

LUNARDI P.
Professeur Université de Parme, Italie

BINDI R.
Rocksoil S.r.l., Milan, Italie

FOCARACCI A.
Rocksoil S.r.l., Milan, Italie

**NOUVELLES ORIENTATIONS POUR LE PROJET ET LA
CONSTRUCTION DES TUNNELS DANS DES TERRAINS
MEUBLES.**

**ETUDES ET EXPERIENCES SUR LE PRECONFINEMENT DE LA
CAVITE ET LA PRECONSOLIDATION DU NOYAU AU FRONT.**

Colloque International

TUNNELS ET MICRO-TUNNELS EN TERRAIN MEUBLE

PARIS 7/10 FEVRIER 1989

LUNARDI P.
Professeur Université de Parme, Italie

BINDI R.
Rocksoil S.r.l., Milan, Italie

FOCARACCI A.
Rocksoil S.r.l., Milan, Italie

NOUVELLES ORIENTATIONS POUR LE PROJET ET LA CONSTRUCTION DES TUNNELS
DANS DES TERRAINS MEUBLES.

ETUDES ET EXPERIENCES SUR LE PRECONFINEMENT DE LA CAVITE ET LA PRECON-
SOLIDATION DU NOYAU AU FRONT.

NEW TRENDS FOR TUNNELS DESIGN AND CONSTRUCTION IN SOFT GROUND.
STUDIES AND EXPERIENCES ABOUT THE PRECONFINEMENT OF THE CAVITY AND PRE-
CONSOLIDATION OF EXCAVATION FRONT CORE.

Les auteurs se proposent de décrire les études et les expériences acquises sur deux importants chantiers italiens sur le préconfinement de la cavité et la préconsolidation du noyau au front pour creuser des tunnels à pleine section dans des terrains meubles.

The authors propose to relate on studies and experiences acquired in two important italian working sites about the preconfinement of the cavity and the preconsolidation of excavation front core for full section tunnel excavation in soft-ground.

1. INTRODUCTION

La réalisation d'un tunnel dans des terrains meubles cohésifs ou semi-cohésifs saturés, surtout s'ils sont de nature altérable, entraîne souvent de sérieux problèmes que ce soit pour l'excavation, ou pour obtenir à long terme la stabilisation complète de l'ouvrage. La décroissance de la pression de confinement provoquée par les opérations d'avancement de type traditionnel, par rapport aux qualités géomécaniques réduites du matériel et à l'état de contrainte originaire, mène inévitablement à l'extrusion du front d'avancement et ensuite à la formation d'une vaste zone qui s'effondre dans le massif environnant l'excavation. Il s'ensuit d'importants phénomènes déformatifs de caractère irréversible sur le front du tunnel et sur son contour.

Par conséquent la seule possibilité que l'on a d'agir avec succès dans ces terrains, notamment s'ils sont saturés, est d'anticiper les phénomènes déformatifs en intervenant, sur une certaine section, avec des systèmes de stabilisation adéquats, avant l'arrivée du front.

Il faut donc agir en phase d'excavation de façon à assurer constamment au terrain environnant la pression de confinement minime nécessaire à maintenir l'état de sollicitation à l'intérieur des niveaux de sécurité.

Dans les différentes conditions géotechniques, le jet-grouting et le

prédécoupage mécanique comme préconfinement de la cavité, les clous au front et les drainages, comme préconsolidation du front, sont les instruments à disposition du projeteur qui permettent, à condition qu'ils soient bien utilisés, de creuser même à pleine section, c'est à dire dans des conditions opérationnelles idéales, dans des terrains meubles sous nappe, qui ont été affrontés jusqu'aujourd'hui avec des méthodes traditionnelles à section partielle.

Tandis que la technologie des injections traditionnelles, du jet-grouting avec les drainages à l'avancement est déjà suffisamment connue, le prédécoupage mécanique avec les drainages ou avec la préconsolidation du front de taille par des clous en résine de verre est une technique qui a été tout récemment mise au point et, qui n'a pas encore été soumise à l'attention de ceux qui s'intéressent à cette matière.

Dans ce bref exposé les auteurs se proposent de la décrire exhaustivement, en se basant sur les expériences acquises sur deux importants chantiers italiens.

2. LIGNE FERROVIAIRE SIBARI - COSENZA

2.1. Généralités

La variante de la ligne ferroviaire à simple voie Sibari - Cosenza (Fig. 1), entre les gares de "S. Marco Roggiano" et "Mongrassano - Cervicati", prévoit la réalisation de quatre tunnels pour un développement global d'environ 4000 m, dont 3000 m ont déjà été réalisés.

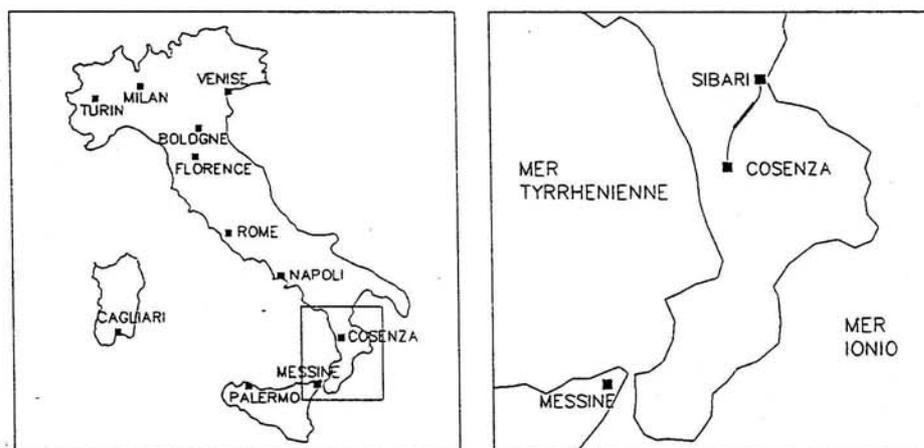


Fig. 1 : TRACE DE LA LIGNE FERROVIAIRE SIBARI-COSENZA. TUNNEL 1-2-3

2.2. Phase cognitive

Les recherches géologiques - géotechniques conduites en phase cognitive nous ont permis d'acquérir les éléments suivants (Fig. 2) :

- les terrains concernés appartiennent à la formation pliocène - calabrienne constituée d'argiles gris-bleuâtres recouvertes par des sables jaunes. La couche d'argile, dans la partie supérieure, où s'ancre principalement le tracé ferroviaire, présente des intercalations de fins niveaux sablonneux qui délimitent les plans de stratification;

