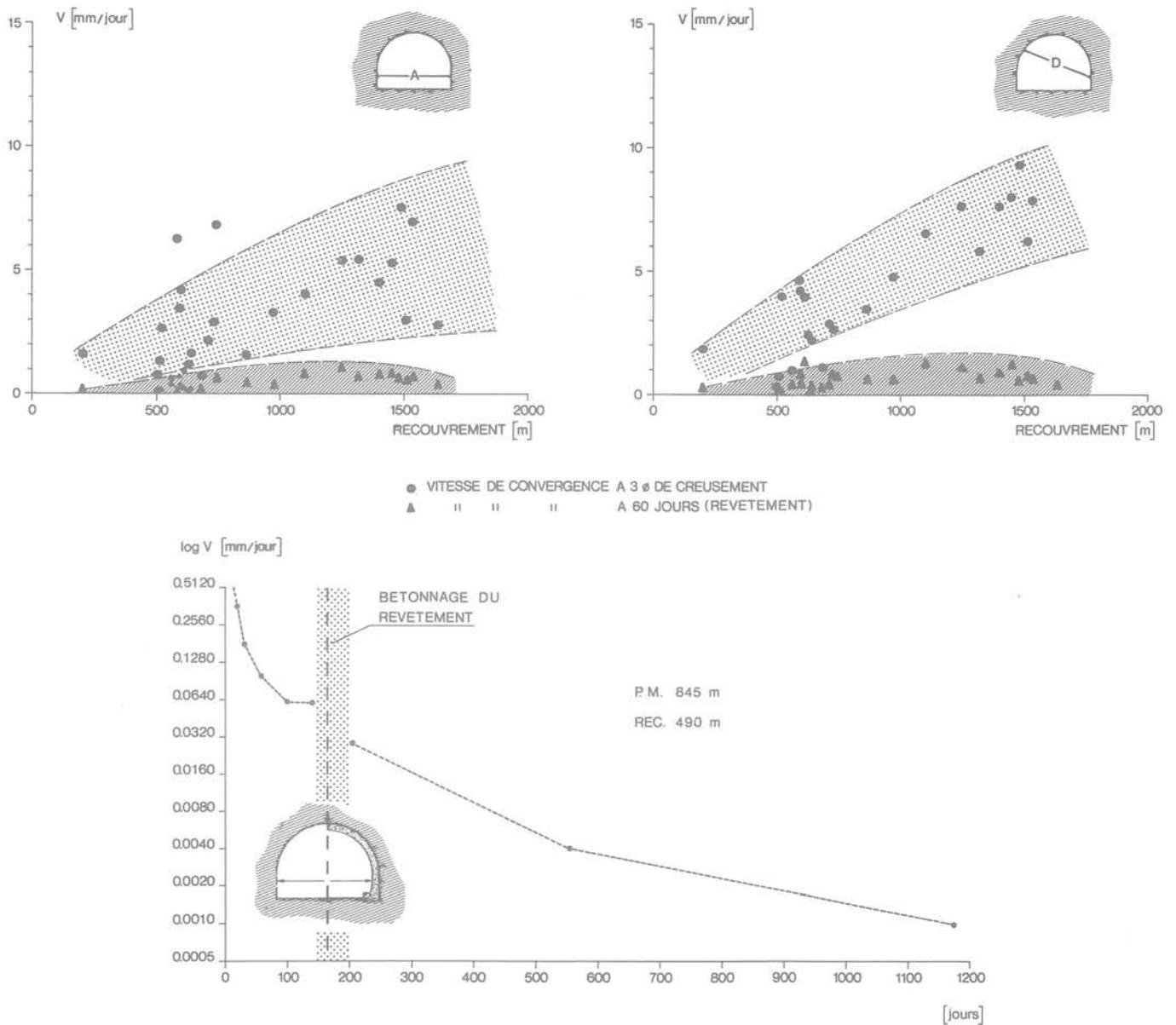


Fig. 20 Vitesse de convergence

intervention n'avait été effectuée sur le front même. Une fois les travaux de creusement repris, la consolidation de la cavité a continué avec la même intensité et la même cadence, c'est-à-dire avec des abattements de 4 m. On peut déduire de cette observation que le massif rocheux est sujet à des phénomènes de décompression par suite de rupture du genre élastoplastique au contour de la cavité qui tendent à se diffuser radialement vers l'intérieur du massif, avec une progression qui dépend de l'importance des interventions de soutènement et des temps entre lesquelles ont été réalisées. Le massif rocheux doit être attaqué avec une cadence d'avancement donnée et, en cas d'arrêt, il a besoin d'être bloqué avec des interventions appropriées sur toutes les surfaces libres : dans le cas en question sur le front de taille même.

Si cela n'est pas effectué, les phénomènes de rupture se diffusent en profondeur et déclenchent de telles convergences qu'il est impossible de les contrôler : c'est ce qui s'est produit au p. m. 5172.

Ceci paraît confirmer qu'une cadence d'avancement sans arrêts prolongés et une consolidation appropriée du massif au contour de la cavité, réalisée immédiatement au front, peuvent d'une part garantir la stabilité de la cavité et d'autre part rendre moins onéreuses les interventions de stabilisation.

- e) Une dernière observation concerne la vitesse de convergence en fonction des recouvrements et les valeurs des vitesses à partir desquelles on a stabilisé la cavité avec le revêtement définitif.

A partir des courbes reportées sur la figure 20, on peut remarquer ce qui suit :

- les vitesses de convergence mesurées à la distance de 3 diamètres à partir du front de taille tendent à augmenter sensiblement avec les recouvrements et, d'autre part, les vitesses enregistrées après 60 jours, c'est-à-dire au moment du bétonnage du revêtement dans la section de mesure, ne sont pas trop influencées par des charges lithostatiques croissantes;

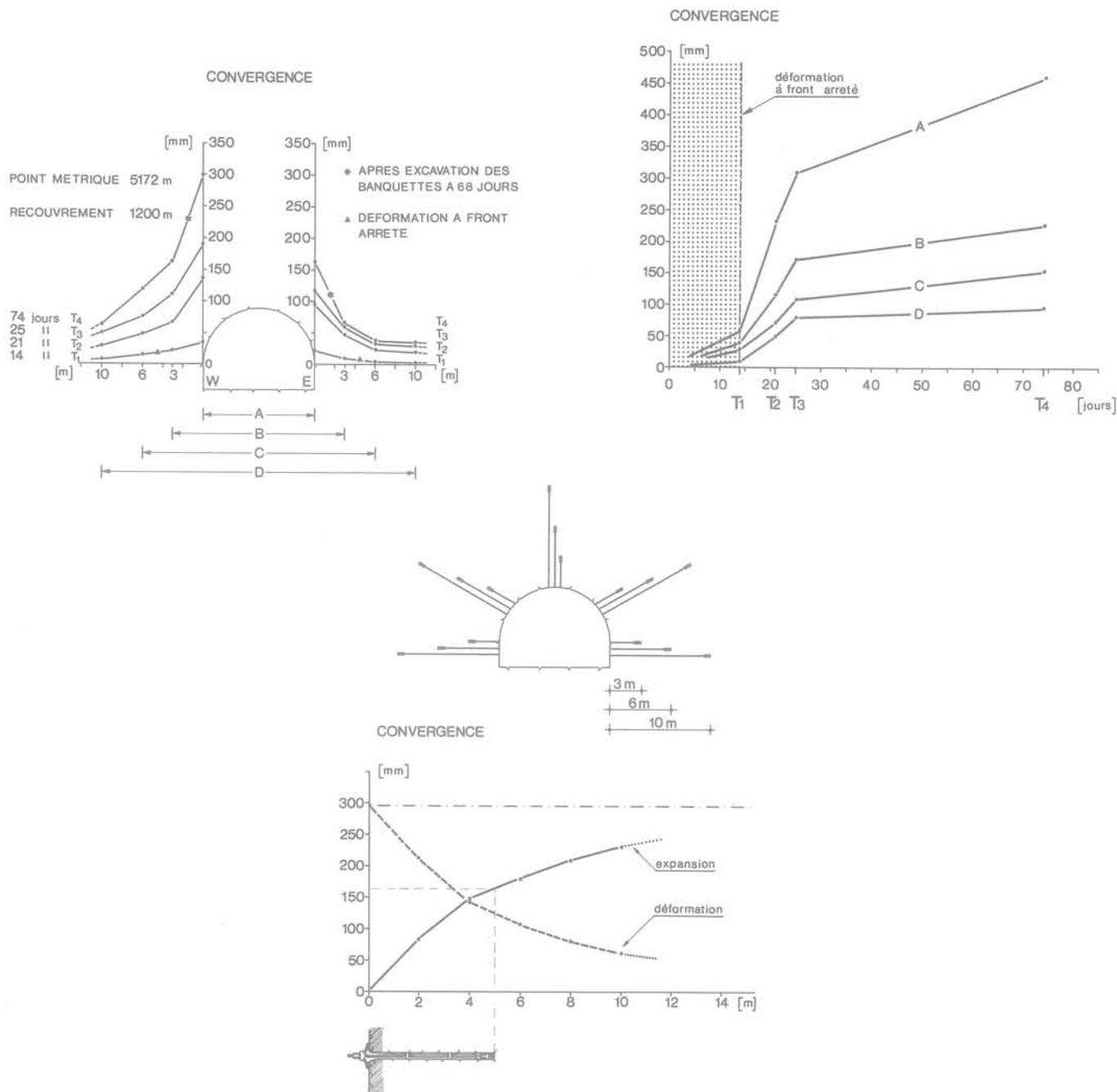


Fig. 21 Mesure de la zone décomprimée

— le revêtement réduit sensiblement les vitesses de convergence sans toutefois les annuler.

En même temps que les mesures de convergence, l'auscultation du massif a été effectuée pour définir l'étendue de la zone plastifiée et fracturée (fig. 13). On a utilisé des extensomètres à barres, de longueur différente, disposés radialement et on a mesuré aussi la vitesse de propagation des ondes élastiques. Les résultats des auscultations par barres (fig. 21) ont été particulièrement significatifs pour la station du p. m. 5 172 avec un recouvrement de 1 200 m et mettent en évidence que la décompression autour de la cavité peut s'étendre radialement sur quelques diamètres et que même à dix mètres environ du parement on peut encore enregistrer des déformations de l'ordre de 10 cm. Ils confirment aussi le comportement anisotrope de la cavité. Enfin, malgré une consolidation

exécutée avec 1,5 boulon par m^2 , les déformations au contour ne tendent pas à s'atténuer sensiblement dans le temps et réapparaissent même deux mois après le creusement, lors de l'approfondissement du radier pour le bétonnage des banquettes.

Dans les deux diagrammes de la figure 21 ont été reportés d'un côté les allures des convergences en fonction du temps à partir des bases de mesure A. B. C. D., et de l'autre la courbe d'expansion de la bande plastifiée en fonction de la longueur des boulons utilisés pour consolider le massif dans la zone de la station extensométrique.

L'auscultation du massif par mesure de la vitesse de propagation des ondes longitudinales a été effectuée systématiquement sur 90 % du tracé de la galerie. Elle a été faite sur des bases de longueur comprises entre 5 et 20 m respectivement. On peut voir sur la figure 13

TUNNEL DU FREJUS	TUNNEL FERROVIAIRE			GALERIE D'ESSAI			TUNNEL AUTOROUTIER					
	MESURE EFFECTUEE DANS LE REVETEMENT			MESURE EFFECTUEE DANS LA PAROI DE ROCHE								
	VERIN 65x25			VERIN 64x32			VERIN 70x70					
	P.M. [m]	7700	8020	9580	315	693	983	852	924	4010	4060	5626
	H [m]	1550	1400	900	140	420	570	520	560	720	740	1450
	Y-H [MPa]	41.80	37.80	24.30	3.78	11.30	15.40	14.00	15.10	19.40	20.00	39.10
	σ_T [MPa]	—	—	—	—	—	—	21.0	10.5	4.5	7.5	2.0
								18.5	25.5	1.7	2.5	4.5
								5.5	18.5	—	—	3.3
MESURE DE LA CONTRAINTE A LA PAROI	σ_{Tm} [MPa]	1.8	2.7	1.6	3.6	11.4	11.4	15.0	18.1	3.1	5.0	3.2

Fig. 22

que les valeurs V20 des vitesses mesurées sur les bases de 20 m sont presque toujours plus élevées que celles V5 des bases de 5 m excepté dans la partie où la décompression de la cavité est assez importante pour faire apparaître des valeurs V5 et V20 pratiquement égales (zone de rupture des boulons). Dans le tronçon compris entre les p.m. 500 et 1 000 m elles montrent, au contraire, des valeurs très différentes, ce qui indique de faibles phénomènes de détente et par conséquent un comportement pseudoélastique du massif.

Les valeurs moyennes de vitesse sont :

Vm = 3 000 m/s	Point métrique : 200 + 1 000
Vm = 2 100 m/s	Point métrique : 1 000 + 2 800
Vm = 2 500 m/s	Point métrique : 2 800 + 6 500

On peut remarquer que V5 et V20 se sont maintenues presque toujours entre 2 000 et 3 000 m/s. Ce résultat semble indiquer qu'en définitive, les caractéristiques du massif rocheux, tout au long du tracé, à l'exception des premiers 1 000 m, sont assez uniformes et que l'évolution des convergences doit être ainsi considérée comme indépendante de ces caractéristiques. La mesure des **températures de la roche** le long du tracé, (fig. 13), confirme la valeur du gradient géothermique prévue sur la base des données disponibles grâce au tunnel ferroviaire et à la petite galerie d'essai.

Pour la **mesure des contraintes** dans le massif rocheux, on a utilisé la technique du vérin plat (P. HABIB), en écartant dès le début la méthode de libération totale des contraintes à cause de la nature de la roche (texture schisteuse très épaisse) sur laquelle devaient être faits les essais et des phénomènes de décompression qui se seraient produits lors du forage de l'avant-trou. La technique du vérin plat permet de mesurer, dans des conditions pseudoélastiques de la

paroi d'essai, la contrainte tangentielle et de déterminer le facteur de concentration des contraintes en partant de certaines hypothèses sur la contrainte initiale d'après la théorie de l'élasticité.

Si la concentration des contraintes produites par le creusement déclenche des ruptures au contour de la cavité, la contrainte tangentielle mesurée représente un pourcentage de la contrainte théorique à la paroi et décroît d'une façon inversement proportionnelle aux phénomènes de décompression et de plastification (fig. 22). D'autre part, les observations faites au cours du creusement ont montré que pour des recouvrements de 0 à 600 m on avait des ruptures presque nulles au contour de la cavité et un front stable, mais que pour des recouvrements de 600 à 1 700 m on avait des ruptures diffuses près du contour avec des instabilités locales au front.

On peut donc raisonnablement affirmer que si le comportement du massif rocheux est surtout du genre pseudo-élastique pendant les premiers mille mètres de galerie, dans les 5 400 m restants il est du genre élastoplastique avec radoucissement.

