

P. LUNARDI
Université de Parme, Italie

EVOLUTION DES TECHNOLOGIES D'EXCAVATION EN SOUTERRAIN, DANS DES TERRAINS MEUBLES

RESUME

Lorsque l'ingénieur spécialiste des ouvrages en souterrain affronte un tunnel dans des situations avec problèmes de déformations et de contraintes difficiles, son attention devra se concentrer tout particulièrement sur le problème de la stabilité du front de taille. Car c'est de la tenue du noyau d'avancement que dépend la réponse en déformation du terrain sur le contour de la cavité et donc la stabilité à court terme et à long terme du tunnel. Les systèmes de conservation dans l'avancement que nous avons récemment conçus et mis au point apportent pour la toute première fois une solution aux problèmes liés à la stabilité du front de taille. Cet exposé présente les études et les résultats concernant l'application de ces méthodologies au cours des dix dernières années en Italie.

1. Avant-propos

La construction d'un ouvrage en surface exige l'assemblage de matériaux (acier, béton armé, etc.) dont nous connaissons les caractéristiques de résistance et de déformabilité, qui sont mis en chantier en progression, selon des modalités bien déterminées, avec des tensions croissantes jusqu'à atteindre la configuration finale souhaitée. La construction d'un ouvrage en souterrain exige en revanche l'enlèvement du matériau d'un site dont les caractéristiques mécaniques ne sont pas faciles à déterminer, déjà soumis à des états de tension. Par voie de conséquence, ces états de tension se modifient.

Ce site, autrement dit le "milieu" dans lequel nous opérons, est soumis à l'action de l'excavation. Il réagit donc en se déformant.

Dès lors, le projet et la réalisation d'un ouvrage en souterrain ne peuvent pas se passer de la connaissance:

- du milieu à l'intérieur duquel nous opérons
- de l'action que nous accomplissons pour pratiquer l'excavation
- de la réaction attendue à la suite de l'excavation.

CONSISTANCE <u>NATURELLE</u>	 * SABLE			 * ARGILLE	 * ROCHE
CONSISTANCE <u>ACQUISE</u> PAR L'EFFET DES CHAMPS DE TENSION CROISSANTS	CONTRAINTES				
	EN CHAMP ÉLASTIQUE				
	EN CHAMP ELASTOPLASTIQUE				
	EN CHAMP DE RUPTURE				
* Les termes sable, l'argile et roche ne constituent que des références pour simplifier et mieux définir la consistance naturelle et acquise					

Fig. 1

Le milieu - qui est dans la pratique, le matériau de construction du projeteur des tunnels - est un matériau assez inhabituel si nous le comparons aux milieux traditionnels du génie civil. Il est discontinu, non homogène, anisotrope. En surface, il présente des caractéristiques assez variées, mais qui dépendent exclusivement de sa nature intrinsèque (consistance naturelle). En profondeur, ces caractéristiques se modifient également en fonction de l'importance des tensions qui qui modifie l'état de contrainte s'exercent sur lui (consistance acquise) (fig. 1).

L'action s'exprime par l'avancement du front à l'intérieur du milieu. Il s'agit donc d'un phénomène strictement dynamique. Nous pouvons imaginer l'avancement d'un tunnel comme un disque (le front) qui procède à une certaine vitesse (V) à l'intérieur du massif, laissant derrière lui le vide. Il produit une perturbation dans le milieu -

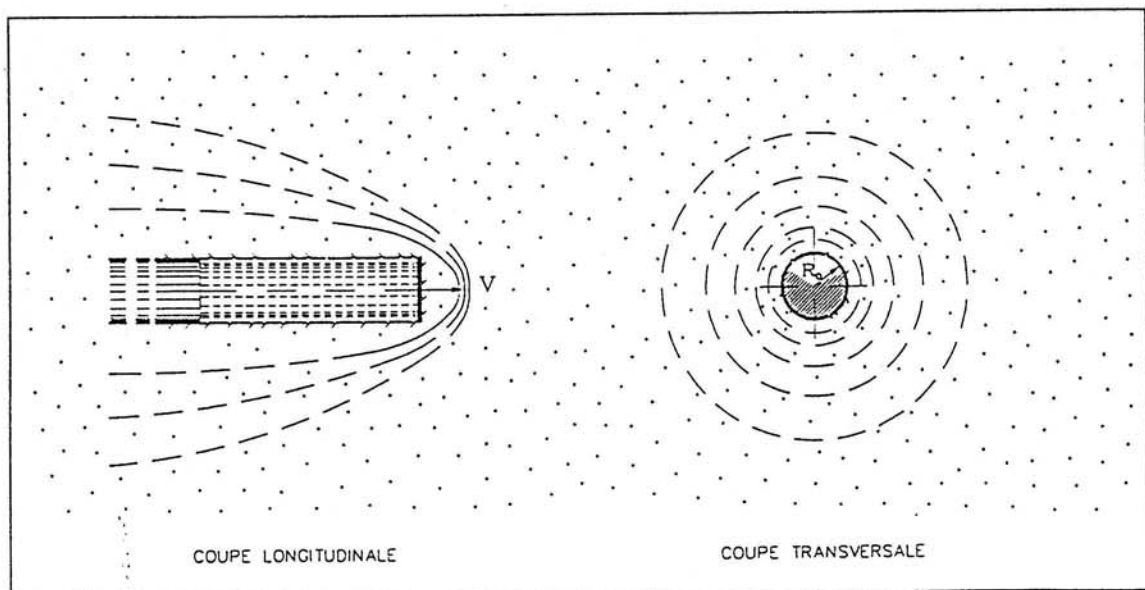


Fig. 2: action de l'avancement de la cavité sur le milieu.

dans le sens longitudinal aussi bien que dans le sens transversal - qui modifie l'état de contrainte s'exerçant sur lui (fig. 2).

A l'intérieur de la zone perturbée, le champ de tensions préexistant - que nous pouvons représenter comme un réseau de lignes de flux - est dévié par la présence de l'excavation (fig. 3) et se concentre à proximité, produisant des surtensions. L'importance de ces surcharges détermine, dans chaque milieu, l'ampleur de la zone perturbée et donc - en fonction de la résistance de massif σ_{gd} - le comportement de la cavité.

L'ampleur de la zone perturbée en proximité du front de taille est définie par le rayon d'influence du front R_f .

Nous pouvons dès lors distinguer trois zones caractéristiques (fig. 4): une zone non perturbée où le massif rocheux ne se ressent pas encore de la présence du front, une zone - délimitée par le rayon d'influence du front - dans laquelle cette présence est particulièrement ressentie, enfin, une troisième zone où le front n'exerce plus aucune influence et où la situation tend à se stabiliser. Il est important de noter que lorsque nous passons de la zone non perturbée à la zone de stabilisation, le milieu passe d'un état de contrainte de type triaxial à un état de contrainte de type plan et la zone du front de taille est celle où se produit cette transition.

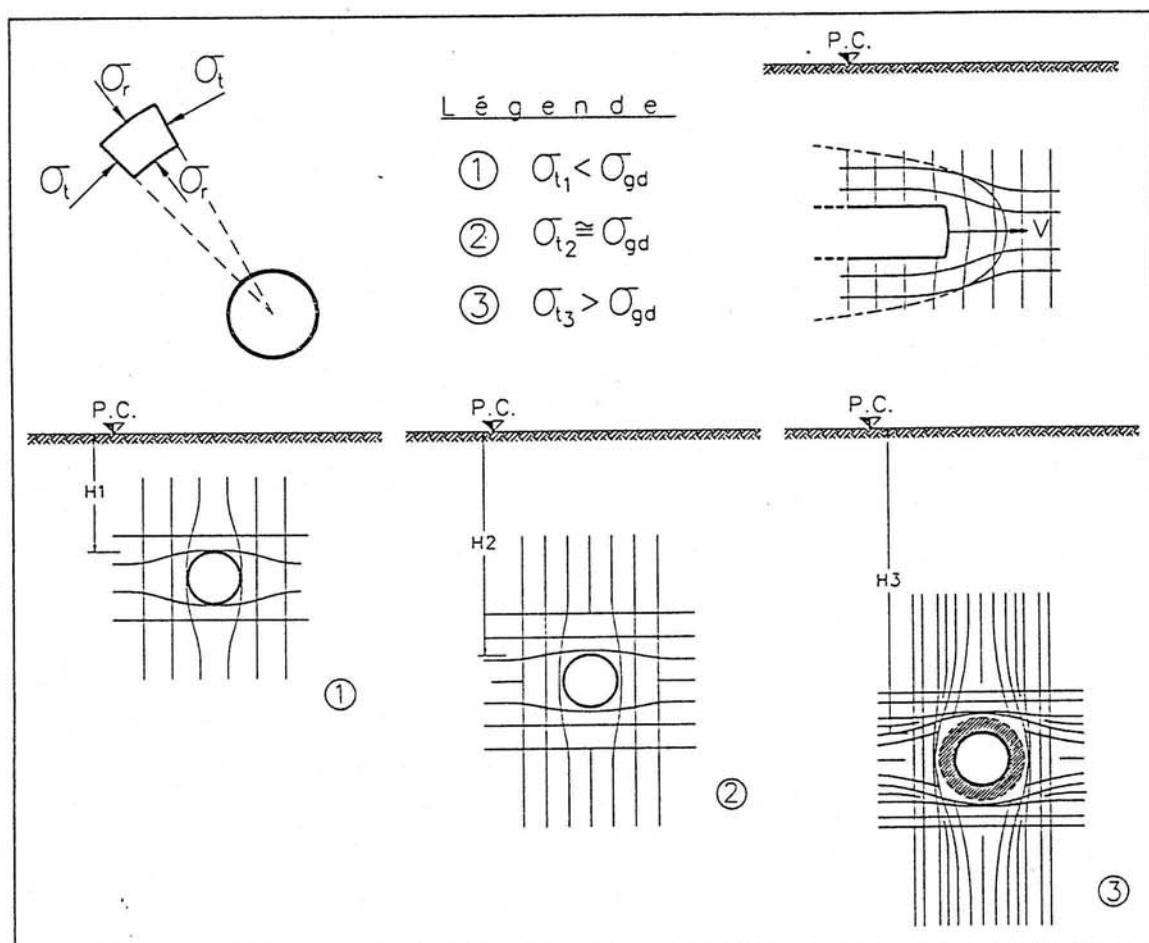


Fig. 3: déviation du flux de tensions par l'effet de l'excavation.

De ces considérations, il découle qu'une étude sérieuse de stabilité d'un tunnel ne peut pas se limiter à une schématisation plane et qu'elle doit être tridimensionnelle.

La réaction est la réponse en déformation du milieu à l'action d'excavation. Elle se produit dans le cadre de la zone perturbée à la suite des surtensions qui se sont créées dans le milieu sur le contour de la cavité et se manifeste par des phénomènes d'extrusion sur le front de taille et de convergence sur le contour de la cavité.

Nous appellerons noyau d'avancement le prisme de terrain du front dont les dimensions transversales et longitudinales sont du même ordre de grandeur que le diamètre du tunnel.