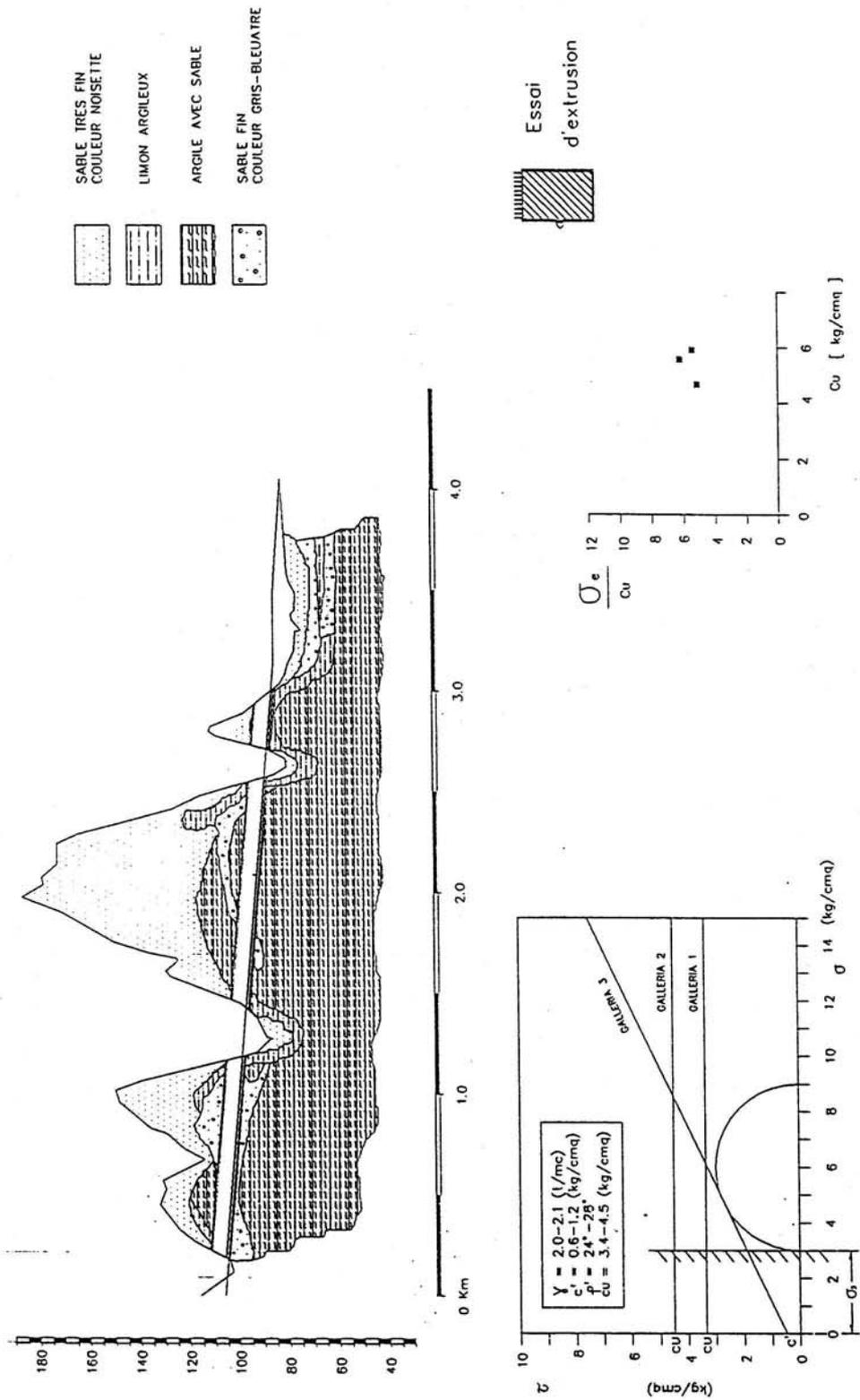


Fig. 2 : LIGNE FERROVIAIRE SIBARI-COSENZA. TUNNEL 1-2-3. PHASE COGNITIVE

COMMITTENTE: ASFALTI SINTEX S.P.A.
 ELABORAZIONE: ROCKSOIL S.R.L.
 P.za S.MARCO 1 - MILANO
 DATA: 10-02-1989

LINEE CARATTERISTICHE PER GALLERIA CIRCOLARE
 CON PRESSIONE IDROSTATICA ALLO STATO NATURALE

F.S. LINEA SIBARI-COSENZA / GALLERIA N. 2

- U_f - SPOSTAMENTO RADIALE AL FRONTE
- U - SPOSTAMENTO RADIALE LONTANO DAL FRONTE DIL. = 0.10 X
- P_f/P_0 - RAPPORTO DI PLASTICIZZAZIONE LONTANO DAL FRONTE
- P_f/P_0 - RAPPORTO DI PLASTICIZZAZIONE AL FRONTE

Avanzamento con prototipo meccanico

DATI

RAGGIO 5.1 m
 COPERTURA 110 m
 PESO DI VOLUME 2.1 t/mc
 MODULO DI POISSON 0.3
 VALORI GEOTECNICI
 ZONA PLASTICA
 $P_{II} = 25.00$ g. SEB. $C_0 = 5.00$ t/mq $E = 20000.$ t/mq
 ZONA ELASTICA
 $P_{II} = 27.00$ g. SEB. $C_0 = 10.00$ t/mq $E = 20000.$ t/mq

RISULTATI

REGISTREZZA 1/2 NUCLEO
 $P = 7.00$ t/mq
 FORZA MINIMA DI SOSTEGNO
 $P = 2.60$ t/mq $U = 110.001$ cm
 LIMITE PER CASO ELASTICO IDEALE
 $P = 117.22$ t/mq $U = 3.772$ cm

AL FRONTE

FORZA MINIMA DI SOSTEGNO
 $P = 7.5$ t/mq $U_f = 46.438$ cm
 LIMITE PER CASO ELASTICO IDEALE
 $P = 105.88$ t/mq $U_f = 2.941$ cm

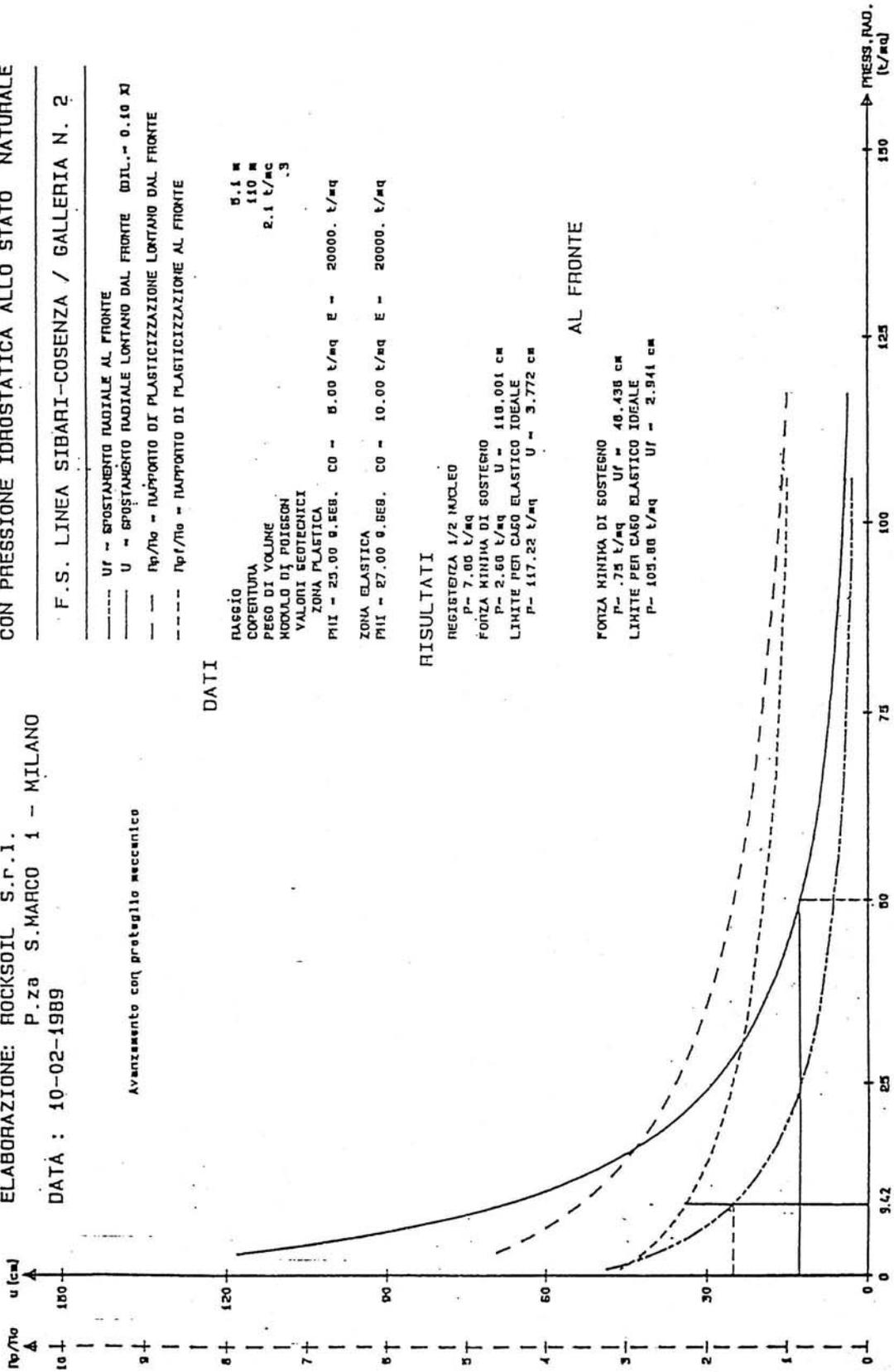


Fig. 3 : LIGNE FERROVIAIRE SIBARI-COSENZA. TUNNEL 2. LIGNES CHARACTERISTIQUES

- les sables, qui ont une bonne perméabilité, présentent une circulation hydrique qui s'anastomose dans plusieurs nappes;
- les recherches ponctuelles nous ont confirmé la variabilité géotechnique des terrains examinés. Dans les zones où les argiles présentent un ordre plus homogène, on a mesuré des valeurs de $C_u = 4 \div 5 \text{ Kg/cm}^2$; là où la matrice s'enrichit d'éléments sablo-limoneux, C_u varie entre 2 et 3 Kg/cm^2 et son contenu d'eau augmente visiblement.