Compte tenu de la nature schisteuse des formations, de leur faible serrage par rapport au côté français, on peut avancer l'hypothèse que des contraintes tectoniques résiduelles n'existent pas. Les manifestations de décompression très fortes qui se sont produites entre les p.m. 4 500 et 5 500, et que l'on pouvait penser devoir se produire pour des recouvrements plus forts, pourraient s'expliquer par une canalisation des contraintes et, plutôt que de dépendre de la morphologie, pourraient dépendre du jeu des grands systèmes de discontinuité qui séparent la masse métamorphique intéressée par le tunnel et des reports d'efforts par effets de voûte, créant ainsi des concentrations locales de contraintes, d'où l'hétérogénéité de comportement du massif sur de courtes distances (Panet).

Le tunnel du « Gran Sasso »

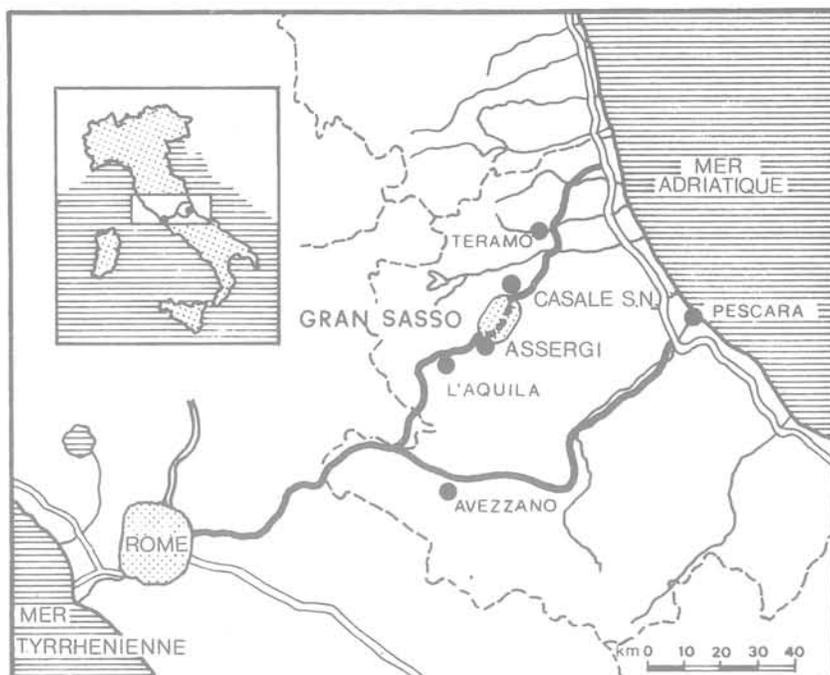


Fig. 23

1 Caractéristiques de l'ouvrage

Le tunnel du Gran Sasso, dans l'Italie centrale, avec ses 10,170 km relie le système autoroutier du côté Tyrrhénien à celui du côté adriatique (fig. 23), en passant sous la chaîne du Gran Sasso au moyen de deux galeries d'entre-axes variable entre 45 et 90 m fonction du recouvrement.

Le tracé en plan des deux galeries, à peu près orientées SO-NE, présente deux lignes droites pratiquement parallèles de 4 666 m de longueur pour le tube droit et 6 438 m de longueur pour le tube gauche, raccordées aux extrémités par des tournants qui conduisent aux entrées respectives vers la localité « d'Assergi » du côté de Rome et vers la localité de « Casale S. Nicola » du côté de Teramo. L'altimétrie du tunnel présente un sommet à peu près à la moitié du tracé avec des pentes, dirigées vers les sorties, de 0,2 % du côté de Rome et de 1,6 à 2 % du côté de Teramo. Les recouvrements, qui vont de quelques mètres jusqu'à un maximum de 1 300 m au droit du sommet du Monte Aquila, augmentent graduellement dans les trois premiers km à partir des entrées pour se stabiliser autour d'une valeur moyenne de 1 000 m dans la partie centrale.

Les sections-type adoptées sont les suivantes (fig. 24) :

- 1) une section sans arc renversé, utilisée dans les formations de calcaires dolomitiques, avec des surfaces de creusement variables entre 80 et 90 m² et avec une dimension maximale de 8,5 × 12 m;
- 2) une section avec un arc renversé, réalisée dans la série marno-arenacée avec une surface de creusement utile variable entre 100 et 120 m² et avec une dimension maximale de 11,5 × 12,5 m.

Les deux sections-type ont, dans le radier, des collecteurs pour l'écoulement des eaux drainées par les galeries, capables d'un débit pouvant atteindre jusqu'à quelques m³/s. Sur le côté de Casale S. Nicola, le projet a prévu la construction d'un tunnel à section réduite (23 à 30 m²) qui passe à 12 m environ sous le niveau de l'autoroute le long de la ligne médiane comprise entre les deux galeries; la fonction de cet ouvrage a été de servir de galerie d'essai pour les deux galeries principales et d'être utilisé pour la ventilation et l'écoulement des eaux à travers la série marnreuse.

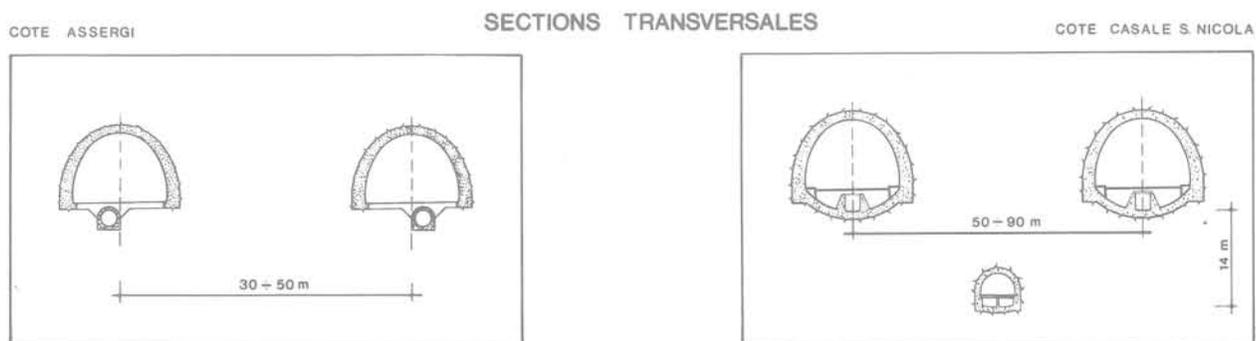
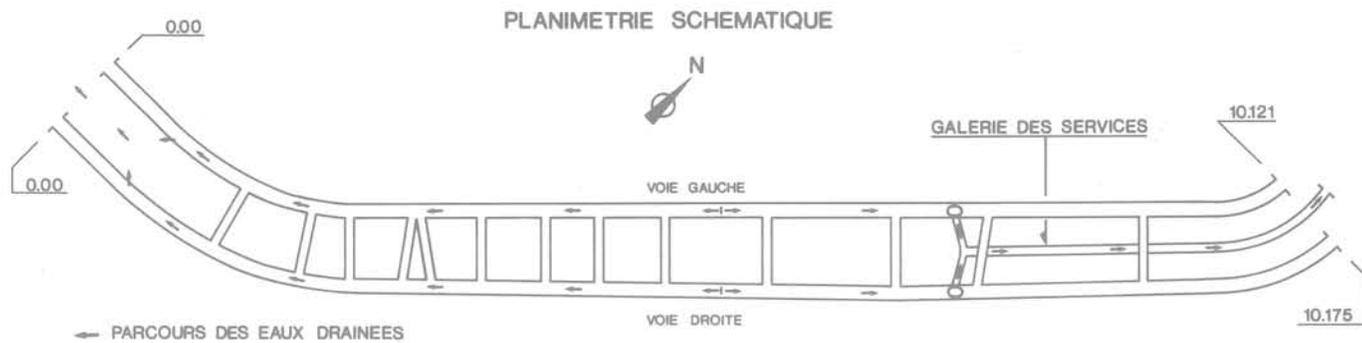
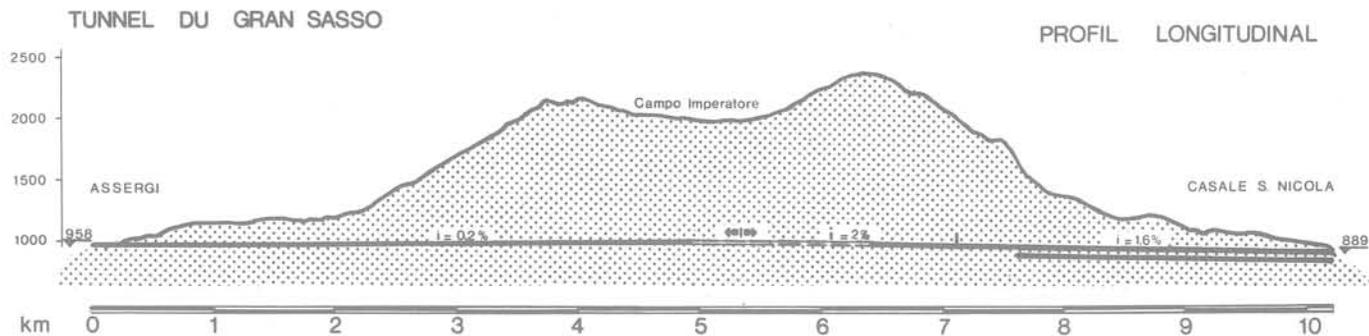
L'abattage du rocher pendant l'avancement à partir des deux entrées est réalisé au moyen d'explosif. Le soutènement immédiat de la cavité a été réalisé avec des cintres métalliques avec un entre-axes variable de 0,8 à 2,5 m et avec du béton projeté de 20 à 40 cm d'épaisseur.

Le revêtement définitif, construit en pleine section, est effectué à une distance d'environ 300 m du front. Le tunnel, entièrement réalisé par la Société Cogefar, a entraîné des difficultés hors pair. Il a été commencé en 1968 et l'abattage des derniers mètres est prévu pour le début de 1980.

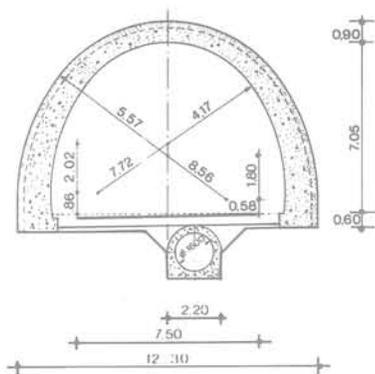
2 Géologie du tunnel

Le plateau calcaire du Latium et des Abruzzes, dont fait partie le massif du Gran Sasso, est constitué par une puissante série sédimentaire qui s'est formée dans une zone fortement subsidente pendant une période assez longue qui va du Trias au Miocène (fig. 25).

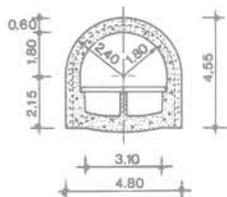
La succession lithologique comprend, à partir de la base, des dolomies et des calcaires dolomitiques du Jurassique, des calcaires siliceux stratifiés ou bien des



SECTION TYPE DANS LES CALCAIRES



SECTION TYPE GALERIE DES SERVICES



SECTION TYPE DANS LES MARNES

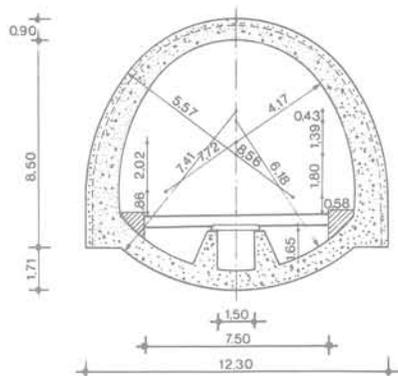
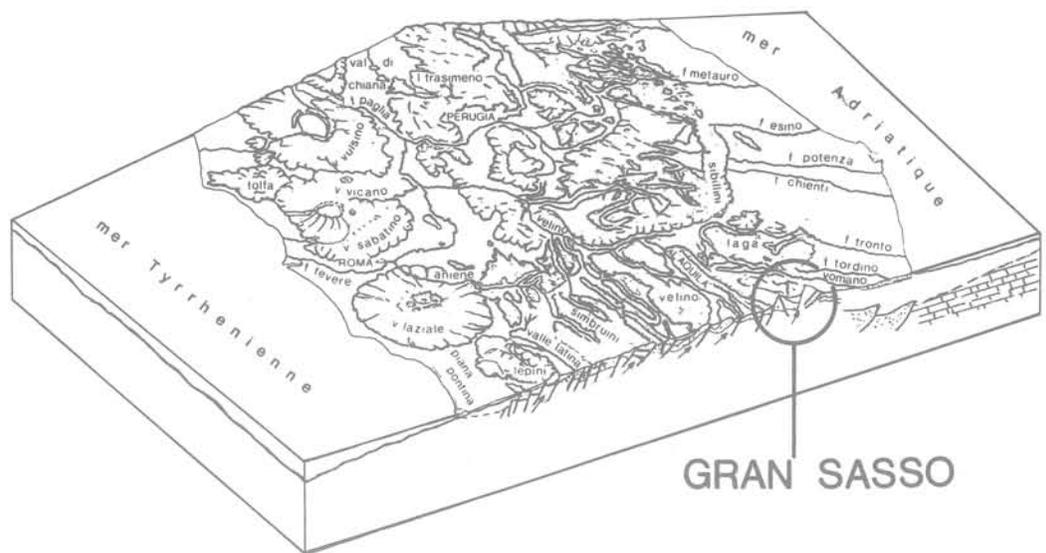


Fig. 24



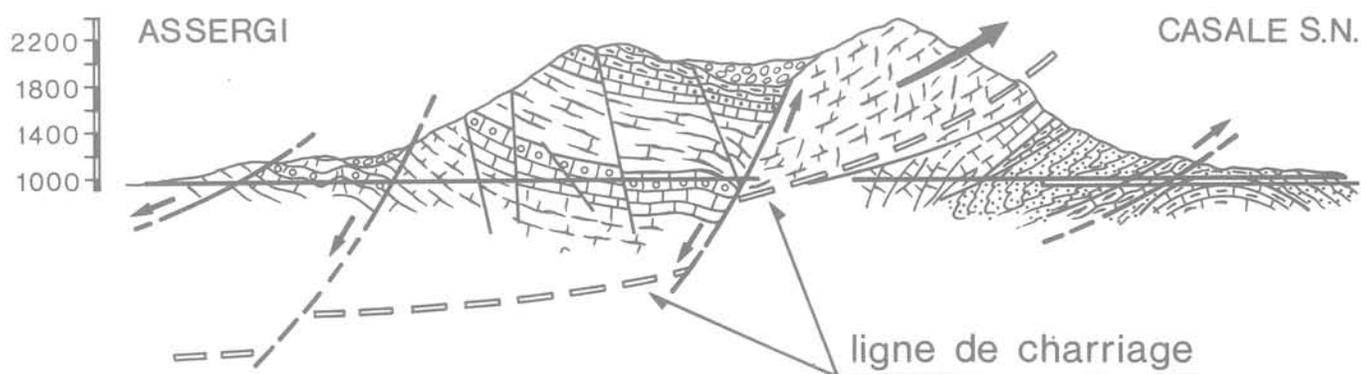
GRAN SASSO

MORPHOLOGIE

- Plaine
- Haut plateaux et collines
- Reliefs montagneux

GEOLOGIE

- Quaternaire
- "Flysch de Frosinone" (Messinien - Torlonien)
- Argilles écailleuses (Eocène - Crétacé)
- Calcaires en facies de shelf (Crétacé - Jurassique inf.)
- "Calcaire Massiccio" (Jurassique inf.)
- Anhydrites de Burano (Trias sup.)
- Failles
- Base du Pliocène dans la plateforme calc. adriatique



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

Fig. 25

massifs détritiques du Crétacé, des calcaires marneux du Miocène et enfin un manteau épais du flysch arenacé qui s'est sédimenté dans des bassins fermés plus ou moins étroits.