Naturellement, en passant d'un état de contrainte de type triaxial à un état de contrainte de type plan, le matériau que constitue le noyau d'avancement se comporte de manière différente selon l'importance de

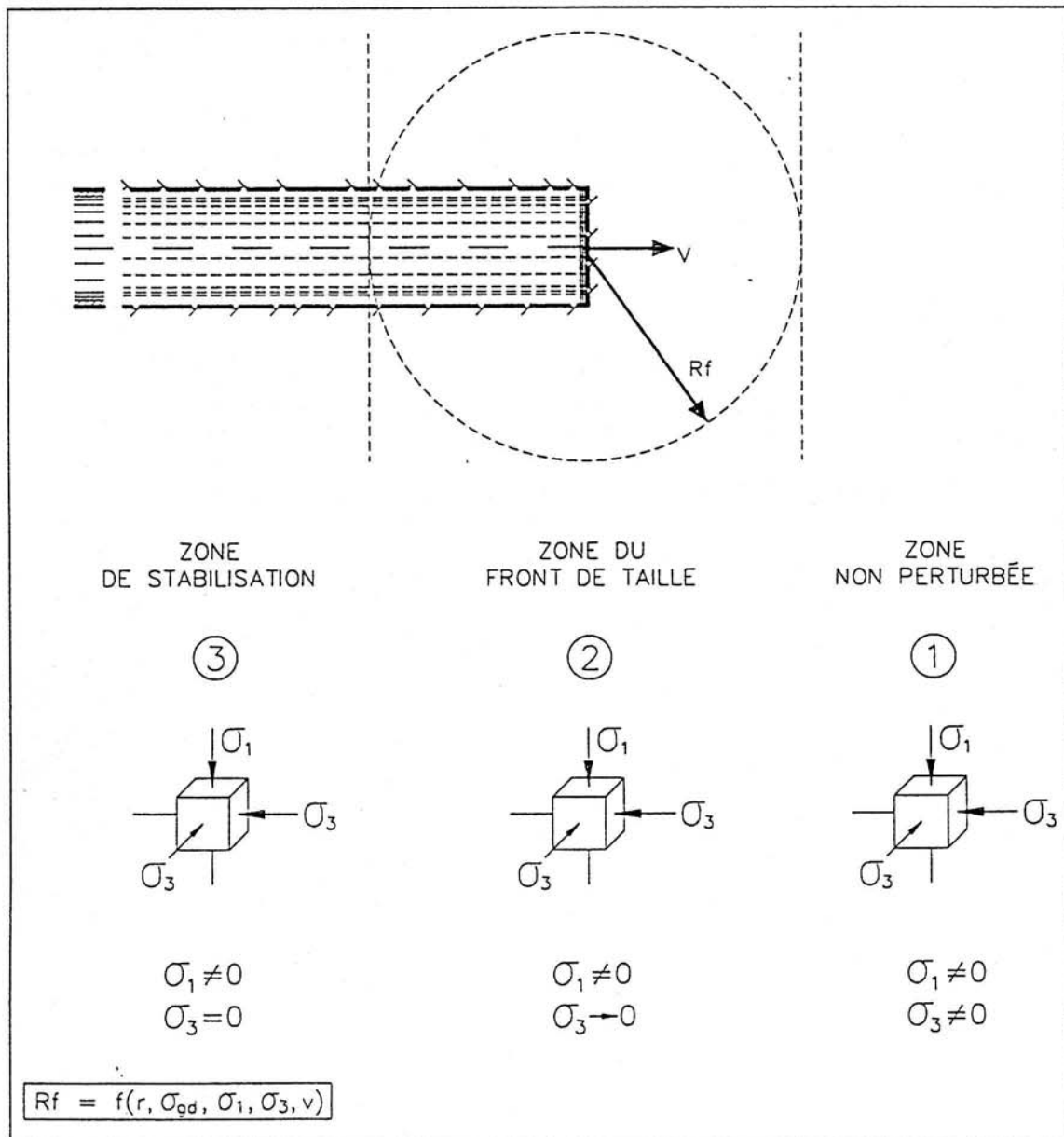


Fig. 4: avancement du front de taille et zones caractéristiques.

rayon d'influence R_f , en fonction de σ_{gd} et de l'état de contrainte auquel il est assujéti (fig. 5).

Si l'élimination de l'état de contrainte au front ($\sigma_3=0$) se fera avec le noyau au front sous contrainte en domaine élastique, la paroi libérée (front de taille) se maintiendra stable avec des déformations limitées et absolument négligeables.

Dans ce cas, la canalisation des tensions sur le contour de la cavité ("effet de voûte") se fait par la voie naturelle, près du profil d'excavation.

Si en revanche, l'élimination de l'état de contrainte au front ($\sigma_3=0$) se fait lorsque le noyau au front est sous contrainte en domaine élastoplastique, la réaction sera importante aussi et la paroi libérée du noyau (front de taille) se déformera élastoplastiquement vers l'intérieur de la cavité (extrusion) et donnera lieu à une situation de stabilité à court terme. Cela signifie l'amorce d'un phénomène de plasticisation qui va se propager longitudinalement et radialement à partir du contour de l'excavation et qui produit le déplacement de l'"effet de voûte" plus à l'intérieur du massif. Ce processus ne peut être arrêté qu'à travers la réalisation d'interventions pertinentes de stabilisation de la masse de terrain plasticisé.

Si enfin l'élimination de l'état de contrainte au front ($\sigma_3=0$) se fera lorsque le noyau au front est sous contrainte en domaine de rupture, la réponse en déformation sera inacceptable et nous aurons une situation d'instabilité du noyau qui rend impossible la formation de l'"effet de voûte". C'est le cas des terrains incohérents ou meubles dans lesquels celui-ci, ne réussissant pas à se former par la voie naturelle, doit être obtenu par la voie artificielle.

Il s'ensuit que les caractéristiques de résistance et de déformabilité du noyau d'avancement jouent un rôle déterminant sur l'apparition et sur l'évolution des phénomènes de déformation.

Les déformations radiales (convergences) qui se manifestent sur le contour de la cavité sont la conséquence directe des phénomènes de déformation qui se sont déjà amorcés au-delà du front de taille (extrusion). En d'autres termes, elles sont la conséquence directe des choix faits lors de la conception et de la construction pour réglementer la réponse en déformation en amont du front de taille (fig. 6).

Régler la rigidité du noyau signifie notamment contrôler l'apparition de la réponse en déformation en amont du front de taille (extrusion) et par voie de conséquence également son évolution en aval du front même (convergence).



Fig. 6

Des mesures expérimentales se rapportant à l'évolution des déformations dans le milieu, en fonction de la position du front de taille, confirment ce qui précède et mettent en évidence que le rayon d'influence du front R_f est d'autant plus réduit que le noyau se maintient plus rigide et en domaine élastique (fig. 7).

Pour faire en sorte que le noyau d'avancement devienne un instrument fondamental de contrôle et de maîtrise de la réponse en déformation, il faut opérer en amont du front même à travers des interventions de pré-consolidation exerçant une action que nous appellerons de pré-confinement pour la distinguer de l'action de simple confinement qui agit sur le contour de la cavité en aval du front (fig. 8).

L'action de pré-confinement de la cavité s'oppose à la formation de la réponse en déformation en amont du front. Elle limite donc son

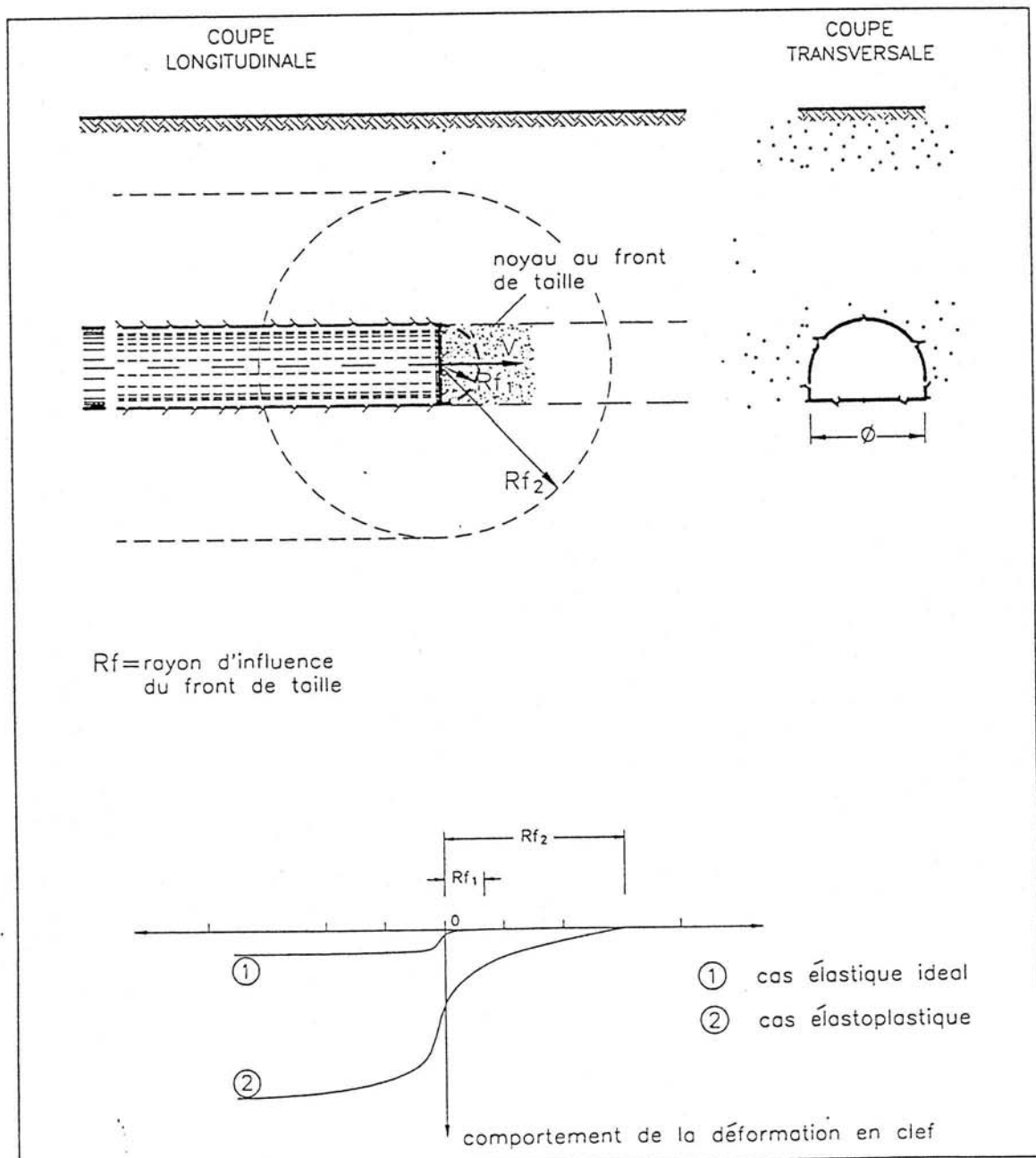


Fig. 7 déformation du profil en clef en fonction de R_f et de la rigidité du noyau d'avancement.

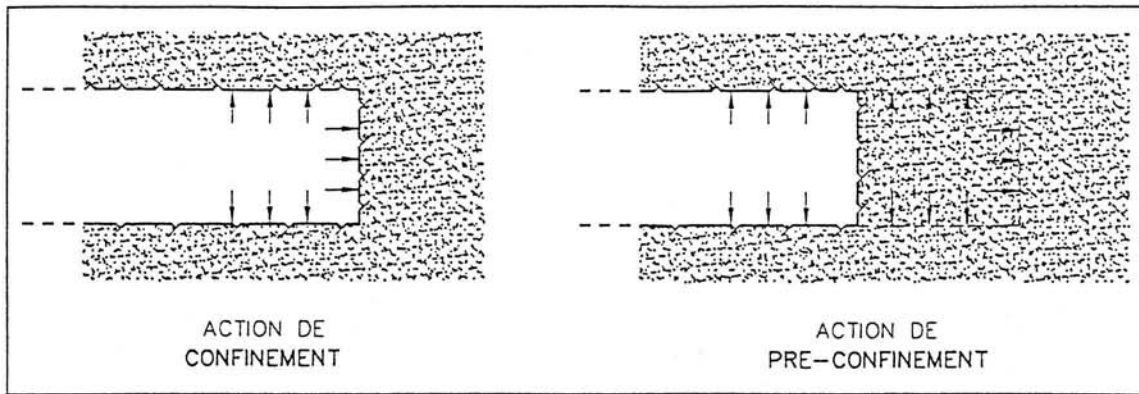


Fig. 8: action de confinement et de préconfinement sur une cavité.