2.3. Phase de diagnostic

En phase de diagnostic l'étude par la méthode des "lignes caractéristiques" nous a permis d'établir que les déformations au front auraient été incompatibles avec les caractéristiques de déformabilité du terrain, ce qui dépose en faveur d'une situation de front instable.

En effet, le déplacement radial spécifique en correspondance du front de taille, en absence de préconsolidations, aurait été de l'ordre de 22 % (voir Fig. 3), valeur, celle-ci, excessive pour le genre de terrain examiné, et par conséquent inacceptable.

2.4. Phase de thérapie

En phase de thérapie on a donc choisi des interventions de préconfinement de la cavité à doser en fonction des caractéristiques géotechniques des terrains. Plus particulièrement, on a choisi le préconfinement avec la technique du prédécoupage mécanique dans les zones où prévalait le composant argileux et, le préconfinement avec le système jet-grouting horizontal pour les sections où prévalait le composant sablonneux. De toute façon, tout système a été intégré par des drainages à l'avancement pour réduire fortement les pressions hydrostatiques à l'intérieur du noyau au front (Fig. 4).

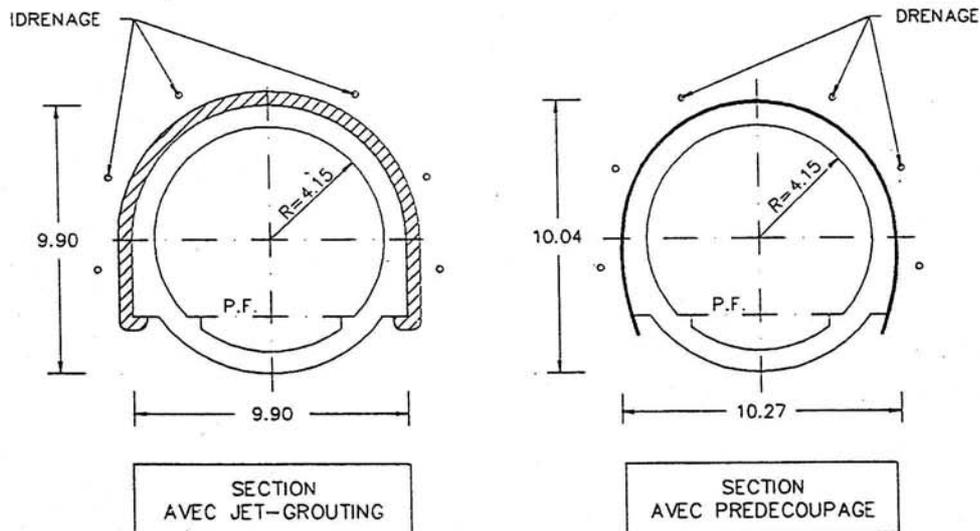


Fig. 4 : LIGNE FERROVIAIRE SIBARI-COSENZA. SECTIONS TYPE

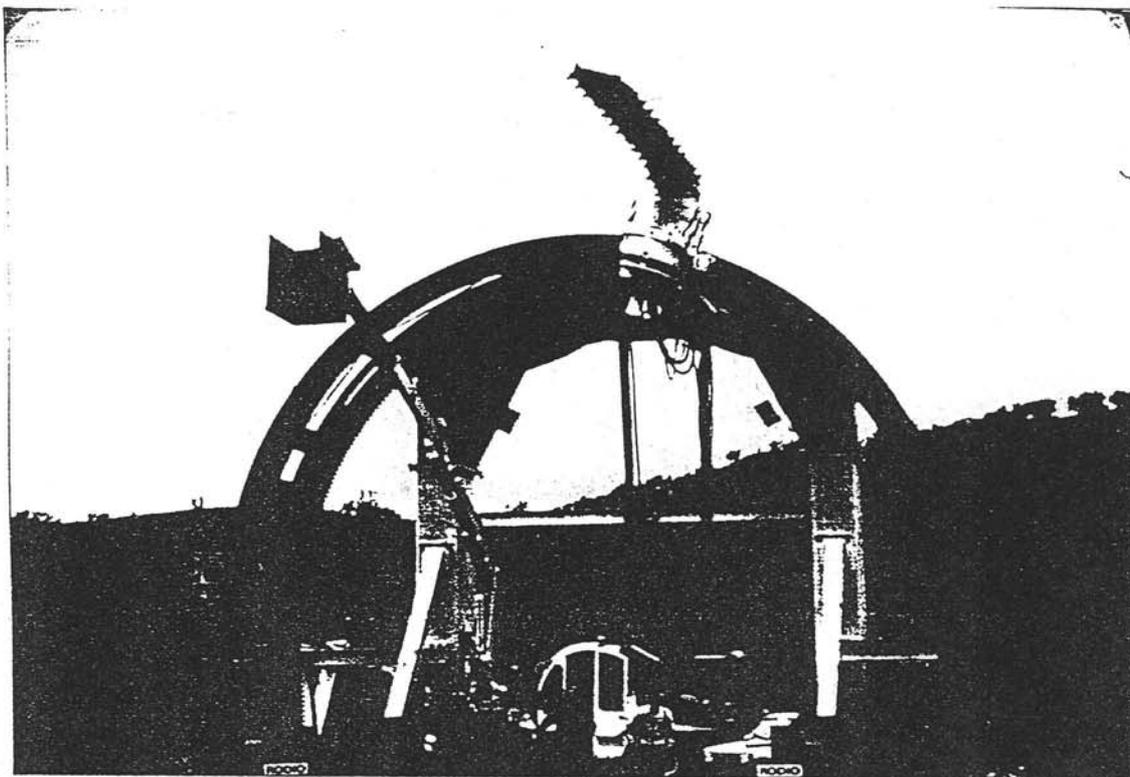
Puisque celle-ci a été la première application de la technique du prédécoupage sur le territoire national et la toute première à pleine section dans des tunnels de 10 m de diamètre, nous pensons qu'il est utile

de présenter les recherches et les vérifications sur le chantier qui nous ont permis de la mettre au point.

2.4.1. Excavation à pleine section avec prédécoupage mécanique

Le prédécoupage mécanique consiste à pratiquer sur le front de taille un découpage d'épaisseur et de longueur prédéterminées, suivant le profil d'extrados du tunnel. Le découpage est immédiatement rempli avec du béton projeté, convenablement pourvu d'un additif de façon à obtenir d'excellentes propriétés de résistance à bref terme.

La nature du système, qui se propose de prévenir les phénomènes déformatifs en les contenant efficacement avant que ceux-ci ne se manifestent, a comporté une approche conceptuellement différente aux problèmes d'avancement et de stabilisation de la cavité, par rapport aux systèmes plus communément adoptés.



En particulier il a fallu définir avec attention:

- les critères de stabilisation de la cavité qu'il faut respecter vis-à-vis de la stabilité transversale et surtout de celle du front;
- la géométrie de la tuile de prérevêtement;
- ses caractéristiques globales de résistance.

Pour la stabilité du front, qui est une condition indispensable pour la bonne réussite du procédé, il a fallu façonner le front même, en phase d'avancement, d'une forme concave et le protéger par une couche de spritz-béton de quelques centimètres. En présence d'une nappe on a réalisé des drainages à l'avancement pour réduire les pressions interstitielles et augmenter la résistance au cisaillement du terrain qui constitue le noyau au front.

Dans le cas où ces interventions ne s'étaient pas révélées suffisantes pour assurer la stabilité du front ou aurait toujours été prêts à intervenir par la préconsolidation de celui-ci avec des clous en résine de verre.