Dans son ensemble, l'évolution de toute la série sédimentaire des Abruzzes est du genre miogéosynclinal avec une phase tardive de sédimentation de flysch.

A partir de la fin du Miocène, à cause d'une plus grande subsidence des régions adriatiques, il s'est produit, au niveau des anhydrites plastiques du Trias, un détachement du substrat de certains blocs calcaires-dolomitiques qui faisaient partie du plateau primitif et qui ont glissé dans la direction de l'Adriatique. Ceci a déterminé la formation de grandes structures ample-ment surglissées en direction NE au-dessus des séries marno-calcaires qui étaient devant elles et qui s'en sont trouvées plissées et intensément tectonisées.

Conformément à ce schéma structural, on peut reconnaître dans le Gran Sasso, (qui constitue le massif montagneux le plus externe), un bloc calcaire dolomitique, formé dans son ensemble par un grand monoclin, qui est surglissé au-dessus d'un bloc calcaire dolomitique changeant en marneux, partiellement renversé. Dans le monoclin on trouve surtout une tectonique de détente, qui tend à le rabaisser progressivement en grands blocs vers les zones préalablement mises à nu. Les failles directes les plus importantes qui la caractérisent et dont le rejet dépasse parfois mille mètres, sont mylonitisées d'une manière très évidente et constituent des cloisons imperméables qui maintiennent une piézométrie élevée à l'intérieur de chaque secteur. Dans le bloc calcaire, partiellement en série renversée et sur lequel est surglissé le précédent, le comportement des masses rocheuses a été fortement différencié à cause de la poussée du surglissement :

- 1) dans les marnes plus ou moins calcaires du Miocène supérieur, rencontrées dans la galerie sur une longueur d'environ 3 000 m, l'effet de compression a produit une auréole étendue de tectonisation et de lamination à partir de la zone de contact avec les formations plus raides, qui s'atténue progressivement sur des distances de l'ordre de quelques centaines de mètres. En outre d'importants phénomènes de tectonisation, avec la formation de véritables marnoschistes, ont eu lieu même sous des recouvrements modestes, en fonction de l'extrusion d'écaillés tectoniques secondaires, rencontrées près des entrées;
- 2) dans les calcaires stratifiés du Paléocène et du Miocène moyen-inférieur, dont la puissance au niveau des galeries autoroutières est variable par suite du chevauchement d'écaillés de vingt à quelques centaines de mètres entre les p. m. 3 000 et 3 300 du côté de Teramo, la tectonisation est visible avec la formation de très petites écaillés de plissements de rayon plus ample.
- 3) dans les calcaires plus raides du Crétacé, l'effet du surglissement a produit une série de grosses écaillés tectoniques de grandeur différente, qui se sont superposées et qui se sont pénétrées le long de faisceaux de failles et de fractures verticales en direction NS, généralement aquifères. En plus, le surglissement a intéressé complètement la masse des calcaires stratifiés avec un réseau de micro-fractures fermées du genre stylolithique.

Sous le profil hydrologique, la situation tectonique et structurale qui vient d'être décrite permet une intense

et abondante circulation d'eau dans les formations calcaires dolomitiques, à travers un système de couches communicantes le long de bandes karstiques sub-horizontales, en opposition desquelles on trouve une imperméabilité absolue dans les formations marneuses sur les derniers 30 % du tracé de l'autoroute.

3 Étude géologique et géomécanique pour le comportement des cavités

Au début des travaux, en 1968, les connaissances géologiques étaient très réduites et limitées aux données découlant des observations de surface et des relevés aérophotogrammétriques, tandis que les connaissances géotechniques étaient pratiquement inexistantes.

Par la suite, avec l'excavation des entrées sur les deux côtés, à cause de l'importance de l'ouvrage et des nombreuses difficultés rencontrées au cours de l'avancement, on a effectué une série de relevés systématiquement détaillés, concernant la lithologie, la stratigraphie, la sédimentologie, la tectonique, l'hydrologie, la géotechnique, etc..., qui se sont prolongés pendant toute la durée des travaux et qui sont en cours encore actuellement à une centaine de mètres de la conclusion.

Les résultats de ces relevés obtenus grâce à trois sondages verticaux profonds (jusqu'à 1 400 m) exécutés en partant de l'extérieur, de sondages de prospection longue (jusqu'à 300 m), exécutés à l'avancement au-delà du front ainsi que ceux des mesures expérimentales *in situ* et en laboratoire, sont synthétisés sur la figure 26 et rassemblés dans une série de diagrammes et de tableaux que l'on examinera plus loin.

Alors que l'étude et les relevés de géologie générale et l'hydrologie ont été étendus à tous les tunnels, l'étude géostructurale de détail et l'étude géomécanique ont été limitées à certaines zones.

Les étapes principales de la construction du tunnel peuvent être résumées comme suit :

- traversée de la formation calcaire dolomitique avec le problème de l'avancement à travers des roches aquifères sous des pressions hydrostatiques variant jusqu'à 6 MPa, en présence de sols plus ou moins consistants, et par conséquent avec la nécessité de maîtriser les gradients hydrauliques autour des excavations;
- traversée de la formation marno-calcaire, avec le problème de soutènement autour des excavations par des interventions de consolidation, et avec le problème des décompressions liées à des états de surcontrainte de la masse rocheuse.

Les exécutants du projet, qui étaient obligés, tous les jours, de résoudre ces problèmes, devaient donc nécessairement ouvrir des campagnes d'étude adéquates, pour être guidés dans le choix et dans la réalisation des interventions. Du même coup, ces études ont été développées et concentrées exclusivement là où les instabilités pouvaient compromettre sérieusement la possibilité d'exécuter le tunnel, et en particulier dans la traversée de la formation marneuse au-dessous de recouvrements considérables (p. m. 0 à 3 000 du côté de Teramo), dans le franchissement de brusques fronts de pression hydrostatique, en présence, ou non, de matériaux incohérents (faille de

Dans son ensemble, le versant septentrional du « Gran Sasso » est constitué par une structure à pli-faille couchée dont le flanc renversé (zone C) est, par la suite, coulé partiellement sur le flanc droit (zone B).

Cette évolution géostructurale a déterminé quelques bandes tectonisées, particulièrement développées :

- 1) dans les marnes entre les zones A et B, comprises entre l'anticlinal calcaire et l'écaïlle tectonique. Ici les marnes paraissent complètement subdivisées en de petites écaïlles brillantes pour une puissance d'une centaine de mètres environ, ayant perdu toute trace de la stratification originaire;
- 2) à la limite entre les zones B et C, dans la zone supposée de « charnières ». Ici les couches ont une disposition variable et chaotique sur un tronçon de 20 à 30 mètres. En effet, les couches de la zone C sont renversées, et à pente modérée (40°), alors que les couches de la zone B sont beaucoup plus inclinées (75°) à proximité de la zone de faille, là où existe le phénomène de surgissement de la zone C sur la zone B;
- 3) près de la zone de contact avec le calcaire marneux Tortonien, au p.m. 3060, là où en plus d'une augmentation de la qualité et de la grandeur des plis on peut observer une variation évidente de la disposition à cause de l'axe des plis placé en direction E-O, parallèle à l'axe de contact avec le bloc calcaire de surgissement.

● **Lithologie** : la définition des types lithologiques constituant la formation marneuse a été basée, au-delà de l'aspect visuel de la roche, sur les analyses morphométriques, minéralogiques et de texture d'échantillons représentatifs. Ces déterminations ont permis d'établir trois « familles lithologiques » principales : les calcaires marneux, les grès et les marnes. Mais dans la masse rocheuse on rencontre la gamme entière des **lithotypes** marneux intermédiaires.

a) **Calcaires marneux** : ce lithotype comprend des termes ayant une teneur en CaCO_3 comprise entre 70 % et 90 %.

b) **Marnes** : cette roche est homogène et compacte, avec une coloration d'ensemble gris-noirâtre, et en général elle présente une texture orientée. Un faciès tout à fait particulier des marnes est représenté par les marnes « laminées ». Cette dénomination se réfère à des lithotypes qui peuvent être rapportés — originairement — à des marnes ou des siltites stratifiées, qui, par suite des contraintes tectoniques considérables, ont été réduites à des petites écaïlles centimétriques juxtaposées, dans lesquelles toute trace des structures sédimentaires primitives a disparu. La composition minéralogique de la marne et de la marne laminée est indiquée dans le tableau de la figure 27.

c) **Grès** : les grès sont des lithotypes compacts gris-clair, à texture orientée avec un parallélisme des veines minérales opaques, des phyllosilicates et des granules lithiques. La fraction détritique (70 % environ) est constituée, en général, par des granules sableux de 1/4 à 1/8 de mm environ, et, dans quelques couches, par des éléments lithiques de plus de 1 mm de diamètre.

Souvent, les faciès arénacés mettent en évidence, dans la partie inférieure des blocs, une sédimentation graduée avec des empreintes de base typiques; alors que vers le sommet, ils vont graduellement aux siltites et aux marnes.

● **Profils structuraux** : les roches dans les tunnels peuvent être schématiquement réduites à 6 catégories géostructurales élémentaires (fig. 28).

1) **Calcaires marneux** : en bancs réguliers, d'une puissance jusqu'à 2 à 3 m avec une interstratification de rares niveaux de plusieurs décimètres de marnes laminées. Dans ce lithofaciès les joints de stratifications présentent des surfaces polies, et parfaitement lisses. Quelques diaclases, souvent avec une recimentation de calcite, présentent des striures évidentes, avec une périodicité de 2 à 3 m environ : elles entrecoupent des bancs calcaires perpendiculairement à leur stratification, en isolant des blocs de dimensions considérables (supérieurs à 1 m^3).

MINERAUX	MARNE	MARNE LAMINEE
quartz	20 %	15 ÷ 20 %
feldspath	5 ÷ 10 %	5 %
mica	5 ÷ 10 %	20 ÷ 25 %
montmorillonite	5 %	10 ÷ 15 %
kaolin	5 %	20 ÷ 30 %
oxydes de fer	5 %	—
illite	5 %	—
calcite – dolomite	30 ÷ 45 %	20 ÷ 25 %

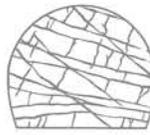
Fig. 27

POUR LA MATRICE

- (a) microcassures avec recimentation calcaïque et texture isorientée
- (b) cassures locales à surface lustrée
- (c) cassures avec intercalations millimétriques de matériau laminé

POUR LE MASSIF ROCHEUX

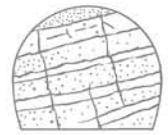
- (d) cassures larges avec intercalations lenticulaires de plusieurs centimètres ou avec surfaces lustrées
- (e) joints de strate
- (f) failles avec bandes tectonisées



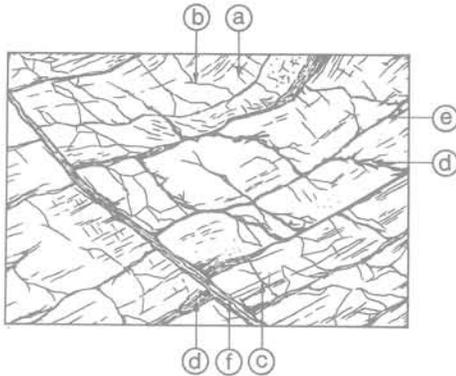
1
calcaire marneux



2
marne



3
grès



4
marne à bancs minces



5
marne à couches minces irrégulières



6
marne laminée

Fig. 28

- 2) **Marnes** : en bancs de 2 à 3 m de puissance, avec des discontinuités structurales, pratiquement similaires à celles de la catégorie précédente. Les joints de stratification présentent non seulement des surfaces polies, mais aussi des bandes laminées considérables.
- 3) **Grès** : en gros bancs (de 1 à 4 m), avec intercalation de couches de plusieurs décimètres de marnes, ou de marnes très laminées.
- 4) **Marnes** : en bancs peu puissants (inférieurs à 1 m), avec interstratification de marnes argileuses et de niveaux argileux, avec des joints de stratification translucides passant à des marnes laminées. De grandes surfaces de glissement, polies et concaves au travers des bancs, surtout en direction NNE, et avec les joints de stratification, isolent normalement des blocs de quelques dm³.
- 5) **Marnes** : en couches irrégulières peu puissantes, incorporées dans une matrice considérable de marne laminée. Des discontinuités très nombreuses d'éléments rigides, éloignées entre elles, en général de quelques décimètres, isolent une série de petits blocs plus ou moins interdépendants, de moins de 1 dm³ de volume, pratiquement plongés dans une masse constituée par des petites écailles et par de la marne laminée.
- 6) **Marnes laminées** : elles constituent la limite extrême de la décomposition des marnes. Ce lithofaciès consiste en des écailles très petites, ayant jusqu'à 10 mm d'épaisseur, parfois à l'état plastique, juxtaposées et serrées, avec des surfaces polies et onctueuses. La masse rocheuse est formée, ici, par des frisements et de petites lentilles résiduelles de marne silteuse.

• *La classification des joints* : elle était considérée comme importante uniquement pour les catégories 1 à 4. Deux types principaux de discontinuités structurales ont été reconnues d'après leur origine, leur fréquence et leur dimension : les discontinuités de la matrice et les discontinuités de la masse rocheuse tout entière; l'origine du premier type est liée aux phénomènes diagénétiques du sédiment; celle du second aux phénomènes tectoniques et à la sédimentation (fig. 28).

Pour la matrice :

- a) des microfractures avec recimentation de calcite à texture orientée;
- b) des fractures locales à surfaces polies;
- c) des fractures à bandes centimétriques de matériau laminé;

Pour la masse rocheuse :

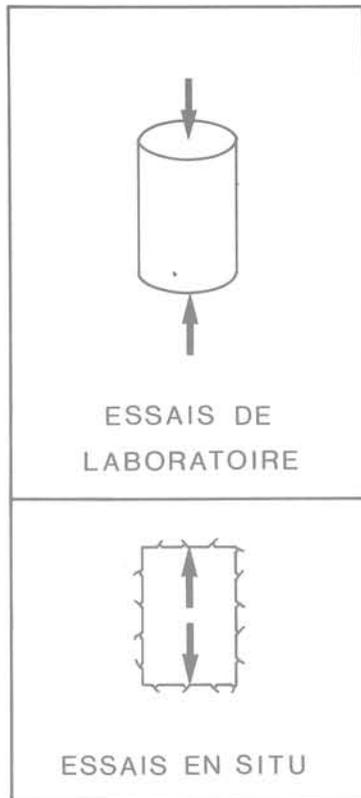
- d) de grandes cassures à bandes lentiformes de plusieurs décimètres d'épaisseur ou bien à surfaces polies;
- e) des joints de couche;
- f) des failles avec des bandes tectonisées considérables.