évolution en aval et facilite sa réglementation. C'est pourquoi, conformément aux normes les plus récentes des principales administrations italiennes adjudicatrices d'ouvrages en souterrain (Società Autostrade, ANAS, ITALFERR), l'intérêt du projeteur doit dès lors se concentrer sur le noyau d'avancement et sur ses caractéristiques de résistance et de déformabilité. Si nous donnons au noyau la rigidité suffisante, il devient possible de maintenir le terrain à l'intérieur du rayon d'influence du front de taille, essentiellement en domaine élastique, et d'obtenir ainsi des phénomènes de déformation réduits. Ceci résoud le problème principal, qui est la stabilité à court et à long terme d'un ouvrage en souterrain.

Nous avons, ces dernières années, étudié et mis au point - dans le but de faire du noyau d'avancement, quel que soit le type du terrain, un élément structurel ayant des caractéristiques géomécaniques capables de résoudre tous les problèmes de stabilité - de nouveaux instruments de stabilisation destinés à conserver son intégrité.

Ces interventions agissent à l'intérieur du massif en amont du front lorsque celui-ci est encore impliqué par des contraintes de type triaxial et réalisent l'effet de pré-confinement (fig. 9):

- d'une manière directe (interventions de conservation directes) lorsqu'elles opèrent au contour du noyau et réalisent sur le front, en avancement, des pre-voûtes résistantes de terrain consolidé ou de spritz-béton renforcé de fibres, capables de produire des effets de voûte artificiels qui allègent les surcharges du noyau;
- d'une manière indirecte (interventions de conservation indirectes) lorsqu'elles agissent directement sur le noyau qu'elles préconsolident;
- d'une manière mixte (interventions de conservation mixtes) lorsqu'elles opèrent sur le contour aussi bien que directement sur le noyau.

L'action de pré-confinement, que ces interventions fournissent directement ou indirectement peut être représentée sur le plan de Mohr par une "ligne de conservation" qui indique la limite au-dessous de laquelle la pression de confinement σ_3 ne devra jamais tomber si nous voulons maîtriser d'une manière acceptable les phénomènes de déformation.

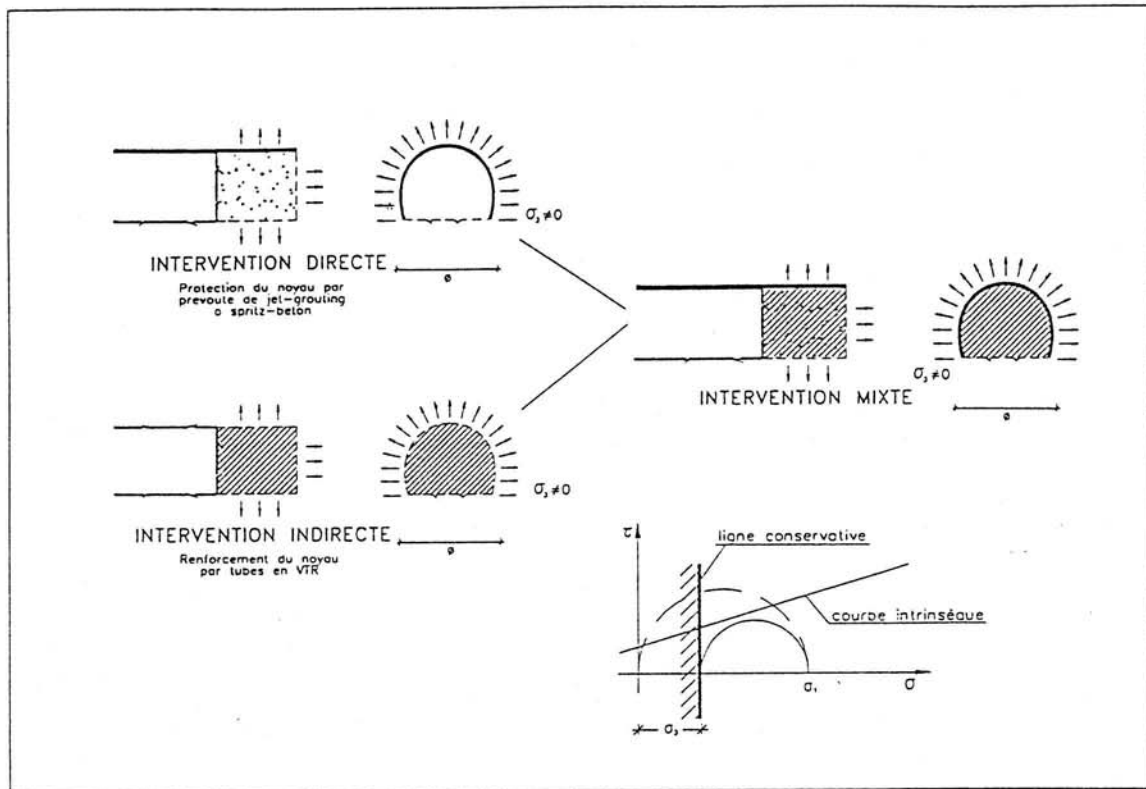


Fig. 9: action de pré-confinement directe, indirecte et mixte et sa représentation sur le plan de Mohr (ligne conservative).

La disponibilité des technologies d'excavation en conservation a abouti à une véritable révolution dans la manière d'affronter les excavations en souterrain en terrain meuble et, par voie de conséquence, à la mise au point d'une méthode innovante de conception et de construction. Il s'agit de l'ADECO-RS (Analyse des DEformations COntrollées dans les Roches et dans les Sols) [9], dont l'application en Italie ces dernières années a donné lieu à des résultats exceptionnels voire impensables jusqu'à il n'y a pas longtemps, dans le domaine justement des terrains les plus difficiles, là où les autres théories et méthodes avaient généralement révélé des limites importantes.

La figure 10 montre tous les instruments de stabilisation prévus par la méthode, divisés selon qu'ils fournissent une action de pré-confinement ou de simple confinement.

Parmi les prérenforcements, en plus des injections traditionnelles et des drainages en avancement (technologies désormais largement connues) citons le jet-grouting horizontal, le prédécoupage mécanique et le prérenforcement du front par des tubes en résine renforcée de fibres de verre (VTR). Ces démarches, en plus des technologies particulières telles que le système de la "Voûte cellulaire" pour la réalisation de grandes cavités corticales en zone urbaine et du jet-grouting vertical pour la réalisation d'ouvrages d'embranchement dans des versants instables, constituent les interventions de conservation conçues et réalisées au cours des 10 dernières années (fig. 11).

Dans le passé, alors que le problème de l'instabilité du front de taille n'était perçu que comme une entrave pour les opérations

CONCEPTION ET EXECUTION DES TUNNELS SYSTEME ADECO-RS

EFFECTS DES INTERVENTIONS PAR ACTION DE CONFINEMENT ET PRECONFINEMENT

CONFINEMENT

PRECONFINEMENT

ACTION SUR L'EXCA- VATION	INTERVENTIONS DE STABILISATION		INTERVENTIONS AGISSANT SUR		H ₂ O SOUS PRESS		
			c, ϕ	σ_3			
PRECONFINEMENT	PRECONSOLIDATIONS	INJECTIONS (•) TRADITIONNELLES CONGELATION			*	*	*
		JET-GROUTING (•) SOUS-HORIZONTAL			*	*	*
		PREDECOUPAGE (•) ET PRETUNNEL			*	*	*
		DRAINAGES (•)			*	*	*
		RENFORCEMENT (•) DU NOYAU PAR TUBES EN FIBRE DE VERRE			*	*	*
CONFINEMENT		SPRITZ-BETON (•)			*	*	*
		BOUCLIER SOUS PRESS. MECANIQUE			*	*	*
		BOUCLIER SOUS PRESS. DE FLUIDE			*	*	*
	CONSRADIALE	BOULONNAGE (•) ADHERENCE CONTINUE			*	*	*
		BOULONNAGE (•) ANCR. PONCTUEL			*	*	*
PRE-SOUT.		RADIER (•)			*	*	*
		BOUCLERS OUVERTS			*	*	*
PRE-SOUT.		TUBES PRÉFORÉS OU VOÛTE PARAPLUIE			*	*	*

LEGENDE

- (•) = INTERVENTIONS STRUCTURELLES
 σ_3 = PRESSION DE CONFINEMENT
 c = COHESION DU TERRAIN
 ϕ = ANGLE DE FROTTEMENT
 DU TERRAIN