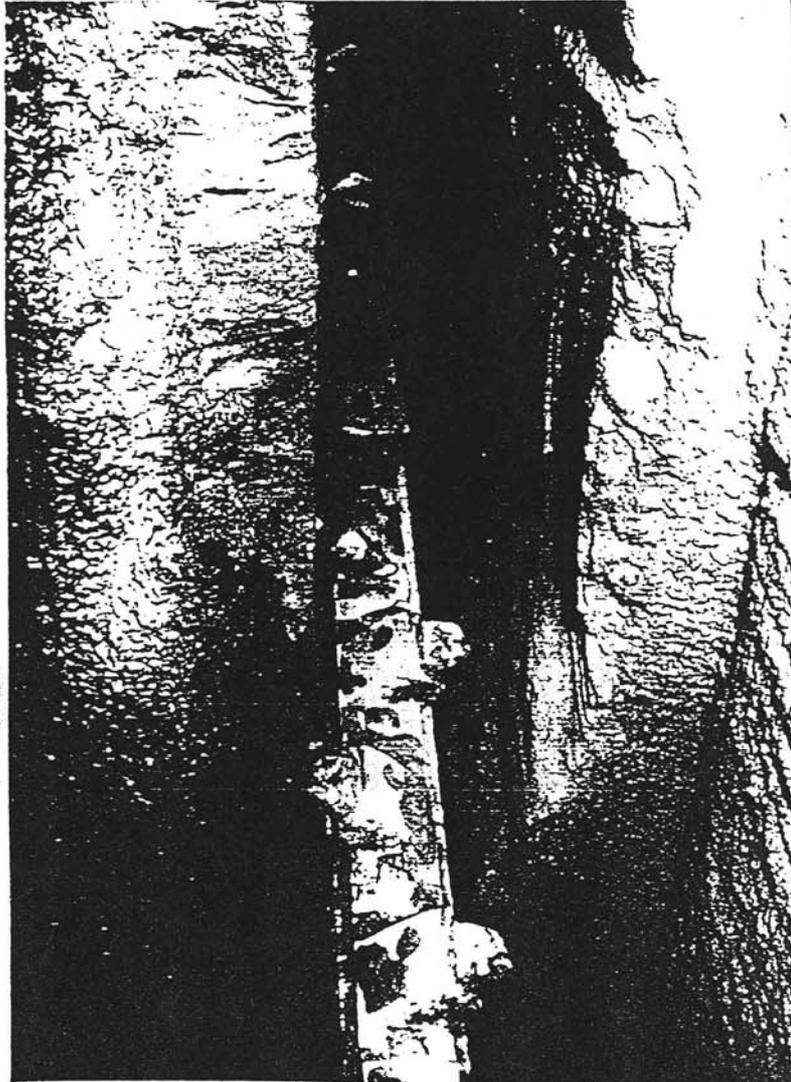


PHOTO 2 : EXECUTION DU DECOUPAGE

La stabilité transversale de la cavité est garantie, pour environ 1 ÷ 1.5 diamètres de distance du front, par les seules tuiles de spritz-béton renforcé avec des fibres. A des distances non supérieures on a effectué la coulée de la base des pie-droits et du radier, tandis que le revêtement définitif a été complété par la suite (Fig. 5). Quand l'ordre structural du terrain s'est présenté tel qu'il aurait influencé négativement l'uniformité des poussées, on a renforcé les tuiles avec des cintres, convenablement entretoisés, et du spritz-béton. L'épaisseur du découpage praticable dans le terrain (environ 20 cm maximum) détermine l'épaisseur de la tuile de prédécoupage. L'import-

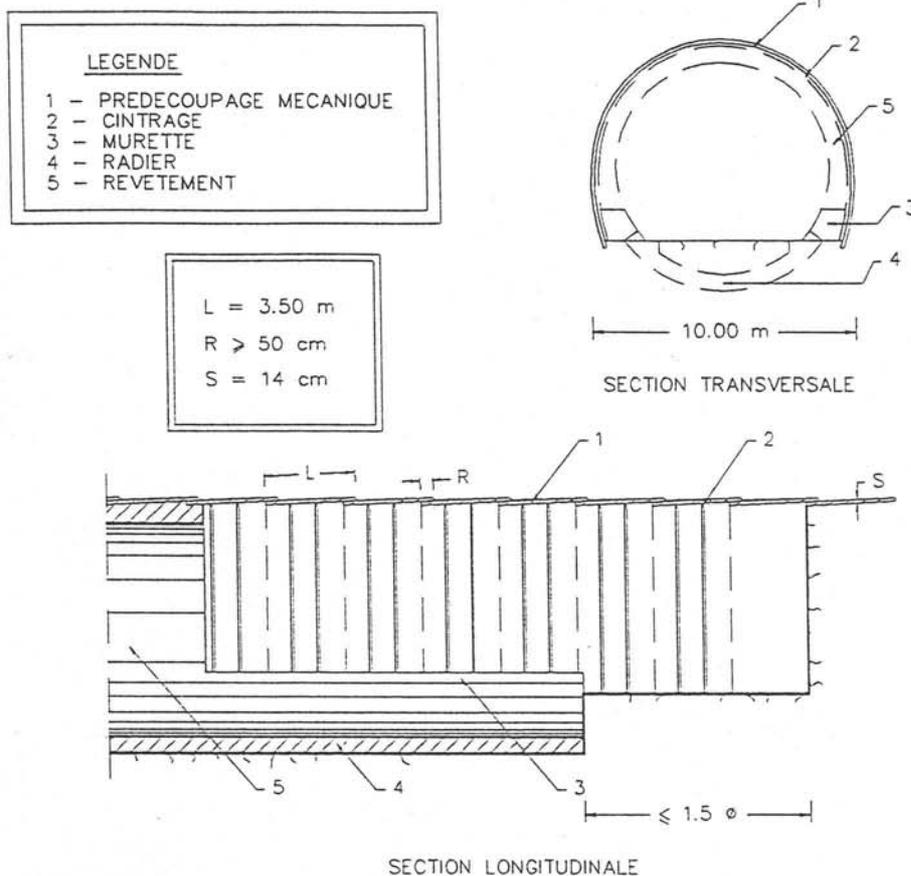


Fig. 5 : LIGNE FERROVIAIRE SIBARI-COSENZA. TUNNEL 1-2-3. PHASE DE THERAPIE

tance de donner à cette tuile une géométrie optimale est évidente à ce point, pour obtenir une bonne canalisation du flux des contraintes et éviter l'apparition d'efforts de traction à l'intérieur. Les recherches faites pour perfectionner cet aspect nous ont porté au profil B de la figure 6, qui présente dans la zone critique une forme plus arquée par rapport à celui qui a été adopté dans le tunnel 1. Les graphiques reportés à la fig. 6 montrent le développement des sollicitations tangentielles à l'extrados et à l'intrados, qui sont calculées, à égales conditions de charge, pour les deux types de profil examinés. On remarque tout de suite le meilleur comportement du profil de type B, à l'intérieur duquel les charges apparaissent plus centrées. Les caractéristiques globales de résistance du béton qui remplit le découpage, doivent être bien-sûr appropriées aux sollicitations auxquelles il sera soumis. Et particulièrement dans le cas examiné, à 6 ÷ 8 heures de séchage, le béton devra déjà fournir environ 70% de la résistance finale demandée, qui est d'environ 300 Kg/cm². Pour adapter ses caractéristiques mécaniques aux exigences du projet, on a préparé un champ d'essais pour la fabrication des mélanges, conformément aux types demandés, en variant convenablement genre et quantité de liants, fibres et additifs (Fig. 7).

front et tout autour de la cavité. La lecture et l'interprétation des contrôles nous ont permis de suivre l'évolution du comportement du tunnel pendant les différentes phases d'excavation, et de calibrer la typologie et la géométrie des interventions de stabilisation, en mettant au point les phases et les cadences d'avancement.

En particulier, on a projeté et réalisé trois stations de mesurage équipées pour l'exécution de:

- mesures de convergence de la cavité avec un ruban d'acier Invar;
- mesures extensométriques verticales de l'extérieur par la mise en oeuvre de trois extensomètres à barre ;
- mesures pressiométriques par l'introduction de cellules de pression à l'intérieur des tuiles du prédécoupage.