L'orientation principale de la fracturation dans les bancs rigides (N-S) est pratiquement orthogonale à celle de la stratification (E-O). Dans les couches de marne argileuse il y a une schistosité importante subparallèle aux joints de couche.

Le développement et l'uniformité de la distribution des discontinuités des types b-d confèrent à la masse une structure typique de blocs juxtaposés : le volume des

TUNNEL DU GRAN SASSO

	G	CM	MG	M	ML
W %	0,7	1,7	—	2,8	9,4
γ_d [KN/m ³]	0,25	0,26	—	0,25÷0,26	0,22÷0,23
CaCO ₃ %	—	75	—	35÷65	25÷40
σ_f [MPa]	85	72,5	—	37,5	—
σ_t [MPa]	9	5,6	—	2,4	—
C [MPa]*	—	—	—	0	0
ϕ *	—	—	—	38	33
E_s [MPa]	19000	—	—	10000	
E_s [MPa]	—	—	6280	3780	2500
σ_{gd} [MPa]	—	—	10	8	4,5
σ_T [MPa]	—	—	8,2	5,4	2,7
V_L [m/s]	—	5500	4500	—	3000
E_{dyn} [MPa]	—	89000	57000	—	23000



* Mesures le long des joints de lamination

G = GRES

MG = MARNE A BANCS DE GRES

CM = CALCAIRE MARNEUX

M = MARNE

ML = MARNE LAMINEE

Fig. 29

blocs est de 0,5 à 1 m³. Les caractéristiques structurales de type « a » pour la matrice, et de type « e » pour la masse, déterminent une anisotropie générale de la roche. En outre, les alternances fréquentes et répétées de couches de marne, de marne laminée, de grès, confèrent à tout l'ensemble un caractère hétérogène. Ces deux caractéristiques particulières, anisotropie et hétérogénéité, justifient la classification de cette formation parmi celles à « structure complexe ».

L'étude hydro-géologique effectuée par les trois sondages verticaux profonds déjà mentionnés (« Fontari », « Vaduccio », « M. Aquila ») et par les relevés systématiques des sondages de prospection en partant des tunnels, au-delà des fronts d'avancement, a donné les résultats indiqués sur la figure 26 pour les débits, les pressions et les perméabilités.

L'étude géomécanique a été effectuée au laboratoire et *in situ* (fig. 29). En laboratoire les essais ont surtout été concentrés sur la zone des formations marneuses et calcaires et ils ont donné — pour plusieurs lithotypes — les résultats indiqués sur la figure 29.

La porosité était directement proportionnelle à la variation de CaCO₃ : dans les lithotypes laminés sa valeur est assez élevée d'après les essais sur des blocs, et parfois plus proche de ce que l'on obtient pour des sols que pour des roches.

Pour chaque lithotype la résistance à la compression simple de petites éprouvettes orientées parallèlement à la stratification a été inférieure de 10 % environ. Quelques échantillons de marne ont mis en évidence une résistance plus élevée, de 25 % environ, due à l'orientation des minéraux lamellaires.

Les histogrammes de la résistance à la compression et à la traction (fig. 30), des principaux lithofaciès ont mis en évidence une influence prépondérante du pourcentage de CaCO₃ et de la granulométrie de la fraction détritique, alors que la texture de la roche paraît moins déterminante.

Au contraire, pour des échantillons rocheux de grandes dimensions (L = 50 cm), la présence des discontinuités b-c-d-e a été la cause d'une réduction radicale des caractéristiques mécaniques; la résis-

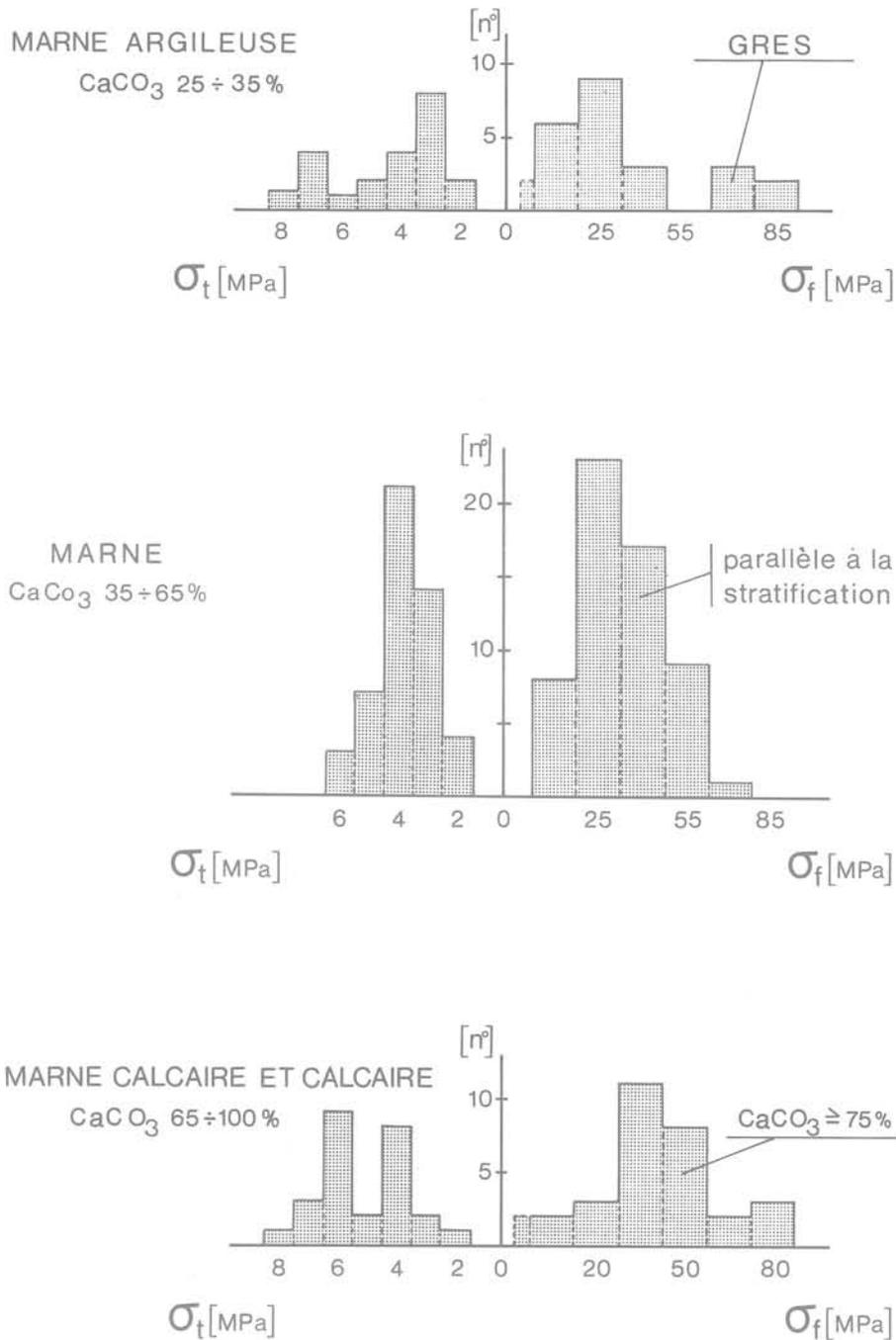


Fig. 30 Formation marno-calcaire : résultats des essais de compression monoaxiale et brésilienne

tance monoaxiale des blocs a été 10 fois inférieure à celle de la matrice pour la marne. Cet élément est indicatif du comportement de la paroi non revêtue du tunnel creusé. On a enregistré des différences considérables entre les résultats des essais de déformation sur de petits échantillons et sur de grands blocs.

Des essais triaxiaux n'ont été effectués que sur des échantillons de matrice de la marne. Sur la figure 31 on a indiqué la courbe intrinsèque et le comportement en cisaillement en laboratoire des joints dans de gros blocs de marne dure et laminée. Ces essais de cisaillement en laboratoire constituaient la seule possibilité valable pour ce type de formations complexes.

In situ on a mesuré les caractéristiques de déformabilité de la masse rocheuse et sa résistance résiduelle au bord de l'excavation au moyen de nombreux essais au vérin cylindrique et au vérin plat sur une longueur de 3 km de tunnel. Les essais au moyen de vérin cylindrique ont été réalisés dans des niches creusées dans les parois du tunnel. Des pressions appliquées graduellement, jusqu'à 20 MPa, ont mis en évidence des déformations très élevées. L'hétérogénéité structurale de la roche a été la cause du développement différent de la courbe du comportement, de convexe à concave (fig. 32).

Sur la figure 33 on a indiqué la comparaison entre les résultats des essais de déformabilité obtenus par différents types d'essais.

BLOC MARNEUX
HETEROGENE
dimensions : L = 50 cm

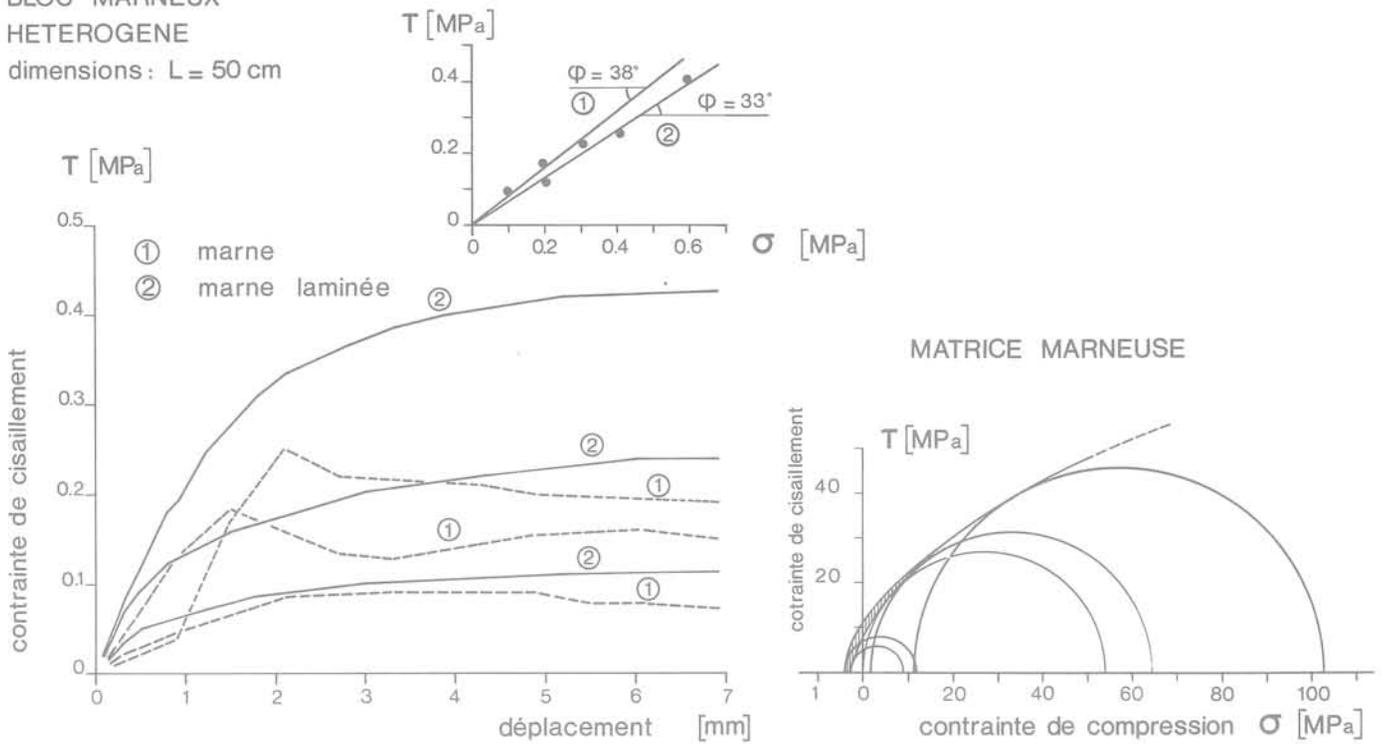


Fig. 31 Essai de cisaillement en laboratoire

Sur la base de la classification de Schneider (fig. 34), le massif rocheux présente un comportement non élastique, avec une situation de joints très serrés.

On a exécuté aussi des contrôles géomécaniques dans d'autres zones du tunnel, en particulier là où il était nécessaire de vérifier les caractéristiques de résistance et de déformabilité de la roche soumise à des gradients hydrostatiques considérables.

4 Comportement des galeries au creusement : interventions, contrôles, observations

Le creusement des deux tunnels a été effectué à pleine section à partir des deux entrées. Après chaque tir, l'avancement a été suivi par la consolidation immédiate de la cavité au moyen de cintres de section et d'entre-axes variables selon les exigences, noyés dans un revêtement préliminaire en béton projeté, dont l'épaisseur va de quelques centimètres jusqu'à 40 cm (fig. 35).

Ce genre d'intervention s'est révélé approprié aux différentes situations d'instabilité qui ont été observées le long du tracé des tunnels qui n'a subi de « collapsus » qu'en des points singuliers :

- dans la formation calcaire-dolomitique au p. m. 4 240 de la voie gauche, du côté de Rome, lors de l'éclatement d'un parement de la galerie dans une zone soumise à des recouvrements de 1 200 m;
- dans la formation marno-calcaire entre les p. m. 2 600 + 3 000 du côté de Teramo où, par effet des fortes décompressions subies par le massif chargé au-delà de sa résistance limite, un renforcement du revêtement préliminaire a été nécessaire lorsque celui-ci était complètement disloqué.

Ce renforcement a été effectué avec une autre série de cintres et par du béton projeté. Dans les tronçons de galerie plus délicats, ce genre de consolidation était constamment sous surveillance grâce à des cellules hydrauliques placées entre la roche et le revêtement, et il était renforcé et protégé de l'action des gradients hydrauliques par des injections de produits chimiques et de ciment dans les terrains sans cohésion (faille de « Valle Freda ») ou par l'exécution d'auréoles de trous de drainage dans les roches solides mais fortement fissurées et aquifères (fig. 36, 37 et 38).

Cette dernière technique, adoptée avec succès pour régulariser les gradients autour des fronts de taille, a permis de résoudre des situations particulièrement critiques comme celle de la traversée d'un front de pression de 6 MPa avec un débit maximal de 2 000 ℓ/s au droit de la faille transversale 8 et d'autres de moindre importance pour la faille de « Fontari ». Dans la traversée des calcaires-dolomitiques les interventions liées au comportement lors de l'excavation des galeries ont été limitées au drainage forcé (fig. 39) et à un traitement d'injections (fig. 40) dans quelques tronçons bien définis. Dans les marnes plus ou moins calcaires, le comportement des galeries a posé un certain nombre de problèmes qui, par plusieurs aspects, sont semblables à ceux du tunnel de Fréjus. Toutefois, contrairement à ce dernier, la consolidation des cavités n'a pas pu être réalisée au moyen de boulonnage systématique associé à du béton projeté du fait de l'extrême variabilité de la roche (si l'on excepte la zone des calcaires-marneux), de la présence d'importants bancs de marne et de l'alternance fréquente de bancs de matériau raide et de bandes laminées, toujours d'une certaine puissance, qui empêcheraient la tenue des têtes d'ancrage des boulons.