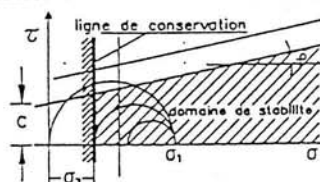


Fig. 10

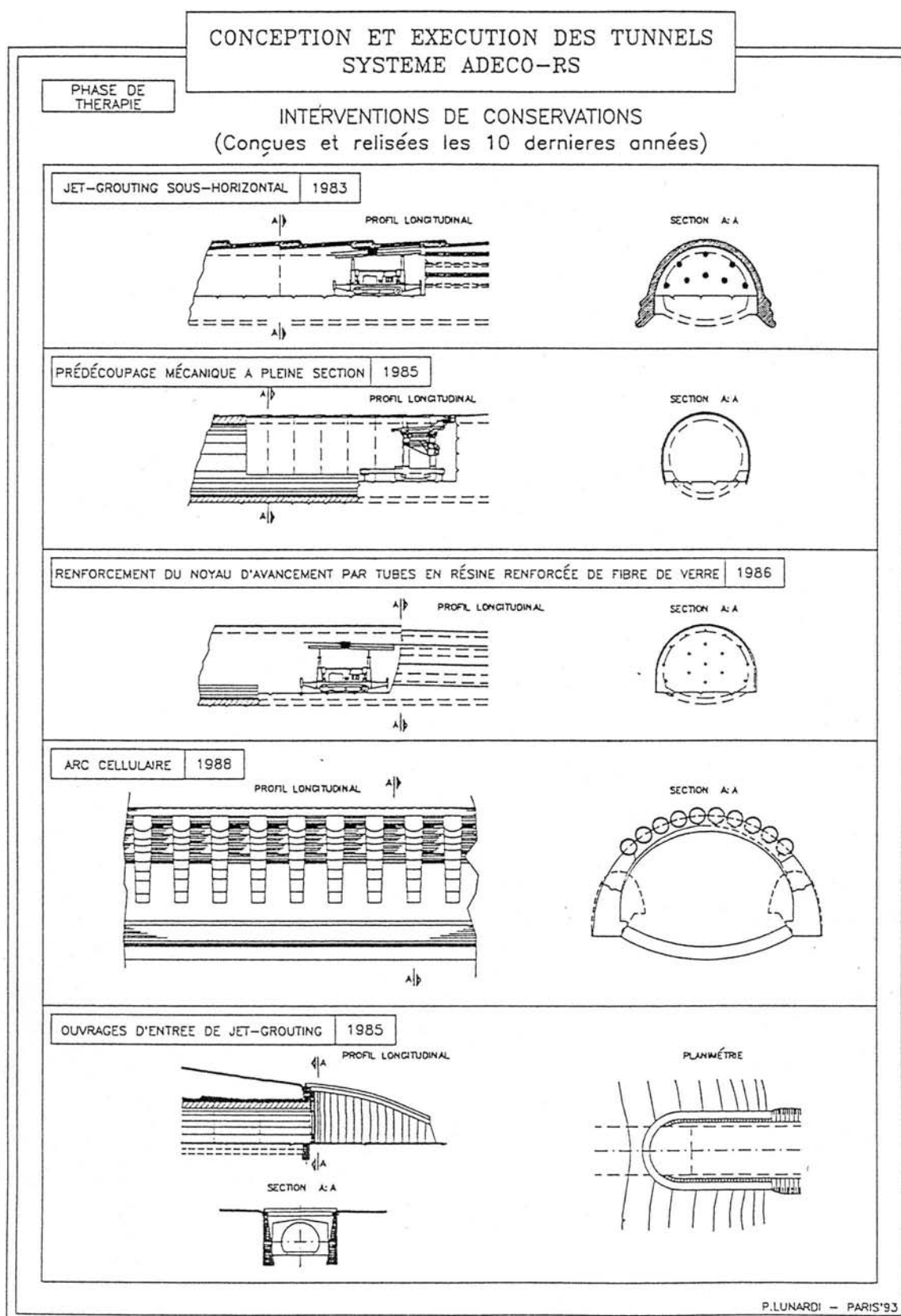


Fig. 11

courantes d'excavation, sans se douter des répercussions particulières sur la statique à court et à long terme de l'ouvrage (fig. 12), les systèmes de construction considérés parmi les plus avancés, tels que le NATM, se limitaient dans ces cas à prescrire la partialisation de la section, intervenant sur le contour de la cavité, en aval du front, par de simples actions de confinement. Dans d'autres cas où le confinement des déformations du terrain devanait important du fait de l'interférence possible des excavations en souterrain avec des préexistances sur le territoire, il a été fait recours au confinement du front avec des boucliers mécanisés ou encore, en présence de nappe, par des boucliers avec des fluides sous pression (air, boues etc...), capables de fournir un confinement susceptible d'équilibrer la poussée du terrain sur le front de taille. Il s'agit en tout état de cause de systèmes rigides qui ont des champs d'application limités dans la mesure où ils ne peuvent pas s'adapter à des variations géologiques et dans la mesure où ils ne peuvent pas s'appliquer à des terrains poussants et gonflants.

Plus loin nous présenterons rapidement l'un après l'autre les différents systèmes de conservation. Nous montrerons leur fonctionnement statique et les résultats obtenus dans quelques unes des applications pratiques.

2. Jet-grouting sub-horizontale (système de conservation direct)

Le système - conçu en 1983 par l'auteur - consiste à réaliser dans l'avancement du front de taille - au niveau du périmètre du futur tunnel - une carapace de colonnes sub-horizontales, s'interpénétrant en partie, de terrain consolidé par jet-grouting (fig. 13). Nous

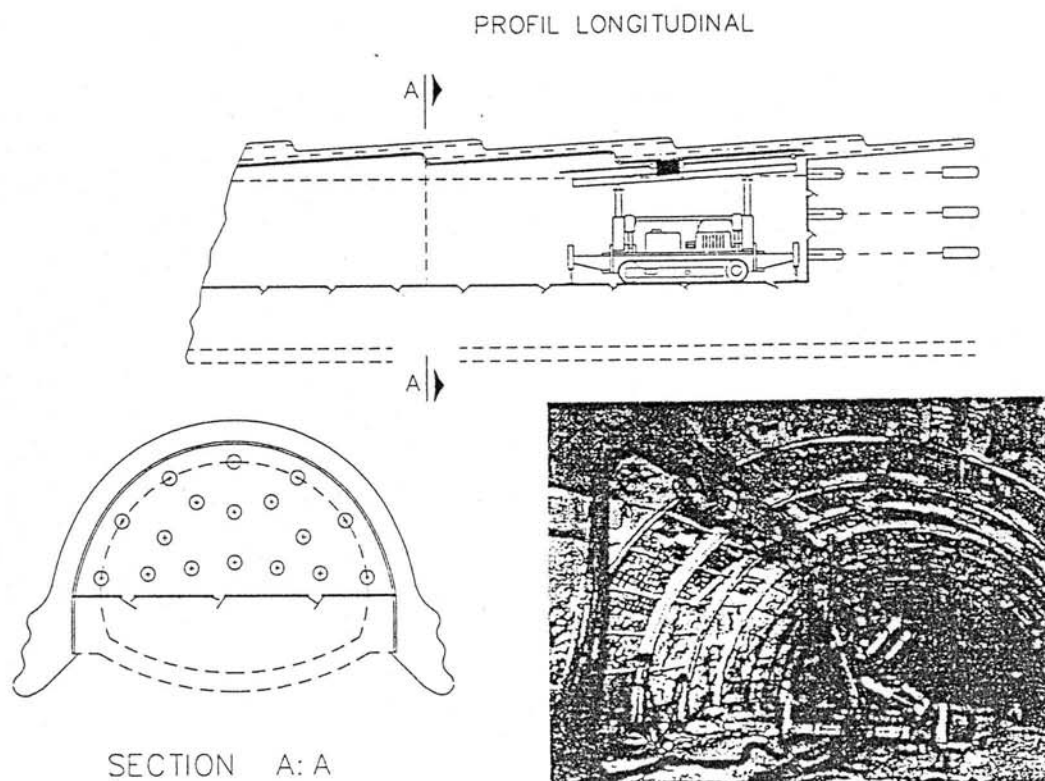


Fig. 13a: avancement après jet-grouting horizontal et à section partialisée.

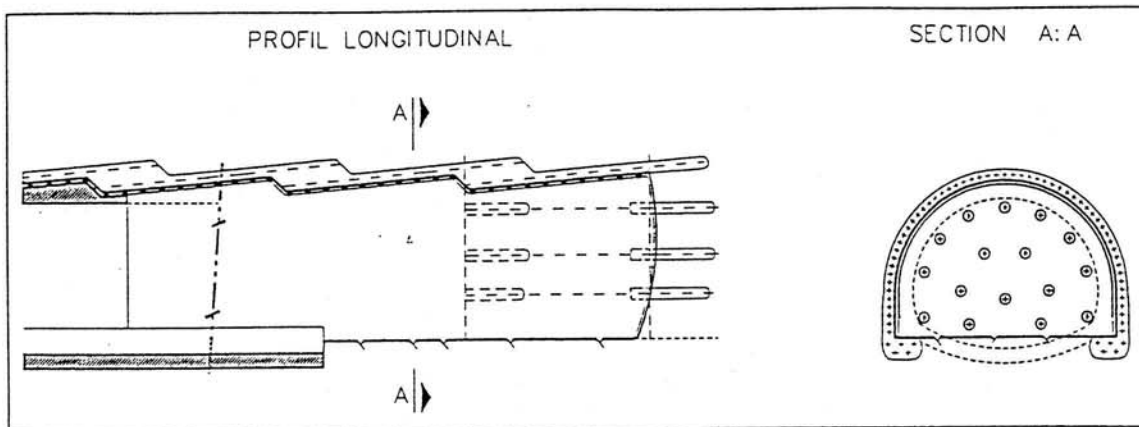


Fig. 13b: avancement après jet-grouting horizontal
à pleine section.

obtenons de la sorte une pre-voûte résistante capable d'exercer une action de pré-confinement sur le massif au front de taille et sur le contour de la cavité. Dans les situations plus difficiles, il convient de réaliser des colonnes de terrain traité également à l'intérieur du noyau [2] [3] [5].

Il est important d'assurer la continuité de la bande de terrain traité sur le contour de la cavité. Dans ce but, si l'excavation se fait en deux phases, il est fondamental - avant d'effectuer l'abaissement à la pleine section - de réaliser au niveau des piédroits une série de colonnes sub-verticales pour transmettre en profondeur les tensions canalisées par la pre-voûte de terrain consolidé.

La déviation du flux des tensions - obtenue grâce à la présence de cette carapace résistante artificielle - produit un allègement du noyau et évite, ou pour le moins limite, le détensionnement du terrain environnant à la suite de l'excavation.

Du point de vue statique, cela se traduit par une réduction des actions qui exerceront des contraintes sur le revêtement de la première phase puis, sur le revêtement définitif. Il s'agit donc bien d'une intervention de conservation dans la mesure où elle empêche la contrainte principale mineure σ_3 de tomber à des valeurs nulles.

Le champ d'application s'étend des massifs de type incohérent aux terrains cohérents à la condition qu'ils présentent une résistance au découpage permettant de les attaquer par une projection à très haute pression. Il est donc possible de traiter des formations hétérogènes.

2.1 Applications

Une application particulièrement significative du système a été effectuée à Rome, en 1990, pour la réalisation d'un nouveau passage souterrain sur Via Cristoforo Colombo, devenu nécessaire pour l'embranchement avec le boulevard périphérique d'Ostiense.

Le problème se présentait difficile à résoudre vu d'une part, l'impossibilité de fermer ne serait-ce que provisoirement, Via Cristoforo Colombo (axe routier de 10 voies sur lequel s'écoule un trafic de plus de 10.000 véhicules/heure) et, d'autre part, l'exigence

de ne pas trop approfondir la nivelette pour éviter de devoir réaliser des rampes d'accès de longueur excessive. La présence de lignes importantes de sous-services constituait un facteur supplémentaire de difficultés.

Le tracé en souterrain réalisé se développe entièrement le long d'une courbe étroite de 73 m de rayon. Il décrit un angle de 80 degrés environ, avec un recouvrement maximum de 4 m sous Via Cristoforo Colombo (fig. 14).

Le terrain à traverser était celui du remblai de Via Cristoforo Colombo, de près de 10 - 15 m de puissance. La section d'excavation coupait le contact stratigraphique entre ce remblai et son terrain de fondation, un épais dépôt limon-argileux avec une composante de tourbe assez marquée, qui le rend particulièrement souple et "aéré" et lui confère des caractéristiques géomécaniques très réduites ($E = 3 - 5$ MPa). La situation géotechnique s'aggravait davantage encore du fait de la présence de la nappe juste au contact des deux terrains.

Les recouvrements réduites en jeu ajoutées aux modestes caractéristiques géomécaniques des matériaux et aux effets dynamiques des charges dues au flux des véhicules au-dessus aboutissaient à la définition d'un tableau global extrêmement délicat obligeant à prévoir pour le tunnel en question un comportement du front et de la cavité fondamentalement instable, propre aux matériaux incohérents ou semi-incohérents.

Le projet, mis au point par Rocksoil S.p.A. de Milan, s'est entièrement basé sur l'application de la technologie jet-grouting en sub-horizontale qui a permis de résoudre les problèmes statiques et de stabilité de l'ouvrage en réalisant à pleine section une excavation à trou aveugle de plus de 12 m de diamètre.