Les stations ont été placées respectivement:

- station A, à la progr. 183.10 depuis l'entrée du tunnel n°2 (recouvrement 26 m) ;
- station B, à la progr. 367.87 depuis l'entrée du tunnel n°1 (recouvrement 24 m) ;
- station C, à la progr. 347.32 depuis la sortie du tunnel n°1 (recouvrement 20 m).

En mettant à l'oeuvre les extensomètres avant l'arrivée du front de taille, on a pu suivre l'évolution des phénomènes déformatifs au fur et à mesure que l'on avançait et, évaluer la quantité de déformation déjà subie par le tunnel au front.

L'examen des lectures extensométriques et de convergence nous a permis d'obtenir d'importantes informations sur le comportement de la cavité (voir Fig. 8).

Les stations A et B (toutes deux correspondantes à une section de tunnel creusée par prédécoupage) montrent une évolution des phénomènes déformatifs fondamentalement semblable.

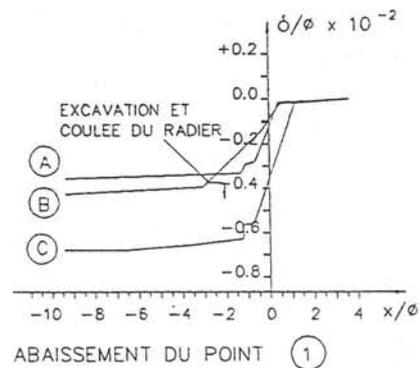
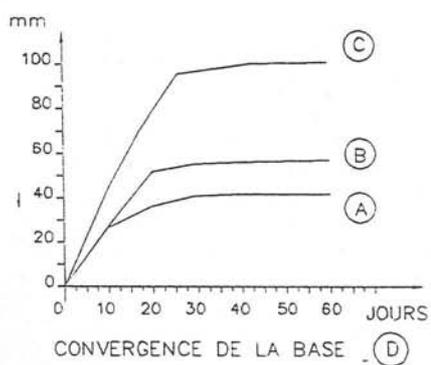
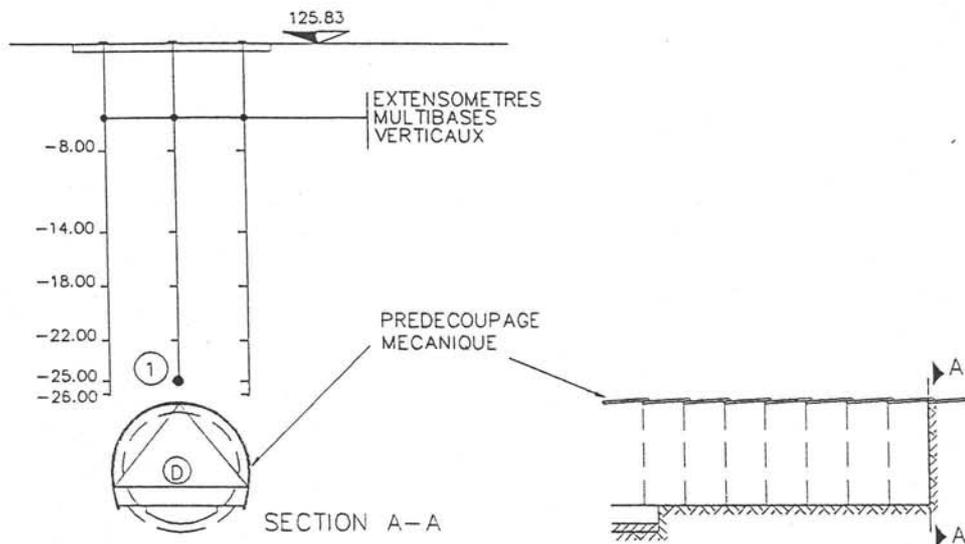
En particulier on observe que:

- a) avant le passage du front, en correspondance de la section équipée il n'y a pas de déplacements appréciables;
- b) les premiers mouvements s'amorcent durant le passage du front. Les phénomènes déformatifs se développent sur environ 50% de la valeur finale au cours de 3 ÷ 4 jours, c'est à dire quand le front dépasse d'environ 8 ÷ 10 m la station équipée;
- c) la valeur maximale rejointe par les déplacements, mesurés à 2 m au-dessus de la calotte du tunnel, est d'environ 30 mm pour la station A et d'environ 40 mm pour la station B;
- d) le gradient de déformation est au maximum pendant l'excavation du radier, la coulée de celui-ci produit une stabilisation immédiate de la cavité. Par conséquent la coulée du revêtement définitif ne produit pas de modifications visibles sur l'état déformatif.

Les mesures de convergence mettent en évidence l'effet dû à l'arrêt prolongé du front par rapport aux phénomènes déformatifs: en correspondance de la station B, en particulier, on a mesuré des déformations diamétrales de l'ordre de 120 mm au lieu de 40 ÷ 60 couramment mesurés. Il est intéressant de comparer les mesures effectuées en correspondance des stations A et B avec celles de la station C (mise en correspondance d'une section de tunnel creusée par jet-grouting sub-horizontale).

Cette station, située dans une zone qui possède des recouvrements supérieures à celles des cas A et B, présente, du moins au début un'évolution des phénomènes déformatifs décidément plus marquée:

- a) pendant la phase de jet-grouting une remontée millimétrique de la jauge posée à environ 2 m au-dessus de la calotte du tunnel et qui est fort probablement reconductible à l'effet de l'injection à haute pression;
- b) au moment du creusement du tunnel, une augmentation rapide des phé-



STATION DE MESURAGE	(A)	(B)	(C)
TUNNEL	2	1	1
POINT METRIQUE	183.10 i	367.87 i	347.32 s
RECOUVREMENT	26	24	20
PRECONSOLIDATION	PREDECOUPAGE	JET-GROUT. O.	

Fig. 8 : LIGNE FERROVAIRE SIBARI-COSENZA. MESURES DE CONVERGENCE ET DE DECOMPRESSION. PHASE DE VERIFICATION

nomènes déformatifs, à peu près double par rapport à l'augmentation mesurée dans les stations A et B.

En général toutes les mesures de convergence effectuées en correspondance des sections creusées par jet-grouting sub-horizontale ont permis d'enregistrer des valeurs de déformation bien supérieures à celles qui ont été mesurées dans les sections creusées par prédécoupage.

2.6. Phase de vérification (numérique)

Après avoir mis au point le système d'après les résultats des calculs simplifiés et des confrontations sur le chantier, on a cru qu'il était utile d'effectuer une analyse aux éléments finis non linéaires pour prévoir, de façon correcte, le comportement que la cavité aurait eu en présence de recouvrements majeurs.

La disponibilité des nombreuses données fournies par les mesures de pression et de déformation effectuées sur les lieux, en correspondance de la progr. 183.10 du tunnel n° 2 (recouvrement ≈ 30 m), nous a suggéré l'opportunité d'effectuer deux calculs distincts: le premier (analyse 1), pour un recouvrement de 30 m, afin d'estimer la validité de la schématisation adoptée, le deuxième (analyse 2) pour la situation de recouvrement maximale (≈ 115 m).