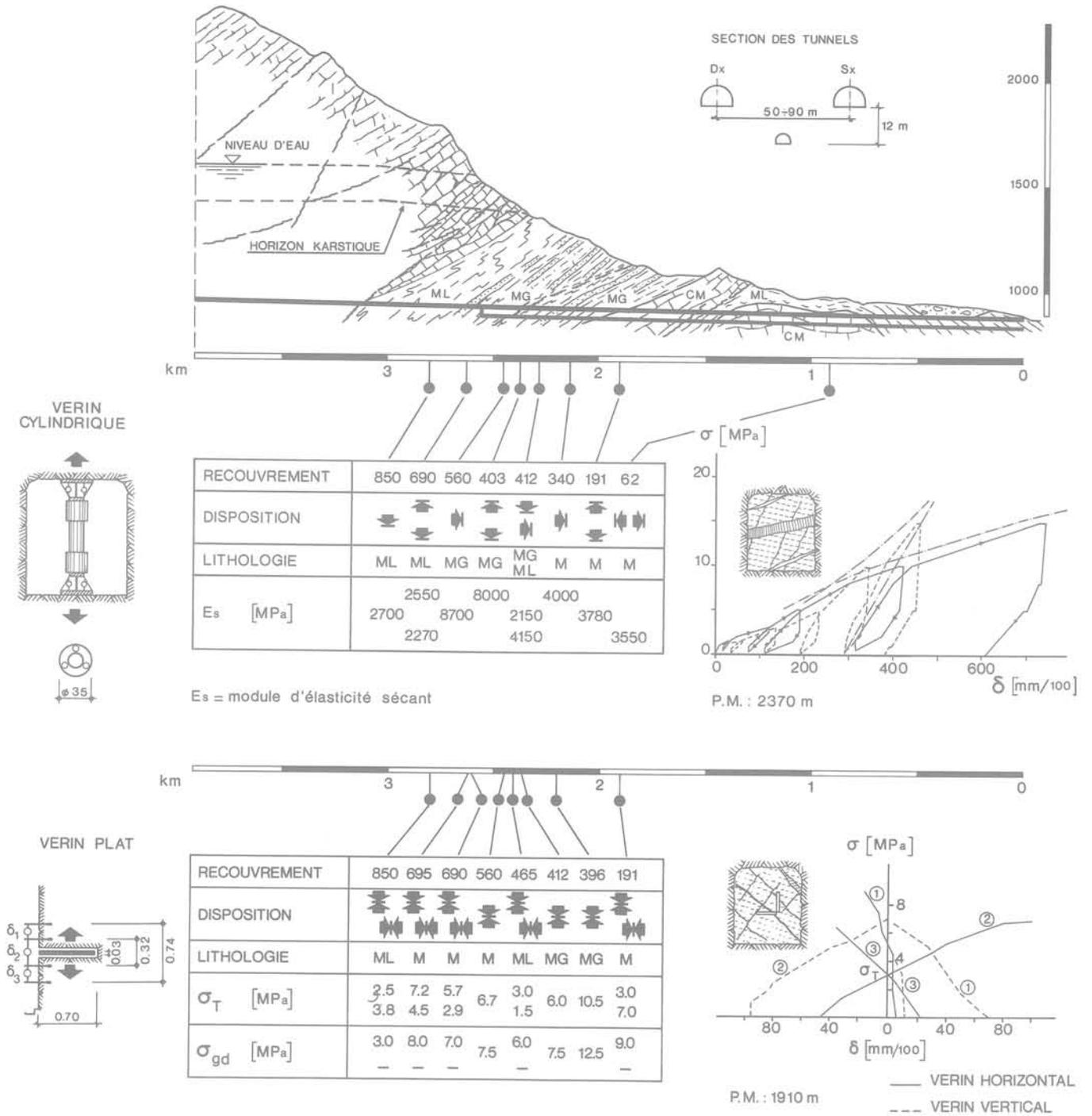


Fig. 32 Résultats des essais de vérin cylindrique et de vérin plat

Dans les calcaires-marneux le creusement des tunnels a été relativement rapide, avec des avancements compris entre 2,00 et 2,50 m après chaque tir. La stabilité de la cavité, dans son ensemble, était satisfaisante grâce aussi à la disposition particulièrement favorable des bancs.

On n'a relevé aucun phénomène qui puisse être relié aux valeurs croissantes des recouvrements compris entre 40 et 200 m environ. On a constaté des

phénomènes de rupture du genre fragile produits par le tir dans un anneau d'un mètre d'épaisseur environ autour de la cavité; ils ont été contrôlés par endoscope.

Le comportement dans les marnes et dans les marnes arénacées a varié le long de l'axe du tunnel (fig. 41). Généralement on a obtenu des avancements moyens d'environ 2,00 m après chaque tir, mais, pour d'importants tronçons du tunnel, on a dû réduire de moitié cette valeur pour des raisons de sécurité.

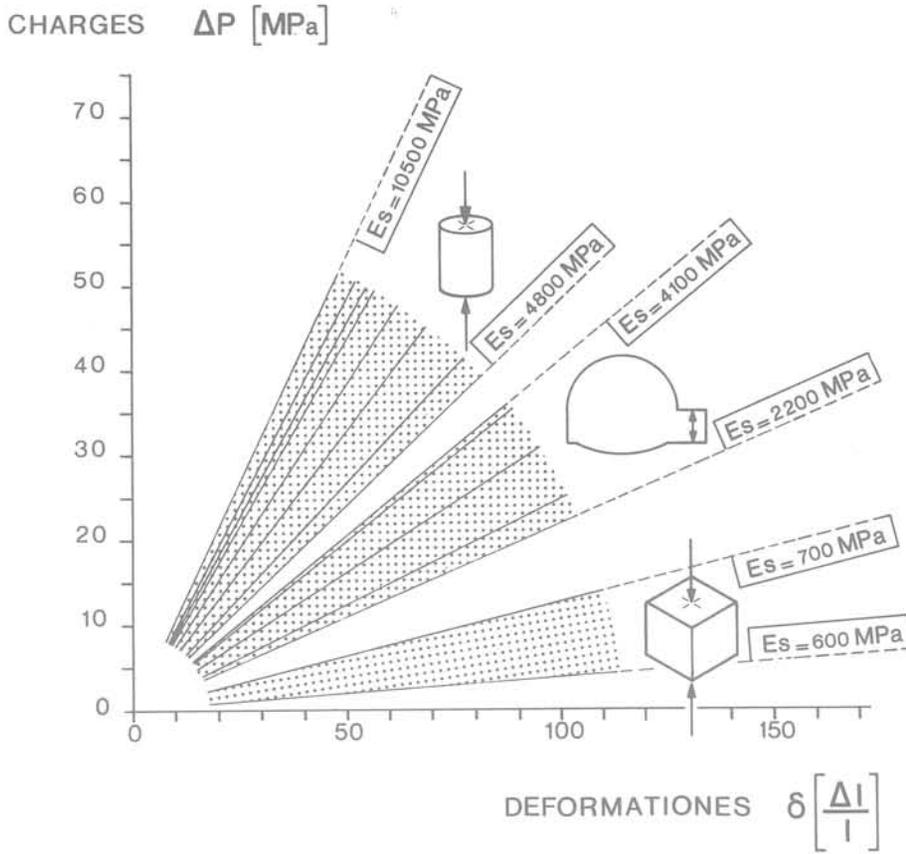


Fig. 33 Résultats des essais de déformabilité

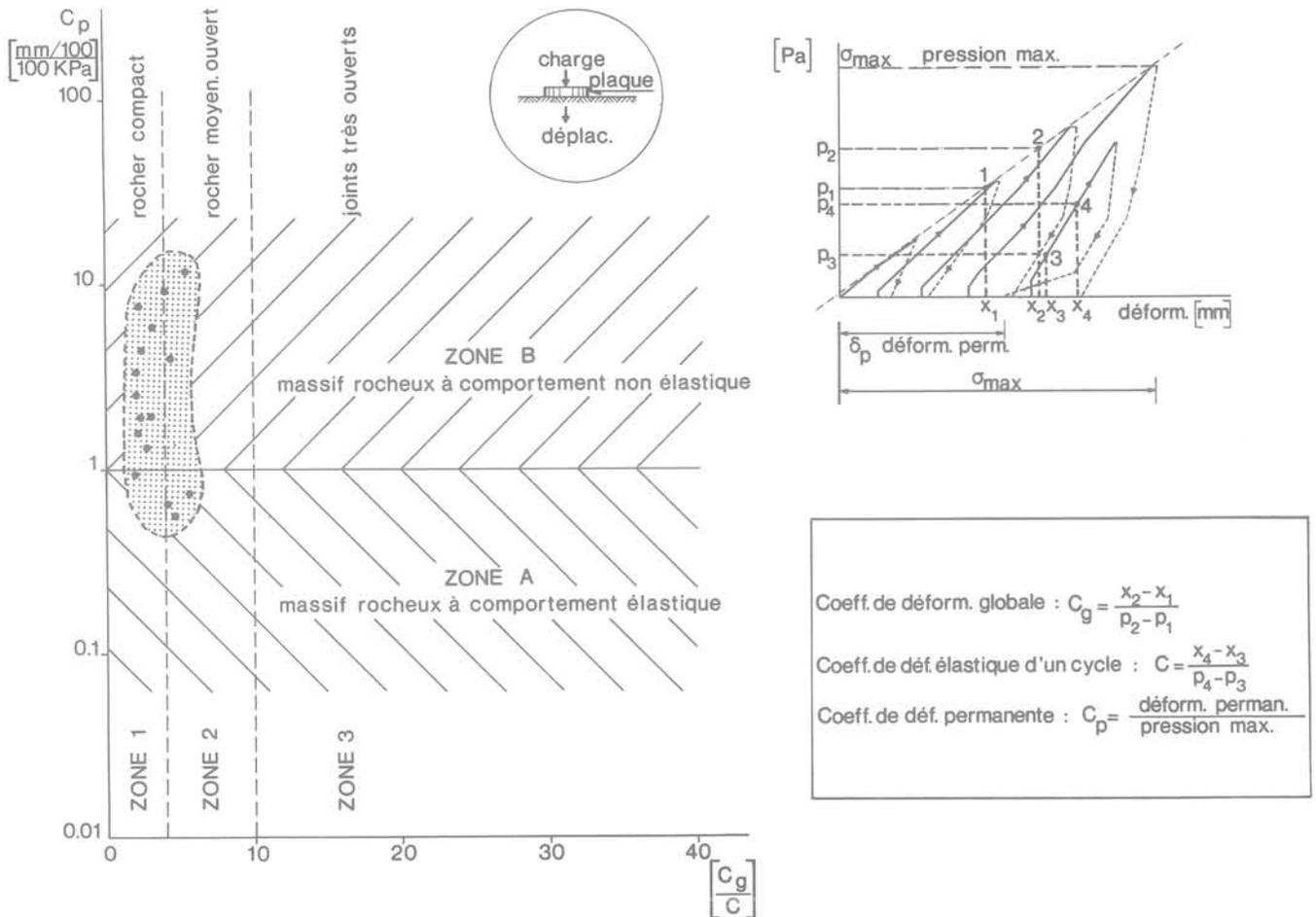


Fig. 34 Formation marno-calcaire : classification de Schneider



Fig. 35

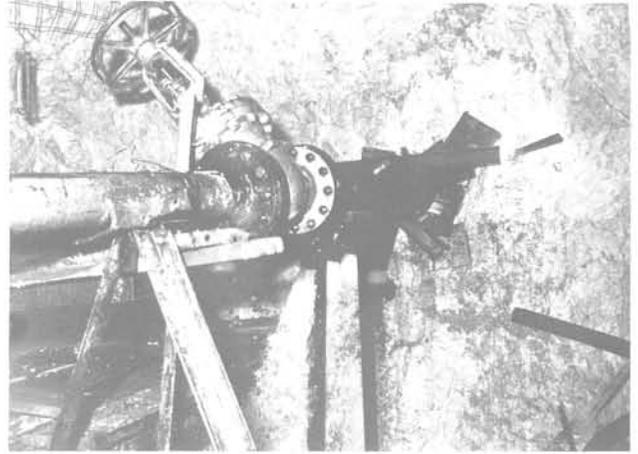


Fig. 37

Fig. 36

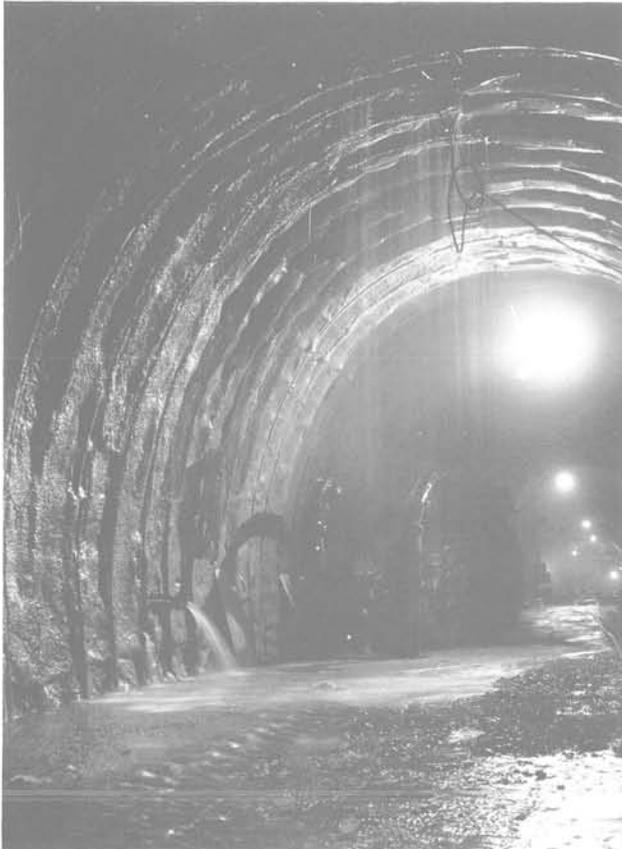


Fig. 38





Fig. 39



Fig. 40



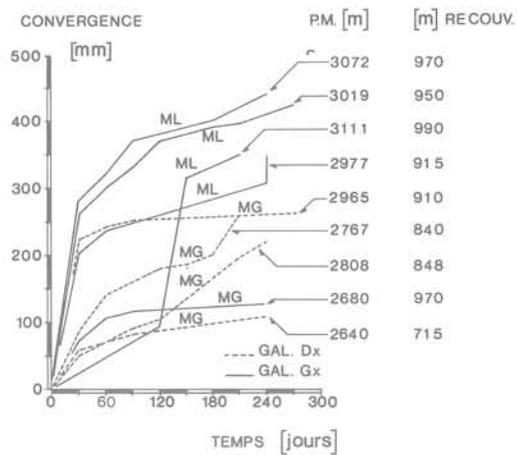
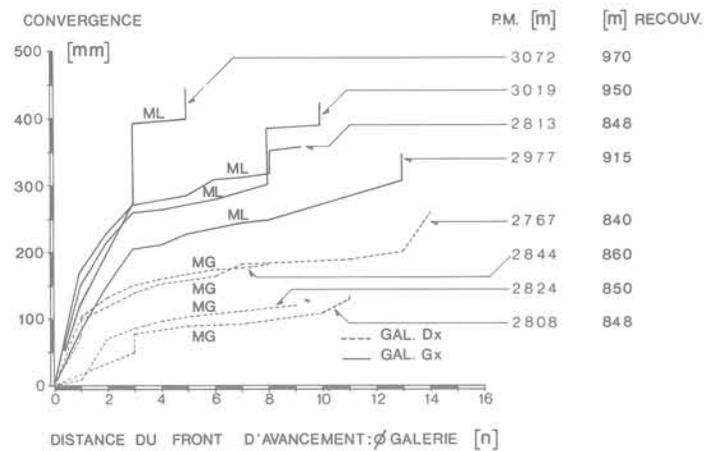
Fig. 41