L'intervention a consisté à mettre en place sur l'avancement du front de taille une double couronne de colonnes de terrain consolidé, obtenue par la superposition de deux traitements consécutifs d'une

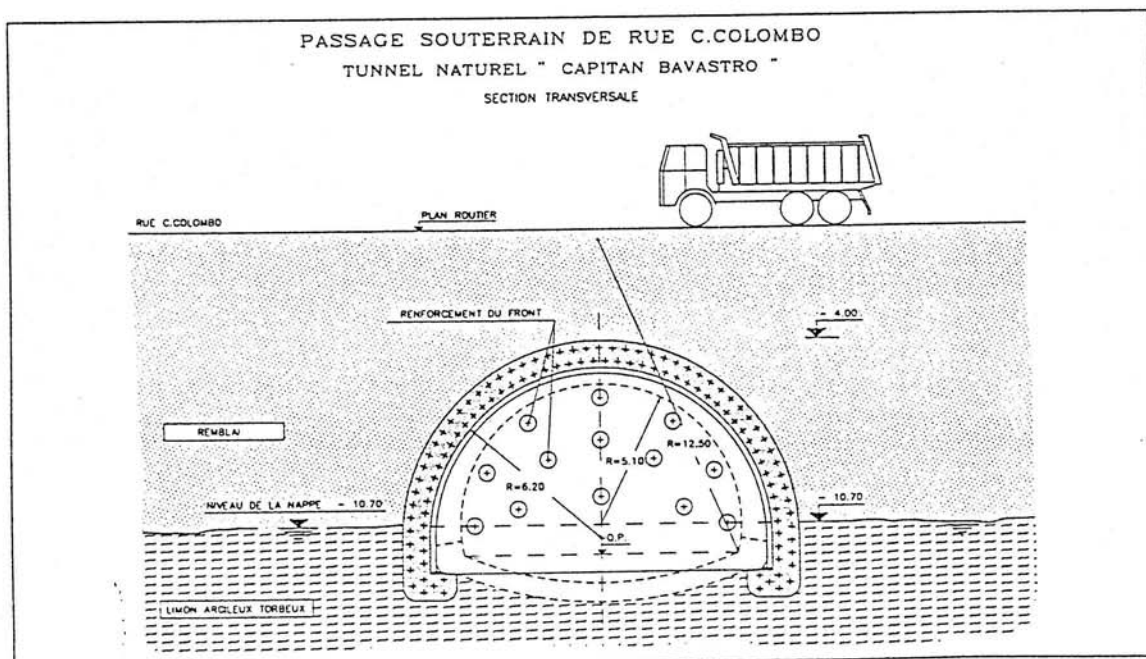


Fig. 14: section de projet.

longueur moyenne de 13 m sur des fonds individuels de 6,5 m. De cette manière, il était possible d'opérer avec des pressions d'injection plus fortes dans les 6 premiers mètres déjà partiellement consolidés par la couronne précédente et d'obtenir une consolidation finale plus intense et plus homogène, sans pour autant risquer d'endommager les sous-services adjacents et de provoquer des soulèvements du plan routier. Le traitement était également étendu au-dessous du point d'appui du revêtement de la première phase pour éviter des phénomènes locaux de poinçonnage. Pour assurer la stabilité du front, il a été procédé à le consolider spécialement par la mise en place de colonnes jet-grouting armées de tubes en résine renforcée de fibres de verre.

Chaque fond était suivi par la réalisation immédiate du revêtement de la première phase de cintres et spritz-béton et la coulée du radier.

Une campagne étendue de relevés effectués de la surface aussi bien que de l'intérieur de la cavité a permis de tenir constamment sous contrôle l'évolution de la situation.

Malgré les difficultés d'exécution dues notamment à la géométrie complexe du passage souterrain - qui a exigé une étude méticuleuse des interventions qui devaient se superposer dans un tracé fortement curviligne avec une nivelette variable - les affaissements en surface ont pratiquement été nuls. Aucun problème n'a été créé pour les sous-services.

Le résultat obtenu - compte tenu des difficultés nombreuses qu'il a fallu surmonter - a été absolument remarquable, à plus forte raison si nous considérons que le coût de l'ouvrage et les délais d'exécution (deux mois et demi seulement de travaux pour 100 m de tunnel naturel fini) ont été nettement inférieurs à ceux qui auraient été nécessaires si nous avions adopté les technologies traditionnelles, rien que pour le déplacement provisoire des conduites importantes d'eau et des lignes électriques et téléphoniques adjacentes.

3. Prédécoupage mécanique (système de conservation direct)

Le prédécoupage mécanique à "pleine section", conçue par l'auteur en 1985, consiste à pratiquer une incision d'une épaisseur et d'une longueur déterminées à l'avance sur le front de taille, le long de la trace du profil d'extrados du futur tunnel [1] [2] [4] [5].

L'incision, obtenue grâce à une machine spéciale dotée de tête fraiseuse à chaîne, est immédiatement remplie de béton renforcé de fibres, convenablement additionné pour obtenir une excellente résistance à court terme (fig. 15).

Un prérevêtement est ainsi réalisé en matériau cimentaire, lancé au-delà du front de taille, capable de garantir un pré-confinement radial du terrain environnant à même d'empêcher tout relâchement. Une fois le front de taille passé, il est durci le plus rapidement possible en effectuant la coulée de la base des piédroits et du radier. Le revêtement final en béton pourra être complété plus tard.

Le champ d'application du système s'étend des terrains argileux aux terrains limoneux même s'ils sont hétérogènes et aquifères, à la condition qu'ils consentent - éventuellement à travers l'adoption de

mesures particulières - de garder l'incision ouverte le temps nécessaire à la remplir.

Le mécanisme à travers lequel le prédécoupage mécanique atteint son but qui est d'améliorer sensiblement le comportement d'une excavation de terrain est double:

- l'action de pré-confinement radial évite l'annulation - ne serait-ce que transitoire - de la tension principale mineure σ_3 , réduit ou annule l'extension de la plasticisation autour de la cavité et met le terrain dans la condition de se soutenir tout seul et de développer un "effet voûte" en avancement, capable d'assurer la stabilité transversale du tunnel
- la protection en spritz-béton saillant de près de 4 m au-delà du front déplace plus à l'intérieur du massif la zone d'amorce de phénomènes éventuels d'extrusion, ce qui retarde leur apparition ou diminue en tout état de cause leurs effets.

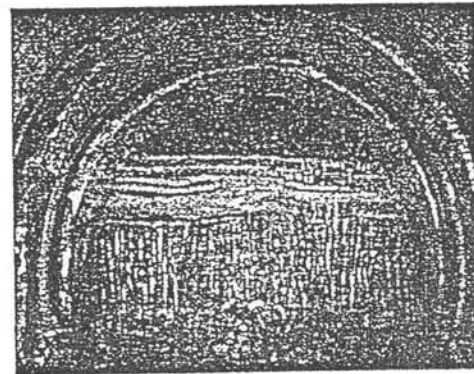
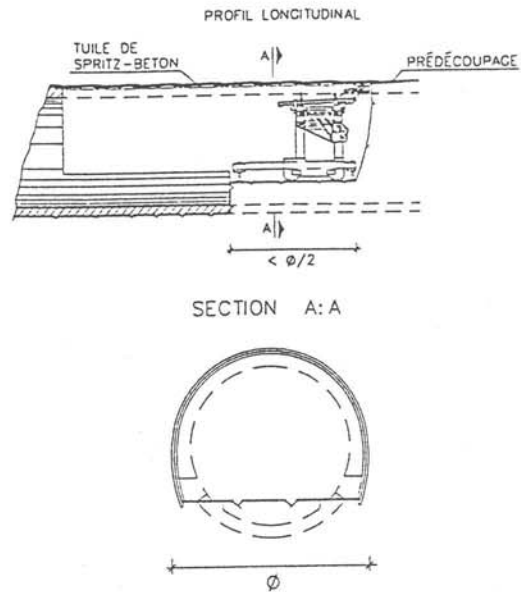


Fig. 15: tuile de spritz-béton réalisé avec prédécoupage.

Les prérogatives importantes de la méthode qui ont pu être directement vérifiées sont les suivantes:

- élimination presque totale des hors-profils et donc réduction sensible du besoin d'injections de bourrage entre le prérevêtement et le terrain
- réduction de l'incidence des soutènements provisoires dans la mesure où ils sont pratiquement remplacés par la carapace du prédécoupage
- mécanisation poussée des travaux et régularisation des cadences d'avancement, avec des répercussions positives sur l'économie du chantier et sur les productions qu'il est possible d'obtenir
- réalisation d'un prérevêtement qui collabore à la statique du revêtement définitif de telle sorte que ce dernier peut être avantageusement réduit en épaisseur.

La bonne stabilité du front de taille est une condition importante pour la bonne réussite du système. Dans les cas où elle n'est pas suffisamment garantie exclusivement par la carapace du prédécoupage, il est indispensable d'ajouter des systèmes de pré-renforcement du noyau à l'aide de tubes en résine renforcés de fibres de verre ou,

dans les terrains aquifères, à l'aide d'auréoles de drainages en avancement.

3.1 Applications

La première application du prédécoupage mécanique à pleine section a eu lieu en 1985, en Italie, pour la réalisation de quelques tunnels sur la ligne de chemin de fer Sibari-Cosenza [1], [4].

Depuis, il a été appliqué avec un succès certain sur plus de 10 km de tunnels, tous réalisés en Italie.

Son application a été particulièrement significative dans les tunnels à double voie Tasso et Terranova Le Ville, sur la nouvelle ligne de chemin de fer Direttissima Rome- Florence, dans la section entre Arezzo Sud et Figline Valdarno où grâce à ce système il a été possible de réaliser - dans des terrains où d'autres technologies avaient échoué - des avancements à pleine section avec des productions moyennes de l'ordre de 3 m/jour, dans le respect des délais programmés et avec une sécurité opérationnelle absolue.

Les mesures et les contrôles constamment effectués au cours de tous les travaux d'excavation ont permis la mise au point définitive des rythmes d'avancement et des systèmes opérationnels tout en mettant en évidence les avantages que ce système d'attaque peut réellement offrir au niveau du confinement des phénomènes de déformation et donc, dans le cas des tunnels corticaux, d'affaissements en surface. Ces phénomènes commencent à se produire dans le terrain quelques décimètres seulement avant l'arrivée du front de taille. Nous avons trouvé des valeurs moyennes de convergence centimétriques et des affaissements en surface millimétriques - dans les sections les plus corticales - et en tout état de cause d'un ordre de grandeur plus réduit par rapport aux valeurs normalement observées dans les excavations effectuées selon des méthodes traditionnelles dans des terrains analogues.

4. Le pré-renforcement du front à l'aide de tubes en VTR (système de conservation indirect)

La méthode - conçue par l'auteur en 1986 - consiste à pratiquer sur le front, en direction sub-parallèle à l'axe du tunnel, une série de trous régulièrement répartis sur la surface d'intervention. Des tubes en résine renforcée de fibres de verre (VTR) sont introduits dans les trous et immédiatement injectés de mortier de ciment (fig. 16) [1] [2] [5] [6].

La longueur, le nombre, le diamètre et la distribution géométrique des tubes placés sur le front du tunnel sont les paramètres qui caractérisent l'intervention de pré-renforcement

La profondeur de l'intervention (longueur des tubes) est régie par le diamètre du tunnel bien sûr, mais également par l'utilité de limiter l'incidence de ces opérations par unité de longueur du tunnel d'une part et par l'impossibilité d'opérer facilement avec des tubes de longueur excessive de l'autre.

En revanche, son intensité (nombre et diamètre des tubes) et sa distribution géométrique varient en fonction de la résistance au cisaillement du terrain naturel, des pressions lithostatiques en jeu, des dimensions de la section d'excavation et de l'importance de l'effet que nous volons obtenir.