Les résultats sont amplement documentés par les figures soit en termes de déformation qu'en termes de sollicitation, et nous pouvons affirmer qu'ils sont conformes à ceux des mesures qui ont été effectuées successivement (Figg. 9 et 10)

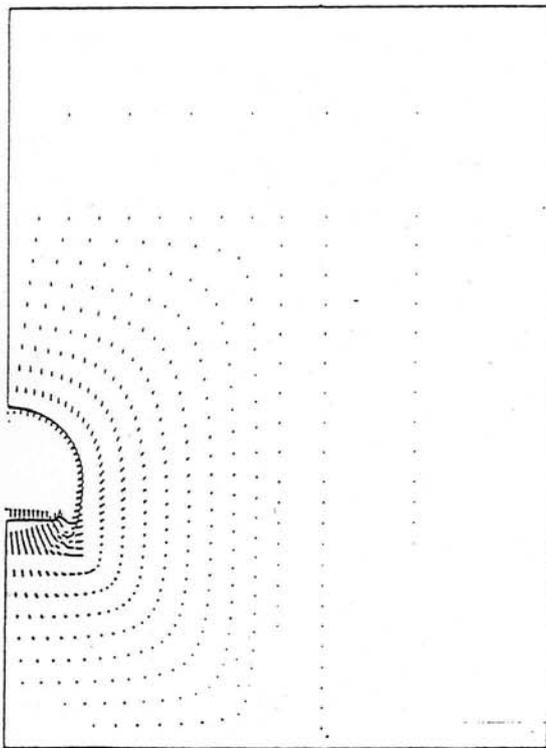


Fig. 9

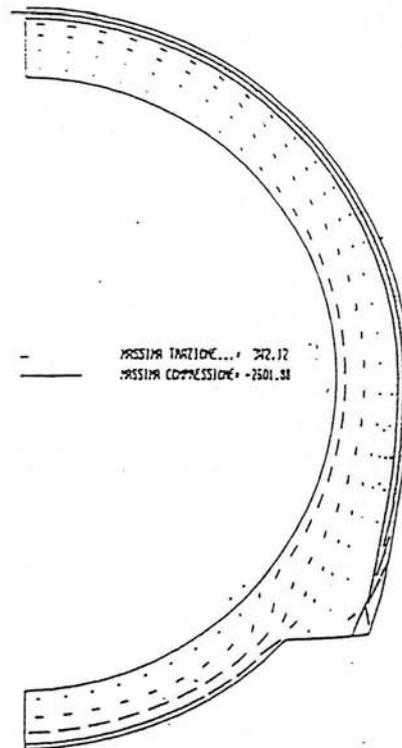


Fig. 10

En ce qui concerne l'état de contrainte dans le terrain, il est intéressant de remarquer comment la réalisation des tuiles en béton projeté avant l'excavation contribue de façon sensible à créer un "effet arc" tout autour de la zone à creuser: le terrain qui entoure la cavité n'apparaît effectivement pas fort dérangé par l'excavation pratiquée. On remarque seulement quelques plasticités locales en correspondance de la base d'appui de la tuile de béton projeté, sur la surface inférieure de l'excavation.

Quant à l'état déformatif, on remarque clairement la tendance au reflux du terrain dans la partie inférieure de l'excavation. D'où l'importance d'assurer une fondation appropriée aux tuiles de pré-découpage, pour éviter des poinçonnements du terrain qui limiteraient fortement l'efficacité du système.

L'examen du comportement de l'ouvrage met en évidence que les tuiles de béton projeté résultent graduellement chargées au fur et à mesure que le front s'éloigne de la section de calcul. A l'attaque avec le radier on a des contraintes de traction qui pourraient provoquer l'ouverture de petites fissurations.

Le revêtement définitif résulte sollicité par des efforts maximum, qui ne dépassent jamais les valeurs admissibles.

3. NOUVELLE LIGNE FERROVIAIRE "DIRETTISSIMA" ROME - FLORENCE SECTION

AREZZO SUD - FIGLINE VALDARNO

TUNNELS V° LOT TERRITORIAL ET IV° LOT INTERCONNEXION

3.1. Généralités

La région intéressée par les ouvrages examinés fait partie du bassin du "Valdarno Supérieur". Situé sur le versant tyrrhénien des Appenins Septentrionaux, ce bassin représente le colmatage par des sédiments lacustres et fluviolacustres de la dépression morphologique et structurale délimitée par les deux chaînes des Monts du "Chianti" Méridional et du "Pratomagno" (Fig. 11).

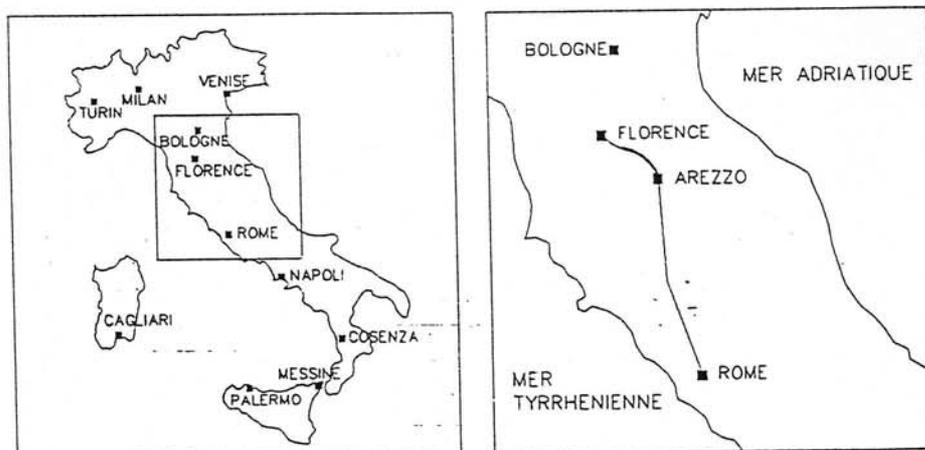


Fig. 11 : TRACE DE LA LIGNE FERROVIAIRE "DIRETTISSIMA" ROME-FLORENCE. SECTION AREZZO SUD-FIGLINE VALDARNO

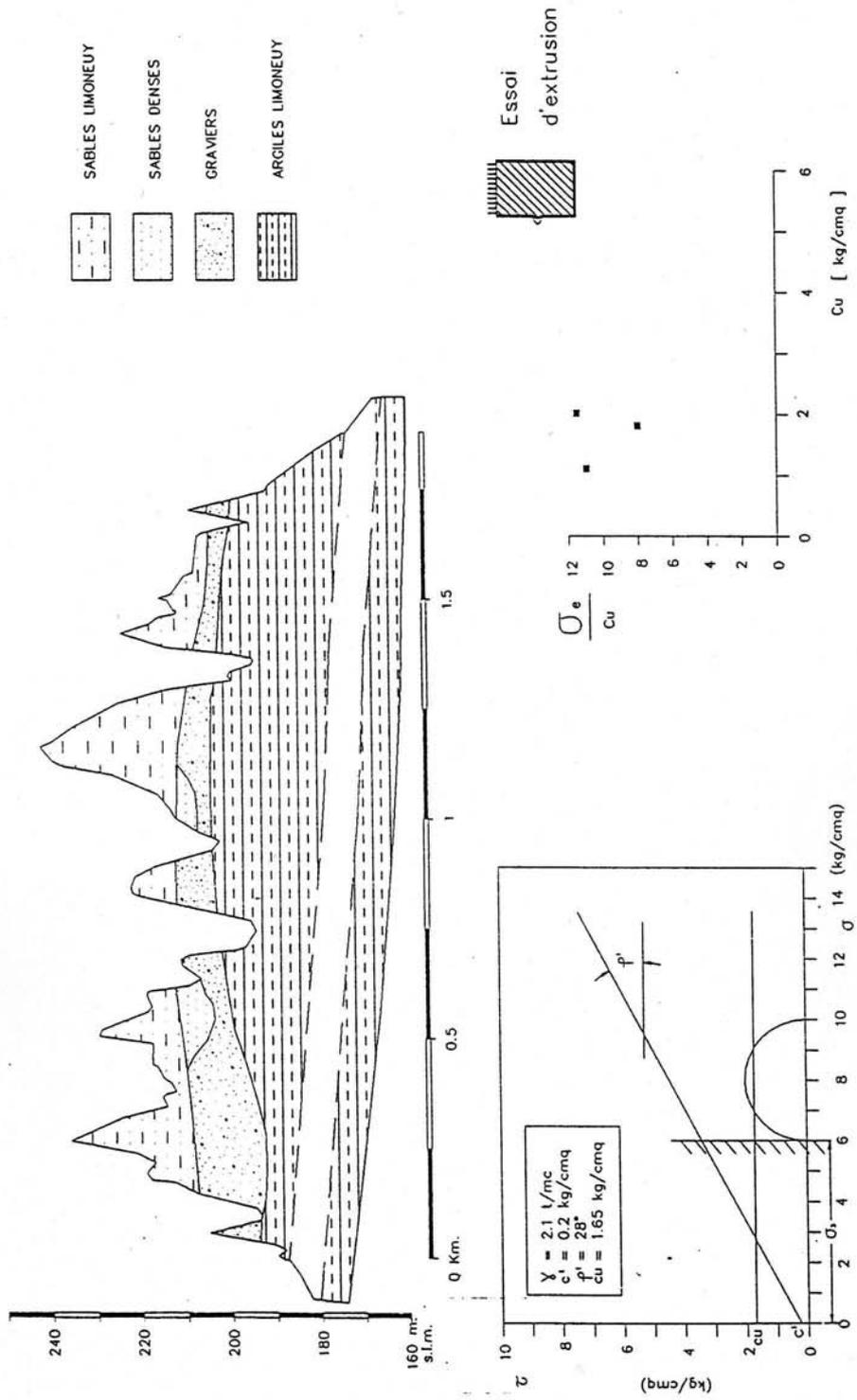


Fig. 12 : LIGNE FERROVIAIRE "DIRETTISSIMA" ROME-FLORENCE. TUNNEL TALLETO. PHASE COGNITIVE

Cette dynamique de formation a fait en sorte que la région soit caractérisée par des sables-limoneux et des limons-sablonneux, intercalés par des niveaux argileux-limoneux qui contiennent des lentilles des niveaux sablonneux saturés d'eau.