Le creusement était généralement stable tant sur le front de taille que sur le périmètre de la cavité pour des recouvrements allant jusqu'à 300 m, mais pour des recouvrements supérieurs des phénomènes locaux d'instabilité se sont manifestés, avec de faibles relâchements aux reins et en calotte (fig. 42). L'anneau fracturé s'étendait en moyenne sur une épaisseur de 1,50 m. En particulier des phénomènes d'énucléation violente et soudaine à partir du front de taille, d'éléments de roche allant jusqu'à quelques mètres cubes, se sont produits en relation avec des faciès marneux, stratifiés et compacts entre les p. m. 1900 et 2250 sous des recouvrements de 300 à 500 m. Les surfaces de fracture avaient des formes conchoïdales et intéressaient plusieurs bancs apparemment stables. Les charges supportées par les structures, étaient plus ou moins symétriques et paraissaient rapidement croissantes en fonction du recouvrement. Le creusement dans les marnes laminées n'a présenté aucun problème de stabilité dans la zone A. Par contre, sous de grands recouvrements, (zone C), la stabilité était précaire et des avancements de 0,80 + 1,00 m ont seulement été possibles. Dans les pires conditions, il a été nécessaire d'adopter des soutènements immédiats sur tout le périmètre du creusement, front de taille compris. Ce dernier tendait, en effet, à prendre un profil concave. On a remarqué des phénomènes de rupture plastique sur tout le contour de la cavité. Ces phénomènes s'étendaient radialement à l'intérieur du massif rocheux sur quelques mètres et semblaient se stabiliser quelques mois après le creusement. Il en résultait des déformations très importantes qui augmentaient graduellement avec les recouvrements. Ces phénomènes engendraient des ruptures dans le soutènement, surtout en clé (fig. 43). Les pressions sur le soutènement préliminaire étaient distribuées uniformément au contour de la cavité et rendaient souvent nécessaire de mettre en œuvre un radier. Le comportement après la consolidation de la cavité a été suivi par des contrôles et des mesures dont les résultats sont résumés sur la figure 42, et mettent en évidence d'une part la présence de contraintes tectoniques résiduelles à l'intérieur du bloc marneux arénacé, et d'autre part l'évolution des déformations au contour des galeries en fonction des recouvrements.

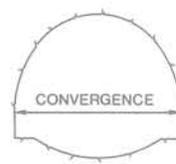
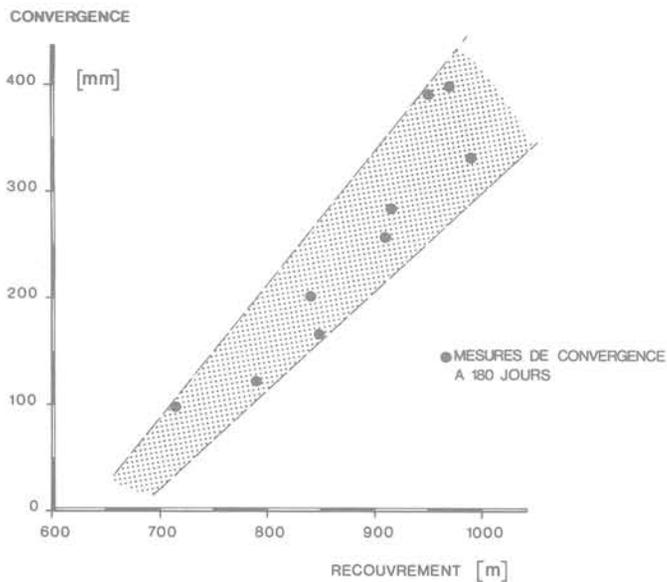
La convergence était pratiquement nulle dans le calcaire marneux; des déformations diamétrales comprises entre quelques cm et 10 cm environ se sont produites dans les marnes arénacées à partir du p. m. 2350 jusqu'au p. m. 2700, et ont atteint ensuite 45 cm dans les marnes laminées à partir du p. m. 2700.

Les résultats des mesures, résumés dans la figure 44 montrent que :

- le degré d'altération tectonique avait une importance plus grande sur la convergence que le recouvrement : ceci est mis en évidence par la comparaison des résultats obtenus dans chacune des deux galeries principales.
- les déformations les plus importantes avaient eu lieu lorsque le front s'était éloigné jusqu'à 30 ou 40 m du point de mesure;
- les déformations continuaient même lorsque l'avancement du front de taille avait été arrêté à quelques dizaines de mètres de la section de mesure; ceci démontre la présence d'effets de viscosité dans le massif rocheux.



ML = MARNE LAMINEE
 MG = MARNE A BANCS DE GRES



CAVITE CONSOLIDEE AVEC CINTRES ET BETON PROJETE

Fig. 44 Formation marno-calcaire : convergence

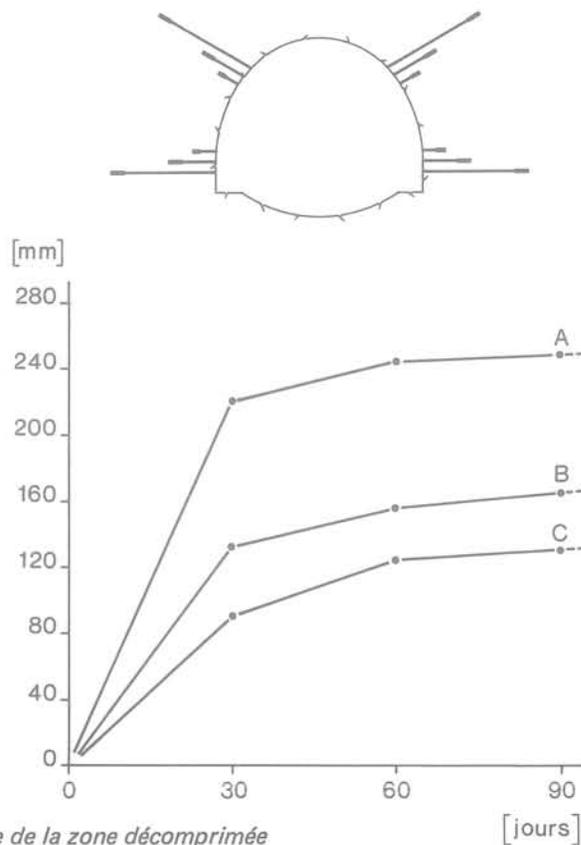
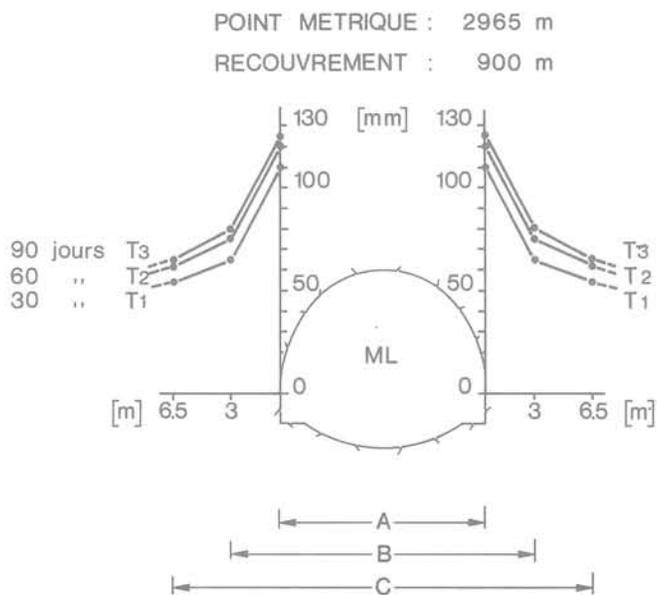


Fig. 45 Formation marno-calcaire : mesure de la zone décomprimée

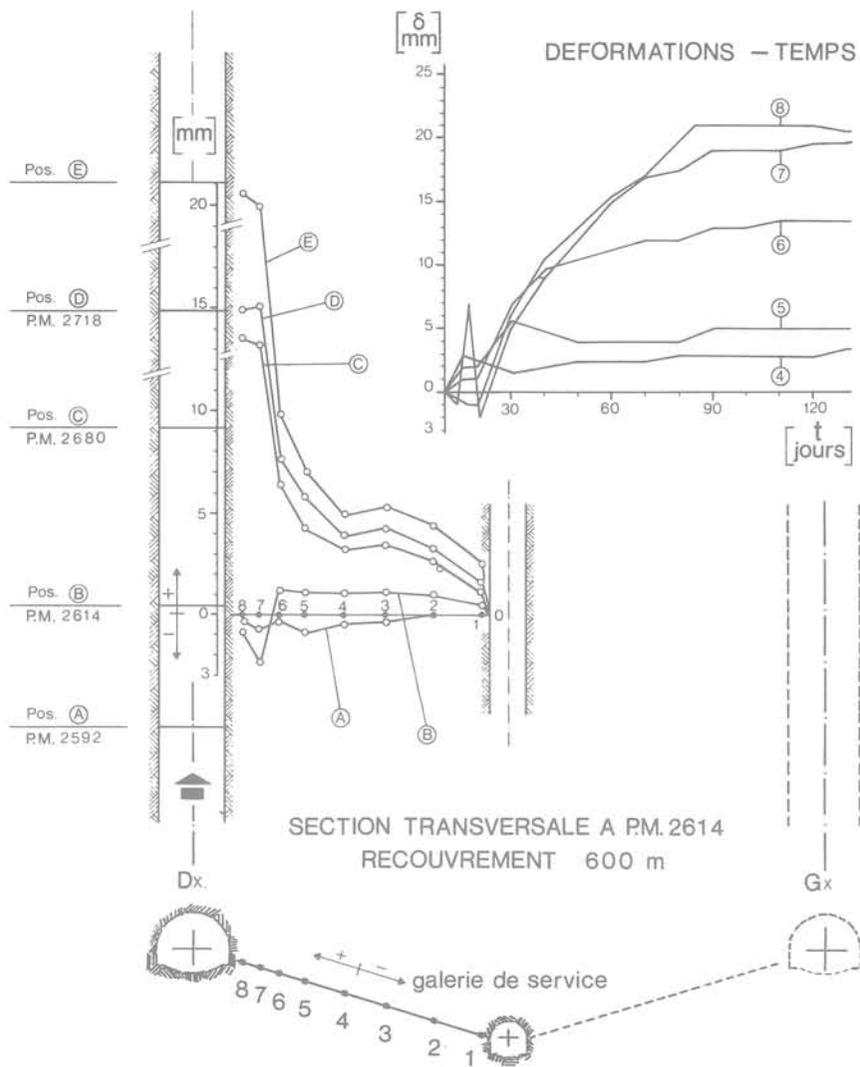


Fig. 46 Formation marno-calcaire : mesures par extensomètre à fils de la zone décomprimée

à partir du tunnel principal le relâchement final, même s'il était très réduit, s'étendait pratiquement jusqu'au tunnel de service;

- mesures de carottage sismique effectuées dans un trou (\varnothing : 75 mm - L : 40 m) creusé dans le tunnel de service. Elles donnaient des indications concernant la roche avant et après le creusement d'un des tunnels principaux. Elles mettent en évidence (fig. 47) l'importance de la zone de détente autour de la cavité, la réduction relative du module dynamique E dyn. (p. m. 2500) du massif entre le tunnel de service et la galerie de droite déjà creusée plutôt que celle de gauche qui est encore à creuser, enfin la présence de nombreuses bandes de marne laminée;
- mesures de contraintes normales derrière les revêtements avec des cellules Glöetzl. Ce programme a été très intensif. Dix stations, placées

d'après le schéma de la figure 48, ont été mises en œuvre directement au front : les appareils ont été installés entre le rocher et le soutènement préliminaire. Dans le calcaire marneux et dans la marne arénacée avec des recouvrements petits et moyens, on a enregistré des pressions n'excédant pas 0,5 MPa, distribuées pour la plupart d'une façon asymétrique. On a remarqué une nette dominance des pressions verticales se réduisant au fur et à mesure que le recouvrement augmentait. Dans la marne laminée, sous des recouvrements importants, on a enregistré des pressions jusqu'à 1,2 MPa avec une distribution uniforme; cependant, là où les déformations maximales ont engendré une rupture de l'anneau du soutènement préliminaire, les circuits hydrauliques des cellules ont été mis hors service et c'est pourquoi il n'a pas été possible de mesurer des pressions plus importantes.