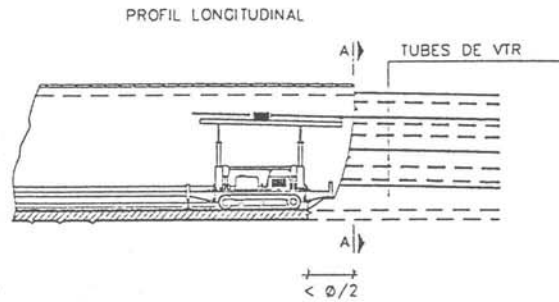
L'idée d'utiliser des tubes en résine renforcée de fibres de verre a été déterminante pour l'affirmation de ce genre de pré-renforcement dans la mesure où ces tubes unissent des valeurs de résistance très élevées à une fragilité considérable de sorte qu'il est facile - au cours des opérations d'excavation - de les briser avec la benne qui sert pour l'excavation du terrain.

Lorsque au fur et à mesure que l'avancement se poursuit, la longueur résiduelle des tubes introduits dans le front se révèle inférieure au rayon du tunnel, une nouvelle série est mise en chantier.

Si l'intervention est bien projetée et réalisée, elle permet d'obtenir une amélioration sensible des caractéristiques de résistance et de déformabilité du terrain constituant le noyau du front de taille du tunnel.

Ceci se traduit par:

- des déformations plastiques transversales réduites au niveau du tunnel et donc des phénomènes de convergence limités voire négligeables (effet de pré-confinement de la cavité)
- conservation des caractéristiques intrinsèques de résistance et de déformabilité du terrain à l'extrados de la portion suivante de matériau à excaver et donc une réduction sensible des poussées à court et à long terme sur les revêtements de la première et de la seconde phase
- durcissement du terrain au noyau et donc des phénomènes d'extrusion nuls ou tout à fait réduits



SECTION A:A

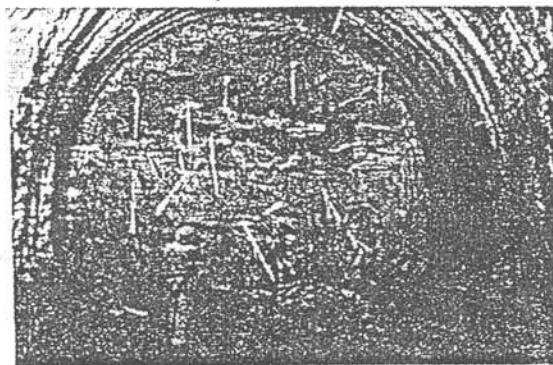
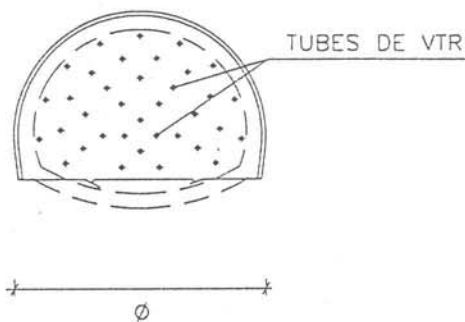


Fig. 16: pré-renforcement du front à l'aide de tubes en résine renforcée de fibre de verre (VTR).

4.1 Applications

Le système a été appliqué pour la première dans les excavations pour la réalisation des tunnels à voie unique "Talleto" et "Caprenne", actuellement en exploitation et faisant partie de la section d'interconnexion entre la nouvelle ligne de chemin de fer "Direttissima" Rome-Florence et la vieille ligne à la hauteur de Montevarchi, dans la section Arezzo Sud - Figline Valdarno [1], [6].

Les terrains traversés, sables et limons saturés d'eau avaient - au cours de la construction des autres tunnels - causé des difficultés considérables d'avancement à cause de l'instabilité du front.

Plus de 3.300 m d'excavation à pleine section de 60 m² ont été réalisés réussissant à contenir les phénomènes de déformation dans des limites de convergence moyenne inférieures à 4 cm.

Les mesures effectuées à l'aide d'extensomètres posés sur le haut (voir fig. 17) avaient révélé que les mouvements du terrain sur le contour de la cavité ne commençaient pas à se produire avant que le front de taille ne soit arrivé à 0,5 m seulement de la section de mesure. Ce qui constituait une confirmation certaine de l'efficacité du système de traitement.

Encouragés par les bons résultats évidents, nous avons appliqué plus tard la nouvelle technologie d'avancement - éventuellement combinée au prédécoupage mécanique - à la construction des tunnels à double voie (section de 115 m² environ) Tasso, Crepacuore, Poggio Orlandi, Terranova Le Ville, dans les sections où la situation géologico-géotechnique laissait prévoir l'apparition de phénomènes d'instabilité du front de taille.

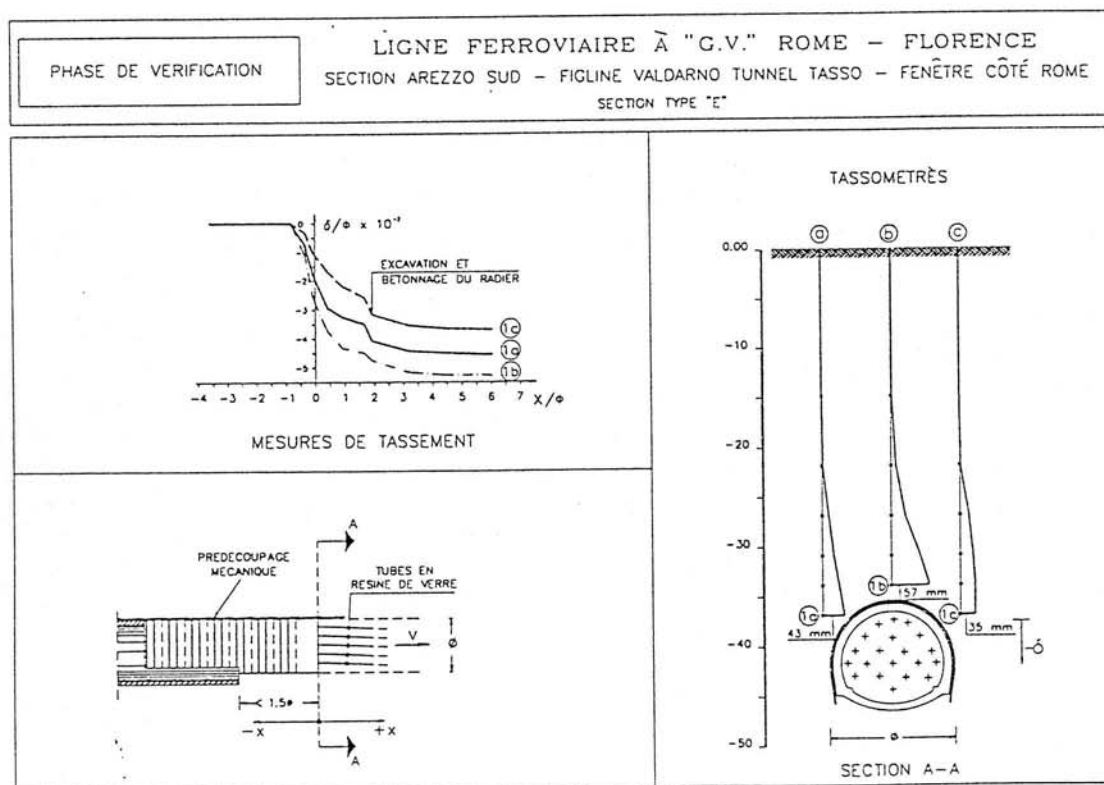


Fig. 17: tunnel Tasso, phase de verification: mesures de preconvergence.

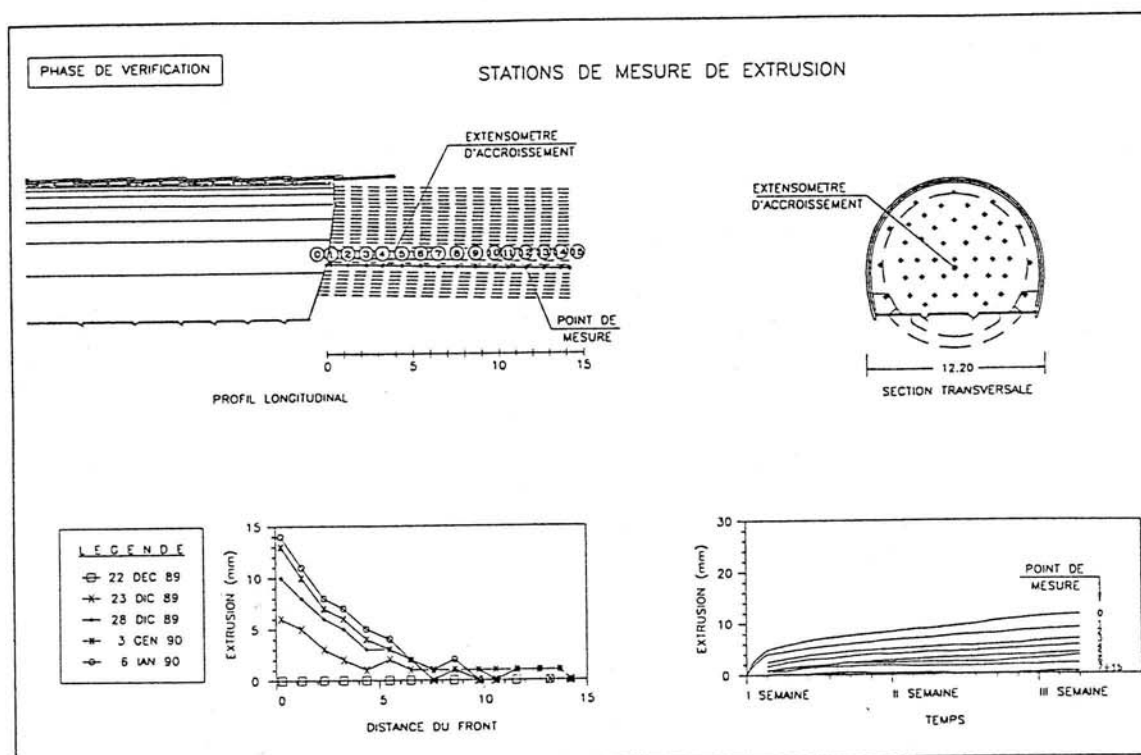


Fig. 18

Les résultats obtenus ont été excellents. Grâce à l'efficacité du pré-renforcement et malgré que nous n'ayons pas procédé à pleine section, nous n'avons jamais observé le moindre phénomène d'instabilité du front, ce qui nous a permis d'avancer avec une grande régularité et avec des productions moyennes de 2,5 m/jour environ.

Au cours des 6.000 m d'excavation réalisés, les convergences mesurées se sont maintenues toujours dans des valeurs extrêmement réduites alors qu'il ne s'est jamais produit des mouvements d'extrusion supérieurs à un centimètre et demi (voir fig. 18).

5. L' "Arc cellulaire"

Au-delà de certaines dimensions, la réalisation de grandes cavités corticales en terrain incohérent n'est pas possible si nous utilisons les technologies traditionnelles car la recouvrement réduite et le faible confinement du terrain nous empêchent de consolider le terrain sur le pourtour du chantier et de lui conférer une résistance et une homogénéité suffisantes.

Pour surmonter cette difficulté, a été conçue par l'auteur en 1988 l' "Arc cellulaire", un nouveau système de construction qui permet de réaliser la structure portante tout entière et le revêtement de la cavité avant de commencer à excaver [2] [5] [7].

Il s'agit d'une structure composite que nous pouvons assimiler à un treillis à section semi-circulaire dont les éléments longitudinaux (cellules) sont constitués de tubes en béton armé rendus collaborants grâce à une série de gros cintres transversaux (arcs ou voûtes).