3.2. Phase cognitive

En phase cognitive on a effectué des recherches superficielles et des recherches profondes.

Au laboratoire on a relevé les paramètres de résistance au cisaillement du terrain et d'extrusion des matériaux argileux qui sont reportés dans le figure 12.

3.3. Phase de diagnostic

En phase de diagnostic l'étude avec les lignes caractéristiques (Fig. 13) a mis en évidence des déformations inacceptables pour les propriétés de résistance et de déformabilité du terrain au front, en faisant prévoir un comportement instable même avec des faibles recouvrements.

3.4. Phase de thérapie

En phase de thérapie il nous a donc semblé nécessaire d'effectuer l'avancement à pleine section sous la protection de systèmes de préconsolidation et de préconfinement de la cavité, lancés à l'avancement par rapport au front de taille, avec une organisation semblable à celle du cas précédent (ligne ferroviaire des chemins de fer de l'Etat Sibari - Cosenza). De plus, en devant contenir des déformations plus élevées par rapport au cas précédent, on a choisi d'intégrer l'intervention de préconsolidation tout autour de la cavité par l'exécution d'une préconsolidation du noyau du front de taille.

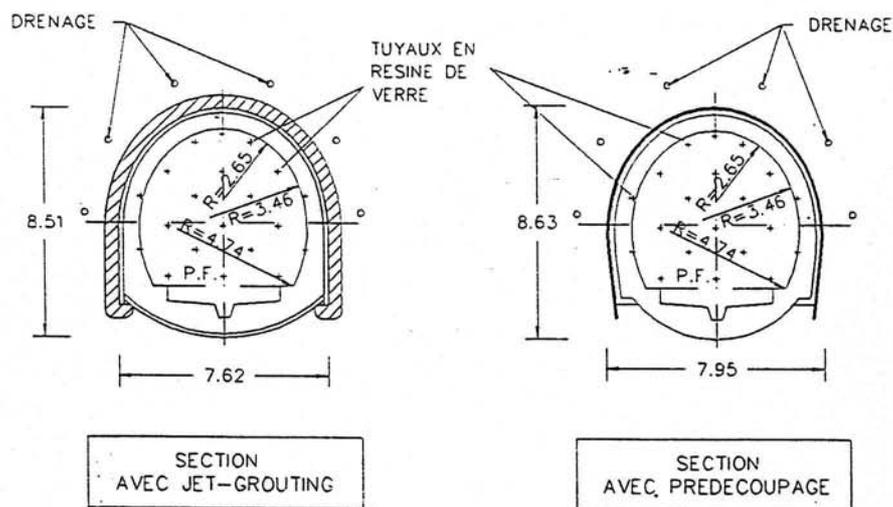


Fig. 14 LIGNE FERROVIAIRE "DIRETTISSIMA" ROME-FLORENCE.
SECTION AREZZO SUD-FIGLINE VALDARNO. SECTIONS TYPE

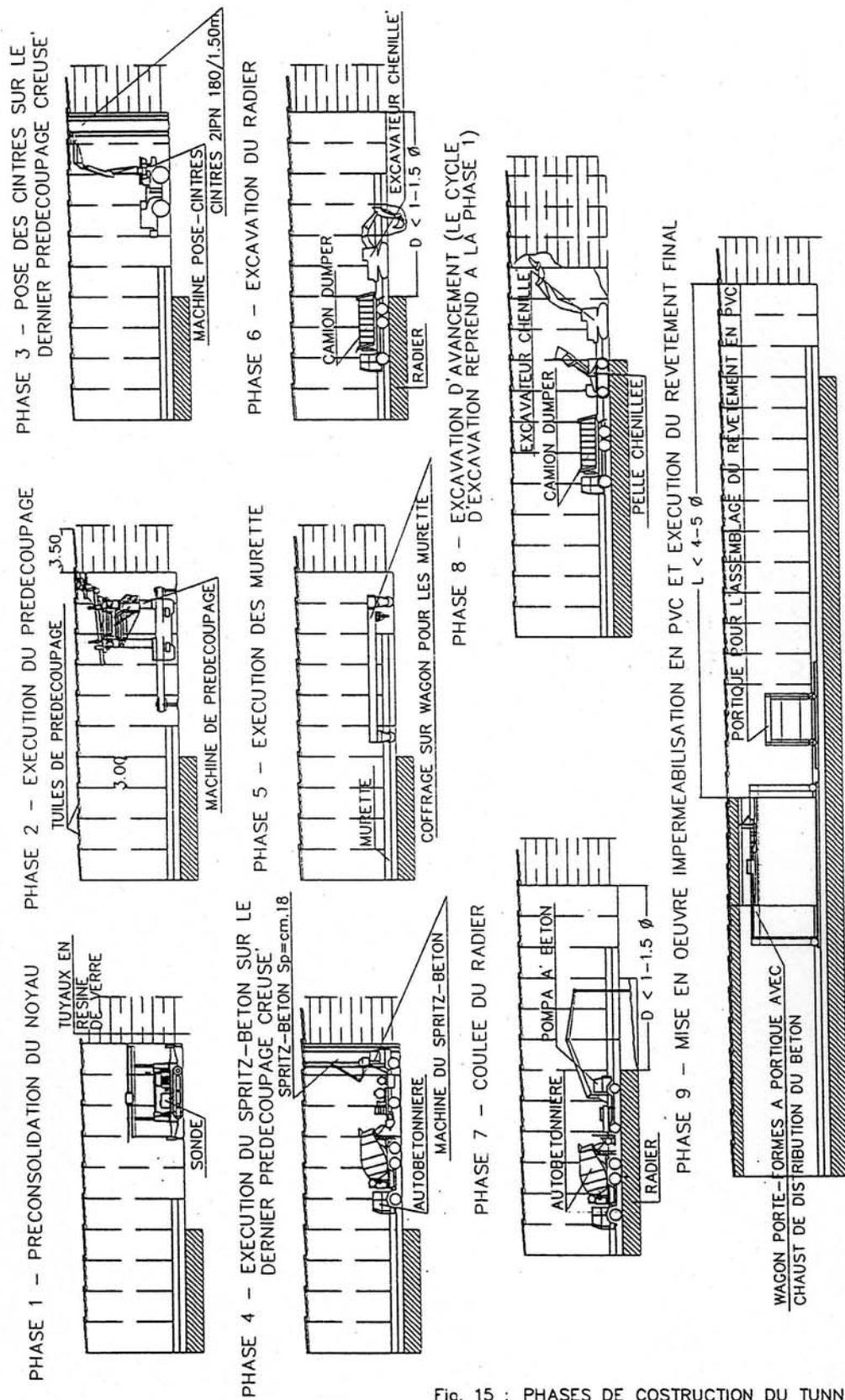


Fig. 15 : PHASES DE CONSTRUCTION DU TUNNEL

En fait les interventions ont consisté en:

- drainages à l'avancement;
- prédécoupage mécanique tout autour de l'excavation et des tuyaux en résine de verre injectés sur le centre du terrain au front (dans le cas de matériaux pourvus de cohésion);
- jet-grouting tout autour de l'excavation et des tuyaux en résine de verre injectés sur le centre du terrain au front (dans le cas de matériaux incohérents).

Les phases de construction sont représenté à la fig. 15.