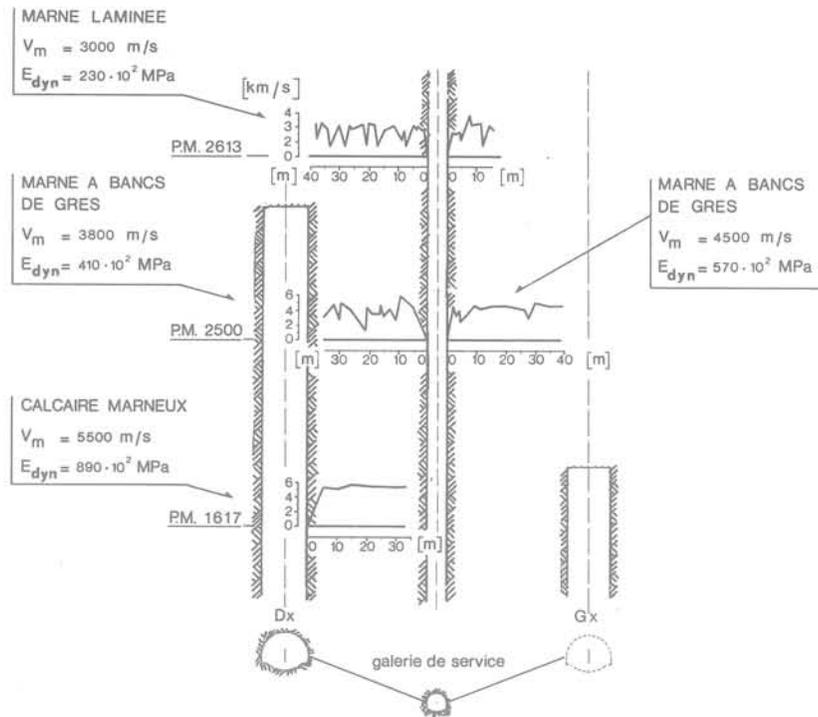


Fig. 47 Formation marno-calcaire : auscultation du massif par carottage sismique

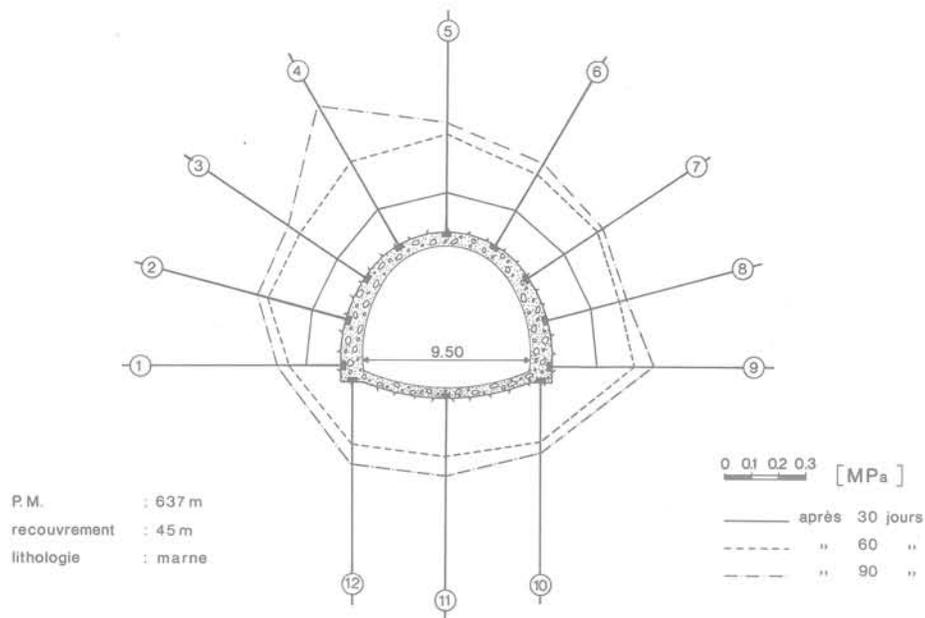
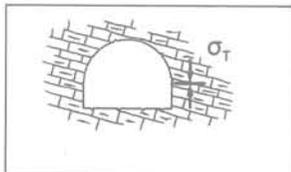


Fig. 48 Formation marno-calcaire : mesures de pression sur le revêtement par cellules Gloetzl

TUNNEL DU GRAN SASSO



	M	MG	MG	ML	M	M	M
P. M. [m]	1910	2210	2370	2420	2450	2610	2797
H [m]	191	396	412	465	558	695	850
γH [MPa]	4.77	10.3	10.7	10.23	13.95	17.4	21.25
σ_T [MPa]	3	10.5	6	3	6.7	5.7	2.5
σ_T [MPa]	7	-	-	1.5	-	2.9	3.8

M = MARNES
MG = MARNES A BANCS DE GRES
ML = MARNES LAMINEES

Fig. 49 Mesures de contrainte à la paroi

Les mesures de contraintes tangentielles aux parois des tunnels, effectuées avec la technique du vérin plat, ont donné (fig. 49) des valeurs σ_t de 7 à 10 MPa pour la marne arénacée et seulement de 2 à 5 MPa pour la marne. Des valeurs de σ_t et des charges lithostatiques du même ordre de grandeur ont été obtenues aux stations 1910 et 2210, alors que pour des recouvrements plus importants, σ_t n'est qu'une fraction des contraintes théoriques. Dans les stations 1910 et 2797, les contraintes mesurées avec un vérin vertical étaient double des contraintes horizontales, ce qui constitue un indice évident de la présence de contraintes tectoniques résiduelles à l'intérieur du massif rocheux, vraisemblablement dues aux poussées orogéniques du bloc calcaire-dolomitique sur les marno-calcaires.

L'étude géomécanique et le contrôle qui a suivi la consolidation de la formation des marno-calcaires ont permis d'établir que le comportement peut être partiellement interprété par la mécanique classique du discontinu rigide : sous des charges importantes les effets de rupture de la matrice se sont ajoutés à ceux d'une rupture en cisaillement le long des joints préexistants.

Dans l'ensemble, la décompression produite par le creusement dans le massif est considérable jusqu'à quelques diamètres de la paroi, avec d'importantes réductions du module élastique E. L'effondrement des caractéristiques mécaniques s'observe au voisinage des parois du tunnel. Malgré cette tendance, le comportement statique sous des charges importantes est apparu plus favorable, tout au moins à brève échéance, que ce à quoi on s'attendait d'après les recherches et les analyses traditionnelles, peut-être aussi grâce à la faible influence de l'anisotropie qui s'est atténuée au fur et à mesure que le recouvrement croissait.

Les observations faites au cours du creusement (fig. 42) n'ont permis de voir, dans la zone A, aucune forme de rupture au contour de la cavité qui, en définitive, s'est adaptée aux contraintes.

Dans la zone B, caractérisée par des matériaux rigides, très serrés et sans bandes de lamination on a enregistré des ruptures brusques et localisées typiques d'un comportement élasto-fragile, accompagnées de bruits sourds et de détachement de matériau.

Ces phénomènes ont été observés sous des recouvrements de 250 à 450 m, c'est-à-dire sous des charges lithostatiques plutôt modestes, si on les rapporte aux caractéristiques mécaniques de l'ensemble marno-arénacé. Ils paraissent confirmer, d'une part, la présence de contraintes résiduelles, et d'autre part que les contraintes à l'intérieur du massif rocheux ont été en quelque sorte canalisées par la roche saine et massive. Celle-ci est représentée dans ce cas par une puissante écaïlle tectonique englobée dans une masse de marnoschistes fortement tectonisés.

Dans la zone C, caractérisée par des marnes très laminées et serrées, la situation était caractérisée par des manifestations de libération d'énergie sous forme de décompressions lentes et différées sur tout le contour de la cavité; ces manifestations sont typiques d'un comportement élastoplastique à la rupture du massif rocheux. Le comportement du massif lors du creusement dans la formation des calcaires dolomitiques était presque partout pseudo-élastique sans phénomènes d'instabilité.

Des manifestations de décompression élasto-fragiles se sont produites sous des recouvrements de l'ordre de

1 200 m dans des zones où, par des effets tectoniques, la perméabilité, normalement élevée, se réduisait brusquement à des valeurs très modestes. Un accident très instructif s'est produit dans la formation des schistes à Aptiques (calcaires-calcifères) au p. m. 4 240 de la voie droite du côté de Rome sous un recouvrement de l'ordre de 1 200 m. Dans la zone intéressée par la galerie, les schistes à Aptiques, d'un grain assez uniforme, en couches très minces (10 à 30 cm) avec des alternances très denses de nodules et de couches de silex altéré, se présentaient dans une position monoclinale, avec une direction à peu près parallèle à l'axe de la galerie et avec une pente constamment comprise entre 25° et 30° du côté de la paroi gauche. Au point de vue tectonique, la formation était traversée par une succession dense de failles, transversales au front et sub-parallèles à l'axe de la galerie avec des rejets très réduits (fig. 50). Contrairement aux formations qui l'avaient précédée, elle présentait dans son ensemble une faible perméabilité (10^{-7} m/s).

Après avoir abandonné la formation du Malm inférieur au-delà du contact au p. m. 4 085, le creusement en voie gauche avançait par tirs successifs de 2 m accompagnés de la mise en œuvre systématique du revêtement préliminaire constitué par des couples de cintres NP 180 et de béton projeté de 10 cm d'épaisseur environ. Pendant l'avancement on a remarqué une réduction progressive de la perméabilité du massif, une diminution jusqu'à zéro des valeurs du R. Q. D. dans les sondages de prospection à l'avancement. Parallèlement des phénomènes d'instabilité au front de taille se sont manifestés sous forme d'énuclations de plaques de roche, parfois de grandes dimensions. Le détachement se produisait soudainement et le plus souvent était accompagné d'une véritable explosion suivie de projection de matériau. Au p. m. 4 240, et dans une situation géostructurale caractérisée par un enchevêtrement dense de failles (fig. 51), 15 minutes environ après l'abattage du noyau de rocher du dernier tir, l'extrusion violente et soudaine d'un volume important de roche se produisit au niveau du piédroit de droite de la galerie (fig. 52, 53, 54, 55).

L'éclatement du piédroit, suivi d'une projection de matériau à l'intérieur de la cavité, provoquait un relâchement en clef avec extrusion de pierres jusqu'au rein gauche du profil et entraînait l'écroulement d'un volume de plusieurs centaines de m³ de roches dans les derniers mètres de l'avancement et ce phénomène s'est propagé, en s'atténuant, le long du parement de droite sur un tronçon de 40 m environ à partir du front.

La galerie avait été soutenue par des cintres et du béton projeté. La rupture a causé la destruction complète des quatre derniers cintres, la déformation des 8 cintres suivants, une fissuration diffuse du béton projeté et le détachement de plaques à partir de la surface des roches qui était en contact avec le béton projeté dans la zone qui précédait le front. Le classement de ce comportement à la rupture est manifestement élasto-fragile.

Pour interpréter cet accident, et en admettant un état hydrostatique de contraintes initiales, on peut tenter d'appliquer la théorie de Kastner-Fenner (fig. 56).

On remarque alors que par rapport au cas de l'élasticité idéale, en milieu homogène et isotrope, la présence d'une faille sub-verticale et sub-parallèle à l'axe de la galerie peut altérer la distribution de σ_t au contour de la cavité en empêchant la redistribution

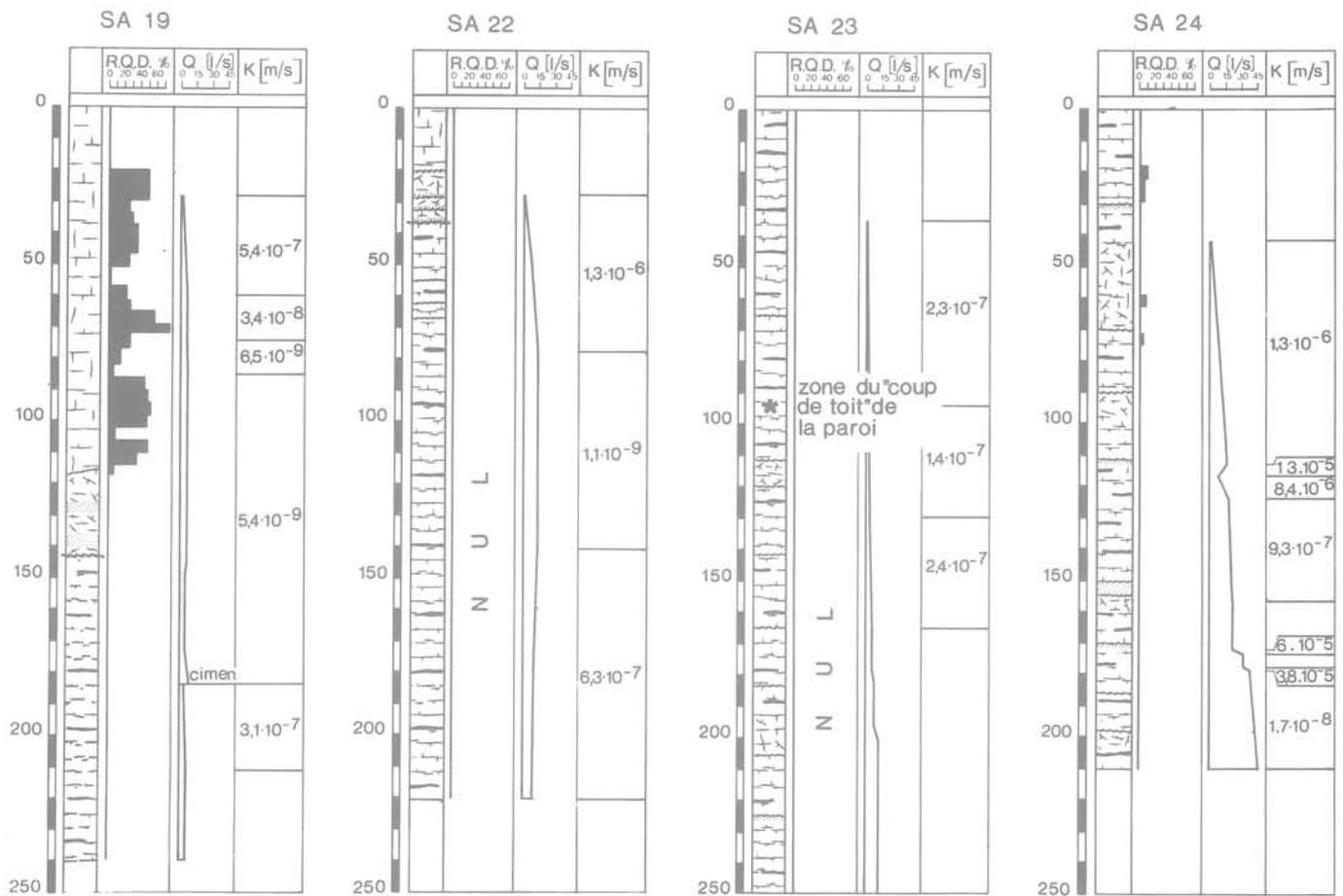
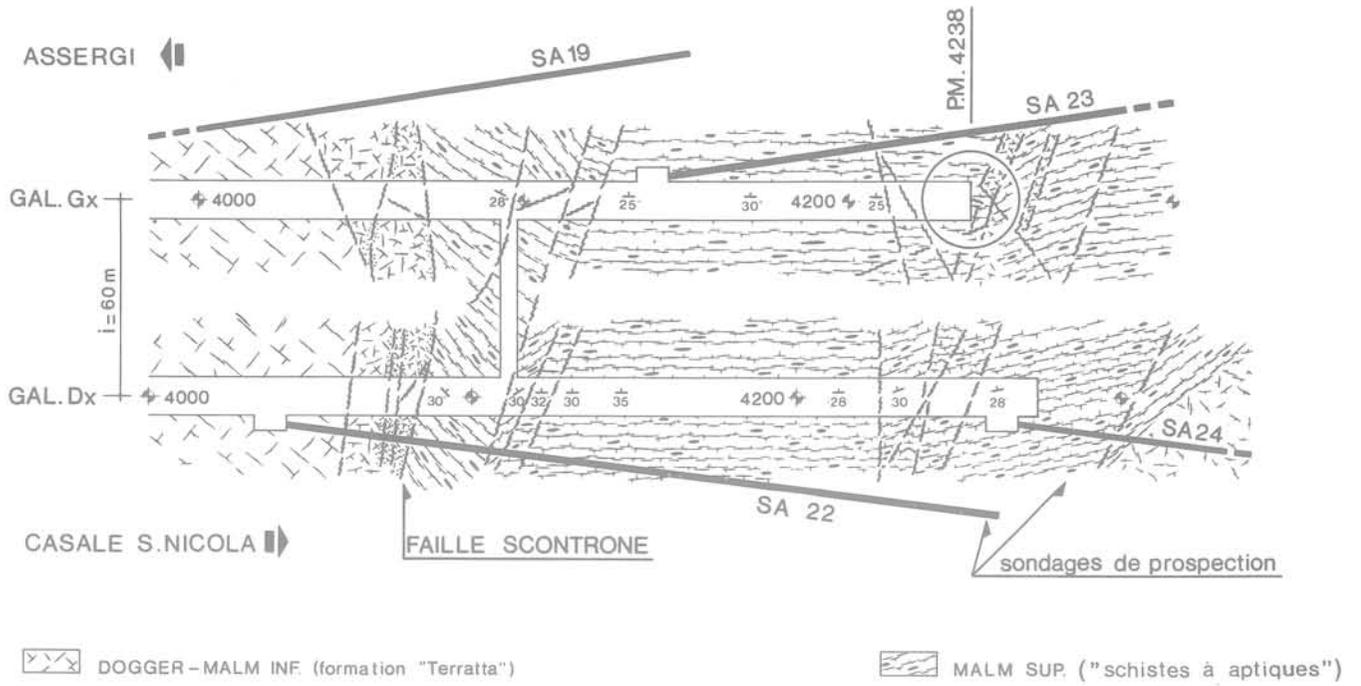
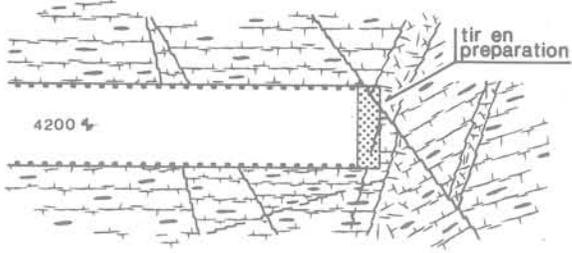
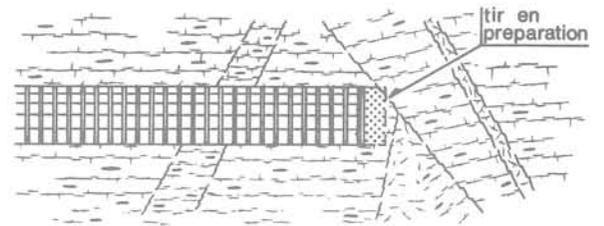