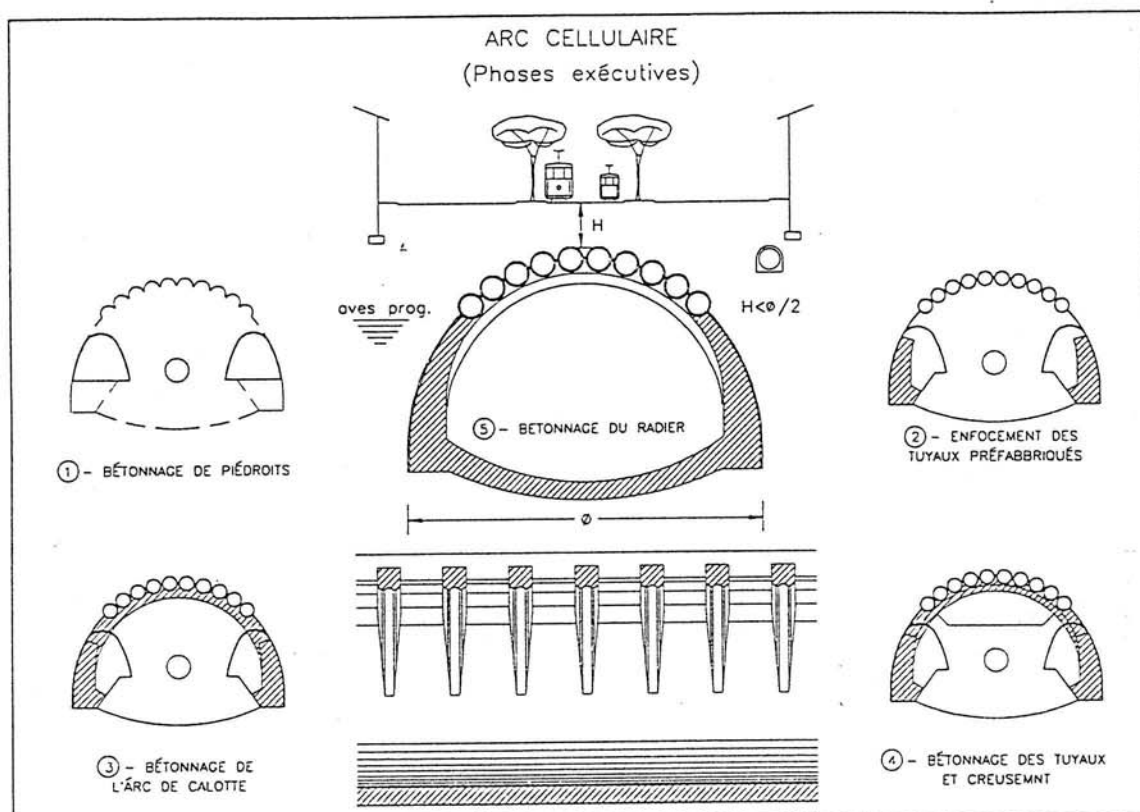


Fig. 19: phases exécutives de l'"Arc cellulaire".

La réalisation pratique de l'"Arc cellulaire" se fait à travers neuf phases principales (fig. 19):

- a) des pré-renforcements systématiques du terrain sont faits - à partir d'un tunnel de service pratiqué dans l'axe du tunnel final - sur le contour des tunnels futurs de piédroit et éventuellement le long de l'arc de voûte. Il y a lieu de noter que le pré-renforcement au niveau de la calotte du tunnel a pour but de conférer une légère cohésion au terrain et qu'elle peut ne pas être effectuée dans bon nombre de cas de matériaux
- b) excavation des tunnels de piédroit
- c) préparation des chambres de poussée pour la mise en place (selon la méthode du pousse-tube) d'une série de tubes en béton armé placés côte à côte, au niveau du profil de calotte du futur tunnel dans un chantier totalement indépendant du chantier inférieur des tunnels de piédroit
- d) réalisation des microtunnels de calotte
- e) excavation - à travers les microtunnels - des coffrages (dont les parois sont constituées par le terrain même) pour la coulée des arcs de liaison en béton armé. Le marin du matériau de fait à travers les tunnels latéraux
- f) coulée des piédroits du tunnel final
- g) armature et remplissage des microtunnels longitudinaux de calotte et des voûtes transversales de liaison avec du béton

- h) excavation du terrain à l'intérieur de la section finale du tunnel sous la protection de l'"Arc cellulaire" déjà pratiquement active
- i) la coulée du radier

La caractéristique qui rend cette technique avantageuse par rapport aux méthodes traditionnelles pour ne pas dire irremplaçable lorsque les dimensions de l'ouvrage sont particulièrement importantes est la manière dont s'effectue le passage de la condition d'équilibre initial du terrain non perturbé à la condition d'équilibre final une fois le tunnel achevé.

Les systèmes d'avancement traditionnels reposent sur l'effet tridimensionnel du front qui contribue d'une manière déterminante à l'équilibre de la cavité à court terme. Au cas où - en fonction de la nature des terrains et des états de tension induits par l'excavation - le noyau de terrain au niveau du front se révélerait déformable, les déformations qui en dérivent et qui s'amorcent dans le massif avant l'arrivée du front lui-même doivent être acceptées par le projeteur à moins de recourir à des interventions considérables et coûteuses de pré-renforcement lancées en avancement.

Dans le cas des tunnels de grande lumière, l'importance de ces déformations peut être considérable. Dans le cas des tunnels en ville, elles se traduisent par des affaissements inacceptables en surface.

En revanche, l'"Arc cellulaire" renonce à la contribution statique du front. Elle permet donc de minimiser voire annuler ce type de déformations et de réaliser des excavations corticales sans cela impossibles, ayant une lumière à trou aveugle (même de 60 m de diamètre!) sans provoquer des affaissements appréciables en surface.

Empêcher les phénomènes de déformation dans certains types de matériaux peut entraîner des avantages considérables y compris en ce qui concerne les poussées sur le revêtement. Dans les tunnels réalisés selon les méthodes traditionnelles, à plus forte raison si les terrains sont mauvais et altérables, la décompression progressive du matériau - qui se produit généralement sur le contour de la cavité - aboutit effectivement à des plasticisations qui se traduisent inévitablement par des déformations et par conséquent par des poussées importantes qui surviennent plus tard sur les ouvrages de revêtement.

L'"Arc cellulaire" opère un confinement continu du terrain sur le contour de la cavité avec des valeurs de σ_3 relativement limitées et dans tous les cas capables de conserver l'élasticité du terrain environnant. Elle permet donc de minimiser l'importance de ces poussées et en définitive de conserver presque inchangés les équilibres préexistants.

5.1 Applications

La construction de la transversale ferroviaire - Collegamento Ferroviario Passante - est en cours de construction à Milan. Cette transversale unira les lignes ferroviaires existantes du secteur nord-ouest aux lignes du secteur sud-est et permettra de mettre en place un service de transport régional, inter-régional et urbain.

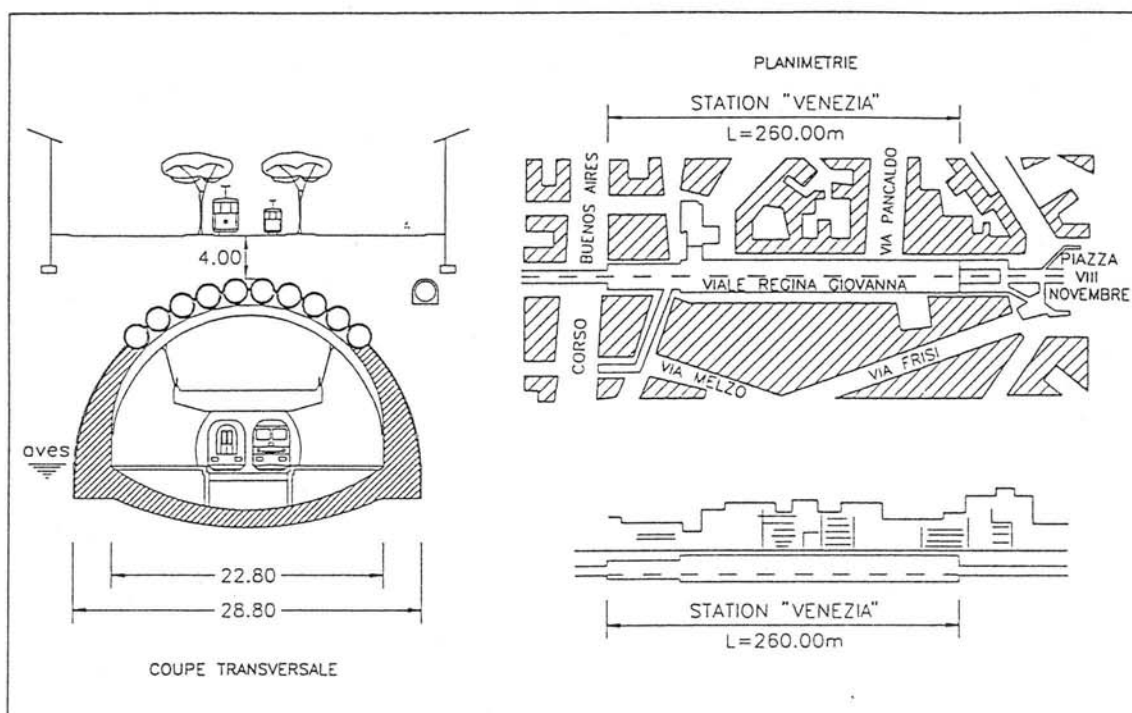
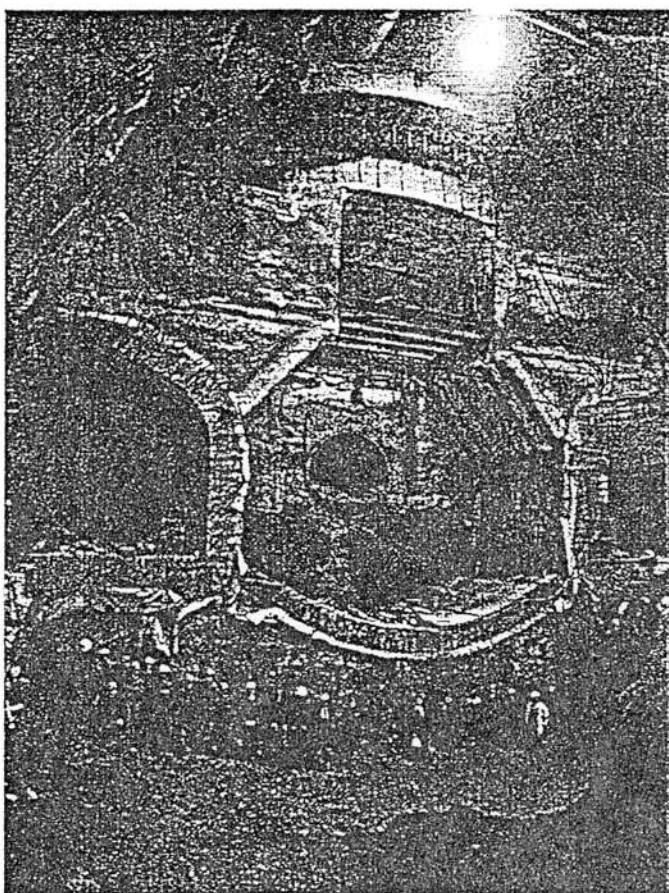


Fig. 20: station "Venezia": section transversal, planimétrie e profil longitudinal.