Pour dimensionner l'intervention il fallu nécessairement évaluer l'effet produit sur le terrain par les tuyaux en résine de verre, en termes d'augmentation de la résistance. On a par conséquent préparé des monogrammes du genre de celui qui est reproduit à la fig. 16, où la résistance du centre du terrain au front, est une fonction des caractéristiques mécaniques intrinsèques du terrain (cohésion et angle de frottement) et de la densité de la préconsolidation (nombre de tuyaux/m²).

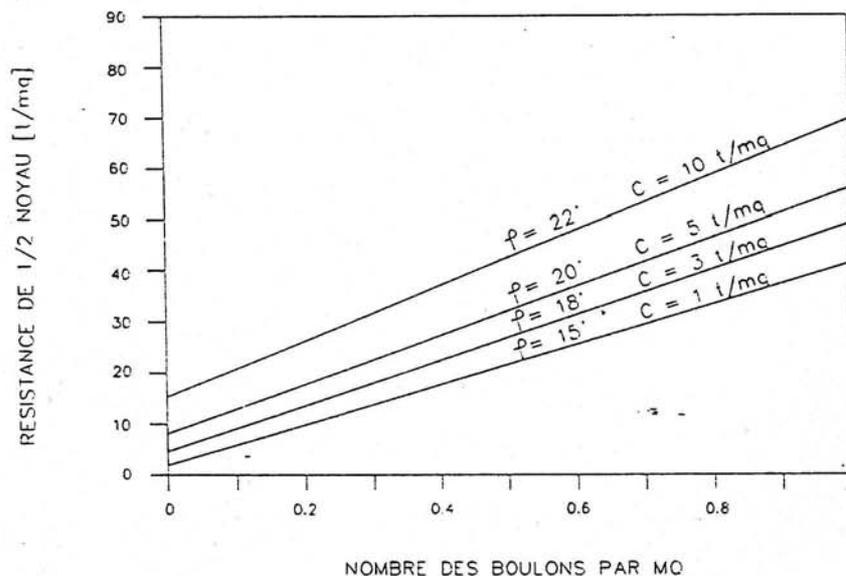


Fig.16: EFFET DE PRECONSOLIDATION DU NOYAU AVEC DES CLOUS TUBULAIRES EN RESINE DE VERRE

3.5. Phase de vérification

En phase de vérification au cours de l'ouvrage, on a observé que les premiers phénomènes d'instabilité du front de taille se produisaient à des valeurs de recouvrement plus réduites que celles qui avaient été prévues.

Ce fait peut-être reconduit à la présence d'eau.

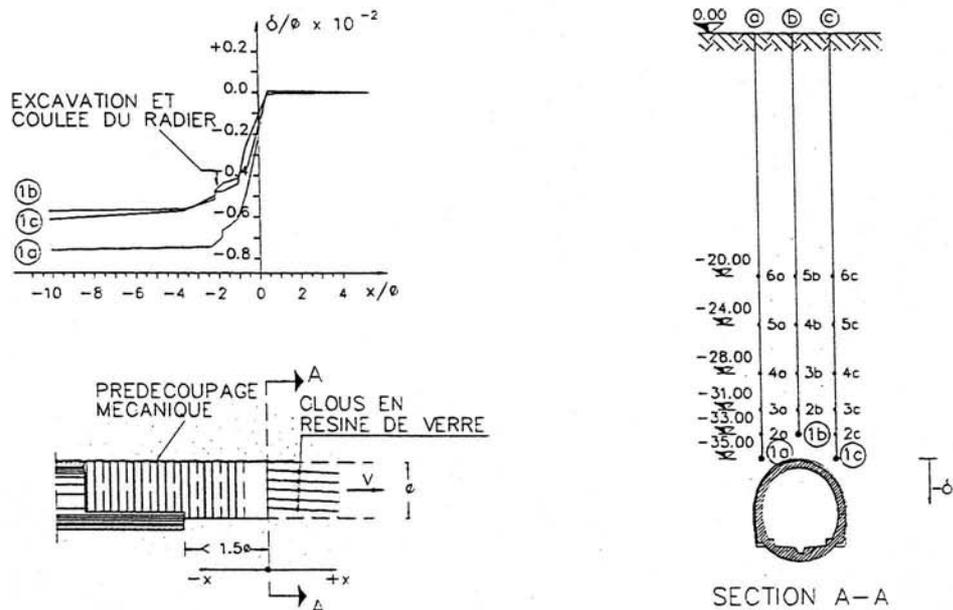


Fig. 17 : LIGNE FERROVAIRE "DIRETTISSIMA" ROME-FLORENCE.
SECTION AREZZO SUD-FIGLINE VALDARNO. INTERCONNEXION MONTEVARCHI
TUNNELS TALLETO ET CAPRENNE

En effet, on a observé expérimentalement que l'augmentation du contenu naturel d'eau, à l'intérieur d'un matériel argileux, produit une réduction de $N_s = \tau/C_u$.

Il a donc fallu renforcer le centre de terrain au front, et déjà pour des recouvrements inférieures à 30 m, là où se présentaient des intercalations sablonneuses saturées.

Durant l'interprétation des résultats des essais d'extrusion, il faut donc évaluer de quelle façon une augmentation, même minime, du contenu d'eau dans le terrain peut faire varier le coefficient de stabilité à l'extrusion.

L'ensemble des mesures effectuées nous a déjà fourni quelques résultats intéressants (Fig. 17): l'amorce des phénomènes en amont du front de taille, suite à la réalisation des interventions de préconsolidation, est limitée à une part du massif égale à environ $\phi/2$, et la stabilisation complète de la cavité se produit à une distance du front égale à 2ϕ (à moins qu'il n'y ait des phénomènes de fluage toujours présents dans ce genre de matériel).

La préconsolidation du noyau du terrain au front a été étudiée aussi par des méthodes numériques avec ordinateur.

L'analyse scrupuleuse des résultats obtenus nous suggère l'opportunité de clouer le noyau d'après des directions qui soient le plus possible traversées par les plans de cisaillement, de manière à exploiter au maximum les caractéristiques de résistance au cisaillement des tuyaux en résine de verre, compatiblement avec les exigences opératives.

4. CONCLUSIONS

Jusqu'à présent on a creusé à peu près 4000 mètres de tunnel, dans les temps prévus et avec une sécurité opérationnelle absolue, malgré la nature des terrains qui sont notoirement difficiles. Cela a été possible grâce à l'efficacité du prédécoupage mécanique comme système de préconfinement de la cavité, à la préconsolidation du front, et à la correcte ébauche du projet, ainsi qu'à la bonne organisation des travaux en souterrain visant à optimiser les opérations au front.

Par rapport aux productions enregistrées pendant la phase d'avancement, on peut souligner la remarquable constance dans le temps des avancements journaliers avec des valeurs moyennes de l'ordre de $2.90 \div 3.10$ mètres/jour.

Les bonnes productions enregistrées par rapport aux caractéristiques mécaniques du terrain, et la remarquable régularité démontrent qu'en opérant de cette façon, on arrive à industrialiser les travaux d'excavation même dans les terrains meubles, ce qui ne s'était jamais produit auparavant.

Le système semble susceptible de développements intéressants également en ce qui concerne son applicabilité aux tunnels de grande ouverture. On est en train d'étudier, à ce propos, son application à un tunnel de station du métro de Rome, d'une ouverture d'environ 18 m.

Le système des tuyaux en résine de verre comme préconsolidation du terrain au front de taille s'est enfin révélé assez efficace soit du point de vue opératif que de celui de l'augmentation de la sécurité à l'avancement.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient :

le 2^{ème} et 5^{ème} Unità Speciale de le Chemin de Fer Italiennes, l'Associazione FE.S.P.I. de Rome, l'Enterprise Asfalti Sintex de Bologne, l'Enterprise Rodio de Milan.

BIBLIOGRAPHIE

Lunardi P. 1979

"Application de la mécanique des roches aux tunnels autoroutiers, exemple des tunnel du Fréjus (coté Italie) et du Gran Sasso" Revue Française de Geotechnique n° 12.

Lunardi P., Louis C. 1984

"Méthodes de présoutènement et pré-étanchement pour les travaux en souterrain".

Proceedings of an International Symposium AFTES - Lyon/1984.11.27-29