Fig. 50 Formation calcaire-dolomitique : « coup de toit » de la paroi
P.M. : 4238 M – REC. : 1200 m

SITUATION AVANT LE TIR

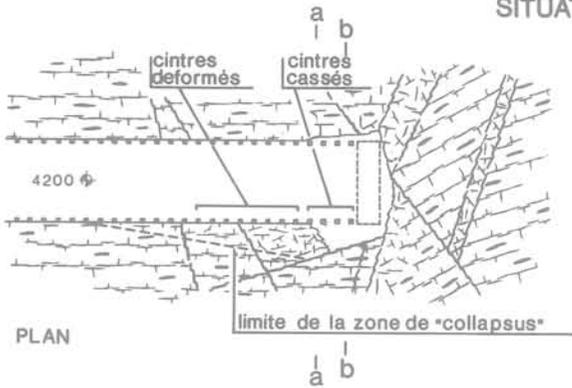


PLAN

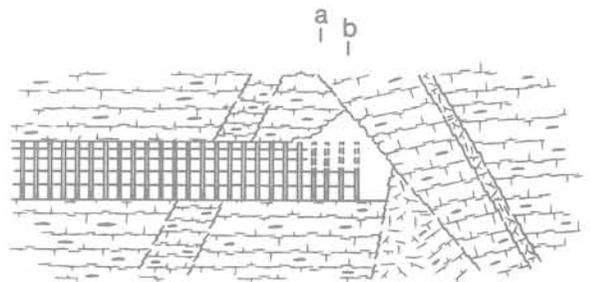


SECTION LONGITUDINALE

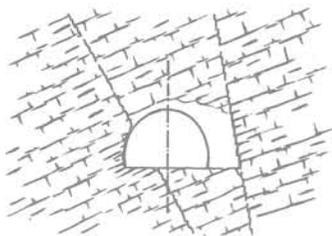
SITUATION APRES LE TIR



PLAN

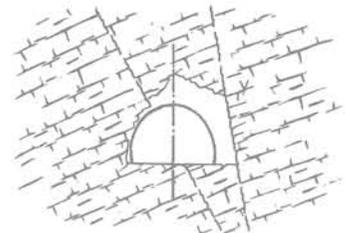


SECTION LONGITUDINALE a b



SECTION a-a

d



SECTION b-b

Fig. 51 Formation calcaire-dolomitique : « coup de toit » de la paroi
P.M. : 1200 m – REC. : 4238 m

Fig. 52



Fig. 53

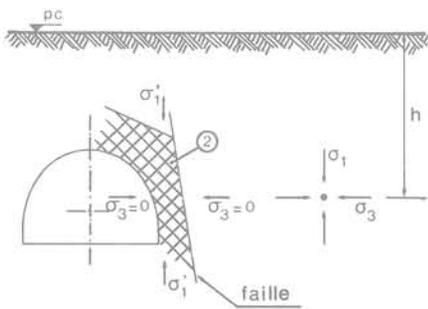




Fig. 54

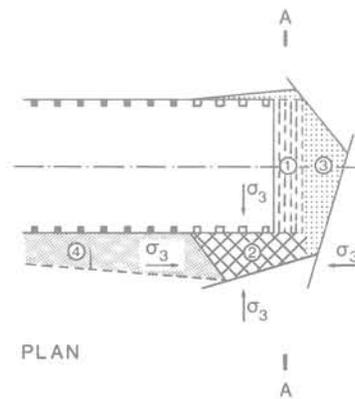


Fig. 55



SECTION A-A

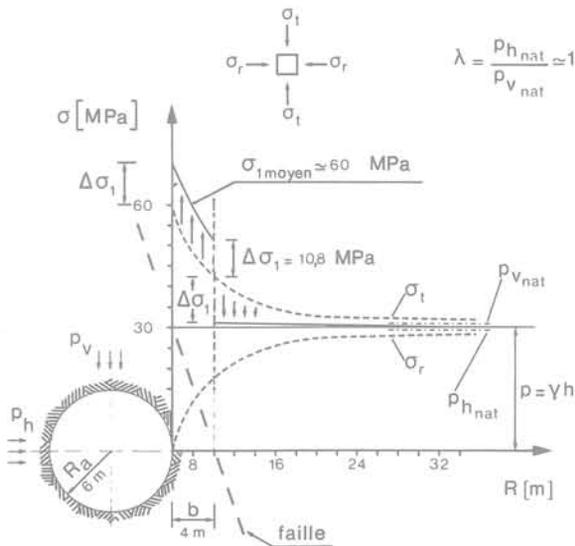
a



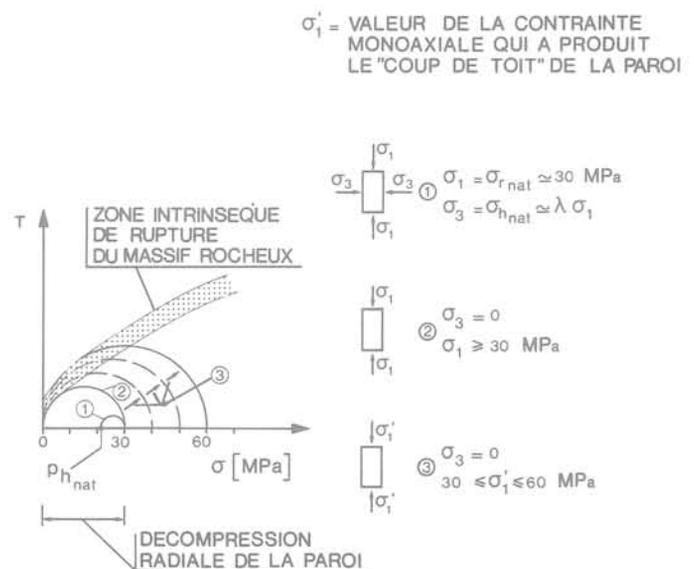
PLAN

b

- ① VOLUME ABATTU PAR LE TIR
- ② ZONE DU "COUP DE TOIT" DE LA PARI DROITE
- ③ ECHOULEMENT SUCCESSIF AVEC CREATION D'UNE CAVERNE
- ④ ZONE CASSEE DE LA PARI DROITE



c



d

Fig. 56 Formation calcaire-dolomitique : « coup de toit » de la paroi
P.M. : 4238 M – REC. : 1200 m

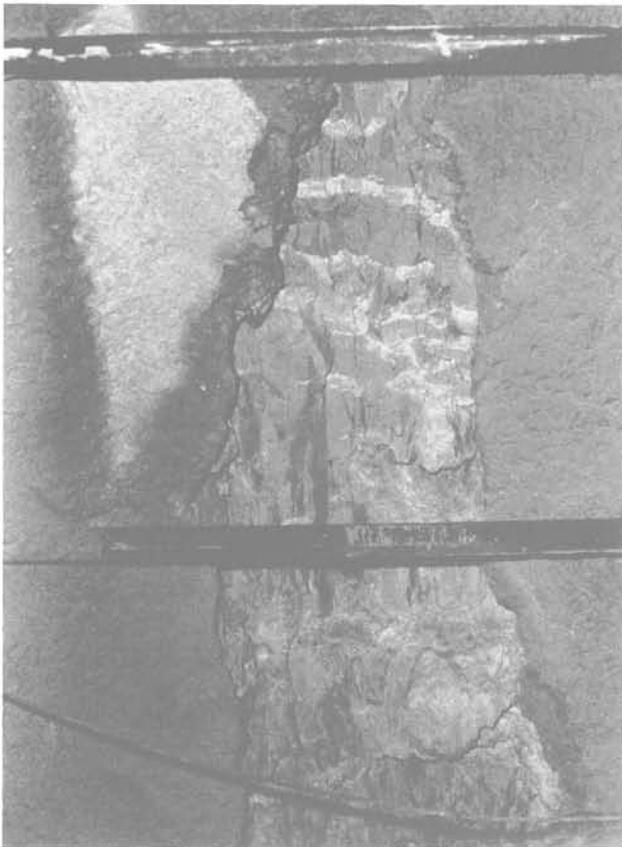


Fig. 57

radiale des contraintes vers l'intérieur du massif. Par suite d'une telle discontinuité dans la structure, une concentration de contraintes se produit sur le parement dont l'épaisseur, dans le cas présent, diminuait avec l'avancement du creusement. Il en résulte un état de contraintes qui ne pouvait pas être supporté par le parement.

En définitive, l'évolution des contraintes avant la rupture peut être résumée par la succession de phases suivante :

- a) au moment du tir la contrainte radiale, du noyau du rocher au front, passe d'une valeur naturelle possible $\sigma_3 = 30$ MPa à la valeur $\sigma_3 = 0$;
- b) l'état de contrainte sur le parement passe de triaxial à monoaxial et croît à partir d'une valeur minimale correspondant à la contrainte naturelle de $\sigma_1 = 30$ MPa;
- c) dans l'intervalle (15 minutes environ) compris entre le tir et l'explosion du parement, le σ_1 croît de 30 MPa jusqu'à une valeur maximale de 60 MPa.

Cette dernière valeur a été évaluée théoriquement d'après Kastner et correspond à la contrainte moyenne induite sur le volume de roche séparé de la faille. Il en résulte que la valeur de la contrainte $\sigma_1 = \sigma_{gd}$ pour laquelle l'explosion du parement s'est produite, peut être considérée comme comprise entre 30 et 60 MPa. une telle situation permet la représentation schématique sur le diagramme de Mohr indiquée sur la figure 56.

Les figures 57 et 58 montrent l'aspect des ruptures des parements droit et gauche qui justifient cette interprétation : à droite (fig. 57) des fractures sub-verticales de décohésion sont bien visibles alors qu'elles sont absolument absentes à gauche (fig. 58).

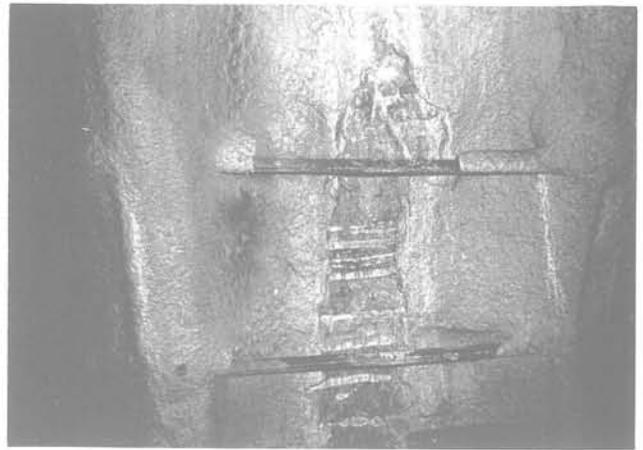


Fig. 58

Ce phénomène de rupture ne pouvait être prévu facilement, malgré quelques indices d'une certaine fatigue statique du massif. Il montre que dans certaines situations de contraintes il est important de vérifier, lors des travaux souterrains, que le jeu des discontinuités, dans l'espace, ne parvienne à isoler des volumes de roche susceptibles d'être surchargés. Un rôle déterminant est joué par les discontinuités sub-verticales et sub-parallèles à l'axe de la galerie.

A la suite de cet accident des mesures de sécurité pour la poursuite du creusement des tunnels dans les schistes à Aptiques ont été prises, une fois dépassé le p. m. 4 240 de la voie de gauche. Les mesures les plus efficaces, c'est-à-dire celles qui dans une certaine mesure ont permis des avancements sans nouvelles manifestations d'instabilité, ont été d'une part la réduction de la longueur libre des parois de la cavité (avancements sur une demi-section), et d'autre part le relevé précis et systématique fait par du personnel spécialisé, des discontinuités du massif à l'échelle de la section de la cavité.

Références bibliographiques

L. CANOBBIO - U. SCAVIA - P. LUNARDI - L. STRAGIOTTI - S. PELIZZA. Fréjus motorway tunnel : Italian side. International symposium TUNNELLING '79 - paper 21 (1979).

L. STRAGIOTTI - E. ARMANDO - G. P. BARISONE - O. DEL GRECO - N. INNAURATO - P. LUNARDI - S. PELIZZA - R. POLINO - U. VENTOSI. Essais et auscultations dans la conception et l'exécution de quatre tunnels dans les schistes lustrés de la vallée de Susa (Italie). Congrès international de Mécanique des Roches (Montreux-1979).

G. BALDOVIN - P. G. CATALANO - P. LUNARDI - E. MOTTA. A deep tunnel in highly tectonized marl. The geotechnics of structurally complex formations. International symposium AGI (1977) t. 1 p. 41-56.

P. LUNARDI. Lo scoppio di un paramento di una galleria autostradale in costruzione. Gallerie e grandi opere sotterranee - n° 9 (1979).