Le projet - réalisé par Rocksoil S.p.A. pour Metropolitana Milanese Strutture ed Infrastrutture del Territorio S.p.A. - chargée de l'ouvrage par la Ville de Milan et par la Région Lombarde - prévoyait la construction entre autres choses de la station "Venezia" qui constitue - en plein centre commercial de la ville - un échangeur avec la Ligne 1 du Métro.

Le tunnel - lumière nette 22,80 m, longueur 250 m, sous 4 m seulement de recouvrement, en terrain incohérent et sous nappe - devait être réalisé à trou aveugle car il est impossible d'interrompre le trafic dans une artère si importante du centre de la ville (fig. 20).

L'impossibilité de réaliser la cavité selon les méthodes traditionnelles - autrement dit par excavation à échantillons



"Arc cellulaire"
Station "Venezia"

avec pré-renforcement du terrain en plusieurs phases sur le contour des excavations - se révéla immédiatement à travers la simulation numérique qui montra la formation d'amples zones de rupture du terrain au moment de l'excavation de la calotte et des déformations résolument supérieures aux déformations admissibles.

Il a donc inévitablement fallu étudier et mettre au point une technique de construction nouvelle, jamais expérimentée auparavant, ni en Italie ni à l'étranger, permettant d'exécuter un ouvrage aussi hardi. Ce fut la naissance de l'idée de l'"Arc cellulaire".

A l'heure actuelle, la station Venezia est sur le point d'être finie. Sa réalisation a exigé plus ou moins trois années de travail y compris les ouvrages internes dont une mezzanine de 10 m de largeur, accrochée à la voûte, ayant pour fonction d'accueillir les passagers qui entrent et qui sortent. La construction de la station a comporté un grand nombre de contrôles et de mesures pour sauvegarder les édifices anciens qui se trouvent au-dessus ainsi que les sous-services préexistants. L'analyse des données collectées révèle que les déplacements maximum qui se sont produits dans le terrain environnant n'ont jamais dépassé les quelques millimètres.

6. Jet-grouting vertical

L'application de la technologie du jet-grouting vertical unie au jet-grouting sub-horizontale permet de résoudre brillamment - avec des avantages remarquables du point de vue de l'esthétique et de l'environnement - les problèmes d'entrée des tunnels dans des terrains incohérents ou semi-cohérents. Il devient possible d'attaquer le tunnel naturel avec des recouvrements extrêmement réduites (inférieures à deux mètres), de minimiser les volumes d'excavation et de réduire le risque de destabiliser le versant [3] [8].

Le système conçu par l'auteur en 1983 consiste à réaliser, avant de procéder à l'excavation de terrassement, une paroi à plan arqué de colonnes sub-verticales de terrain traité qui englobe planimétriquement la section de tunnel artificiel (fig. 21).

L'intensité et la distribution du traitement sont établies au fur et à mesure en fonction du contexte opérationnel et géotechnique.

Une poutre supérieure en béton armé emboîte le sommet des colonnes ce qui a pour effet de renforcer la structure et de favoriser la collaboration entre les différents éléments.

Une fois le terrassement de la surface d'entrée fait, l'intervention est complétée par:

- la coulée d'un revêtement en spritz-béton sur toute la surface exposée de la paroi
- la mise en place de tubes drainants sub-horizontaux à travers le matériau consolidé pour prévenir la formation de pression d'eau importante à l'arrière

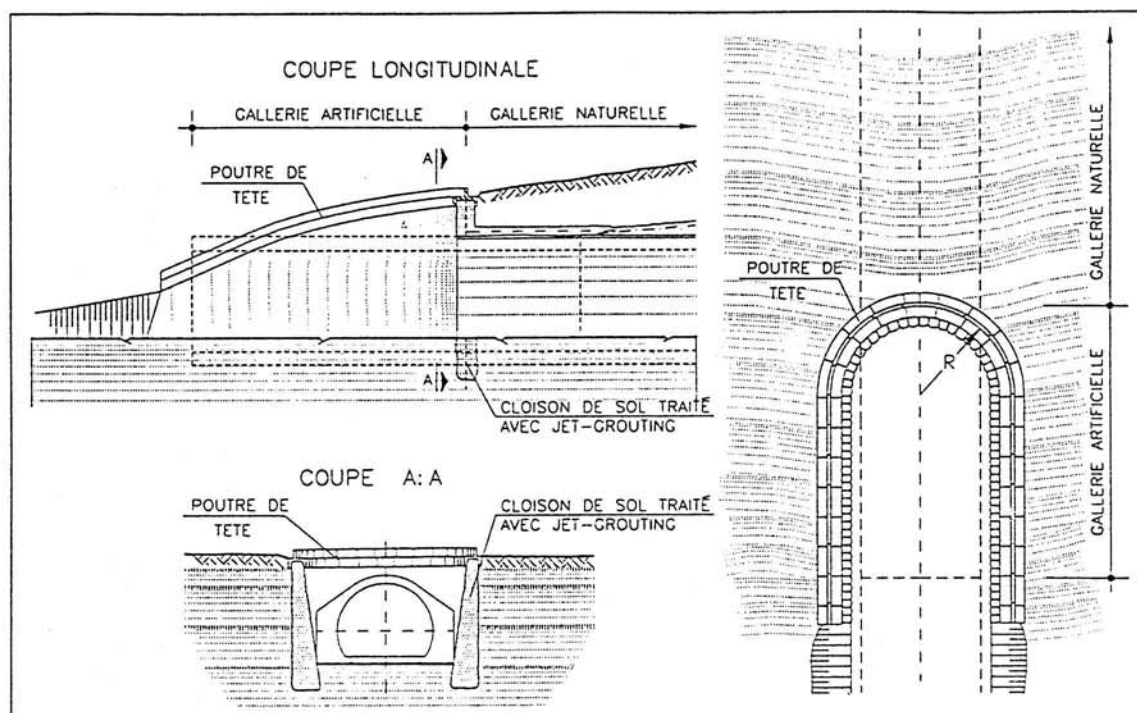


Fig. 21: exemple d'entrée par jet-grouting vertical.

La structure ainsi constituée - à travers des arcs sub-horizontaux - est soumise à des états de contrainte principalement au niveau de compression et de découpage.

Nous l'avons déjà dit, la réalisation de carapaces de ce type est strictement liée à la phase suivante de l'exécution à savoir l'attaque du tunnel conformément au système jet-grouting sub-horizontale. Du fait que ce dernier n'exige que de très petites recouvrements, il devient possible de commencer l'excavation du tunnel naturel avec des valeurs très réduites de recouvrement.

6.1 Applications

La première application de la méthode a lieu en 1985, pour l'entrée T1, côté Pontebba, du tunnel "S. Leopoldo" sur la ligne de chemin de fer Pontebba - Tarvisio.

Au niveau de la conception, le problème était représenté par la présence simultanée - presque à la hauteur de l'attaque du tunnel - du remblai de l'autoroute Carnia-Tarvisio au-dessous de laquelle devait passer le tunnel et de la culée du viaduc autoroutier qui imposaient d'avancer sans produire des déformations de terrain (fig. 22).

Vu que la chose se présentait impossible avec les techniques traditionnelles, il fut décidé de recourir à la technologie jet-grouting.

L'étude statique menée dès le début avec le support d'un ordinateur sur un modèle aux éléments finis a confirmé la faisabilité de l'intervention et fourni des indications utiles pour la mise au point finale du projet en vue d'obtenir une structure chargée par des actions prédominantes de compression.

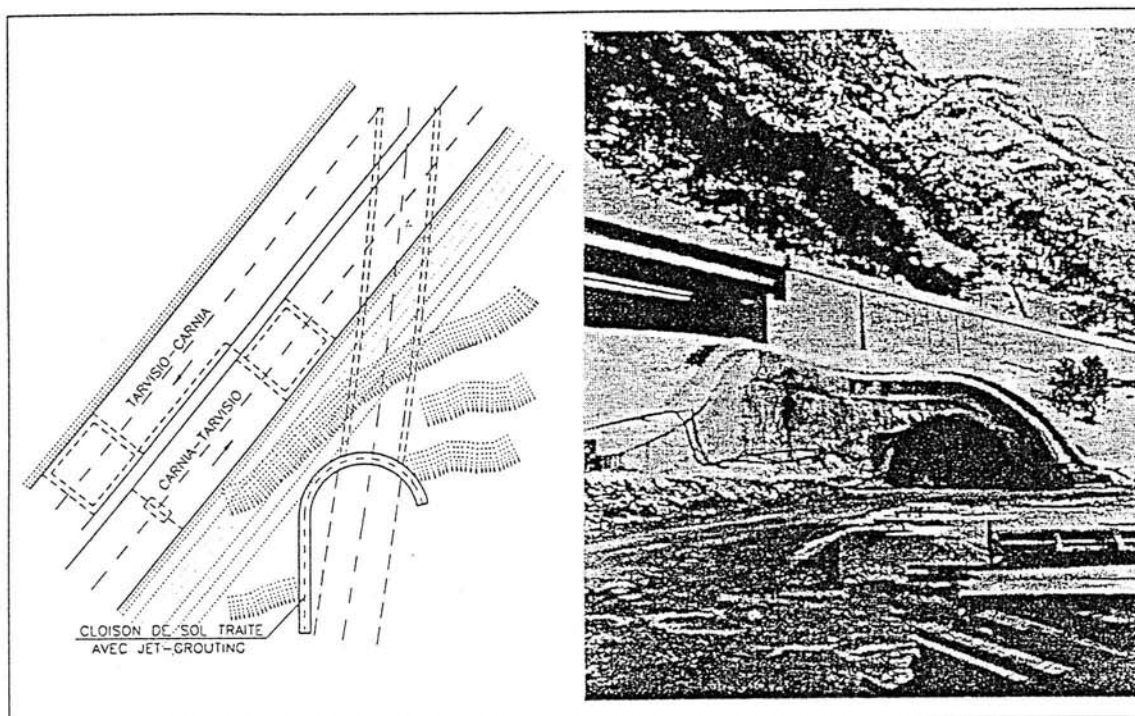


Fig. 22: entrée T1 du tunnel S. Leopoldo.

Il fut décidé en fin de compte, de réaliser la carapace avec une triple série de colonnes jet-grouting pratiquées sub-verticalement, selon la géométrie présentée à la fig. 22, et de recourir par la suite au système jet-grouting horizontal pour l'attaque et l'avancement du tunnel. Il fut ainsi possible de commencer l'excavation en naturel sous deux mètres de recouvrement seulement.

Les travaux furent effectués sans difficultés particulières et sans inconvénients ni pour le remblai de l'autoroute, ni pour la culée du viaduc.

Le succès remporté fut un véritable feu vert pour de nouvelles applications du même type réalisées en grand nombre, dans des terrains de différentes natures. Les figures 23a et 23b présentent rapidement les plus significatives de ces applications.

7. Conclusions

Les interventions en conservation mises au point les dix dernières années par Rocksoil S.p.A. trouvent de très vastes applications dans le domaine des ouvrages en souterrain notamment parce que pour la première fois elles permettent d'affronter l'excavation même dans des terrains plus difficiles, avec les mêmes productions et avec la même sécurité que dans le cas des tunnels creusés dans des terrains ayant une bonne consistance.

Les expériences menées et les résultats obtenus en matière de sécurité opérationnelle et de respect des délais et des coûts programmés sur plus de 40 km de tunnels (fig. 24a et 24b) montrent qu'investir sur le front de taille équivaut à une économie en présence de terrains pour lesquels la plupart des déformations remontent au noyau d'avancement

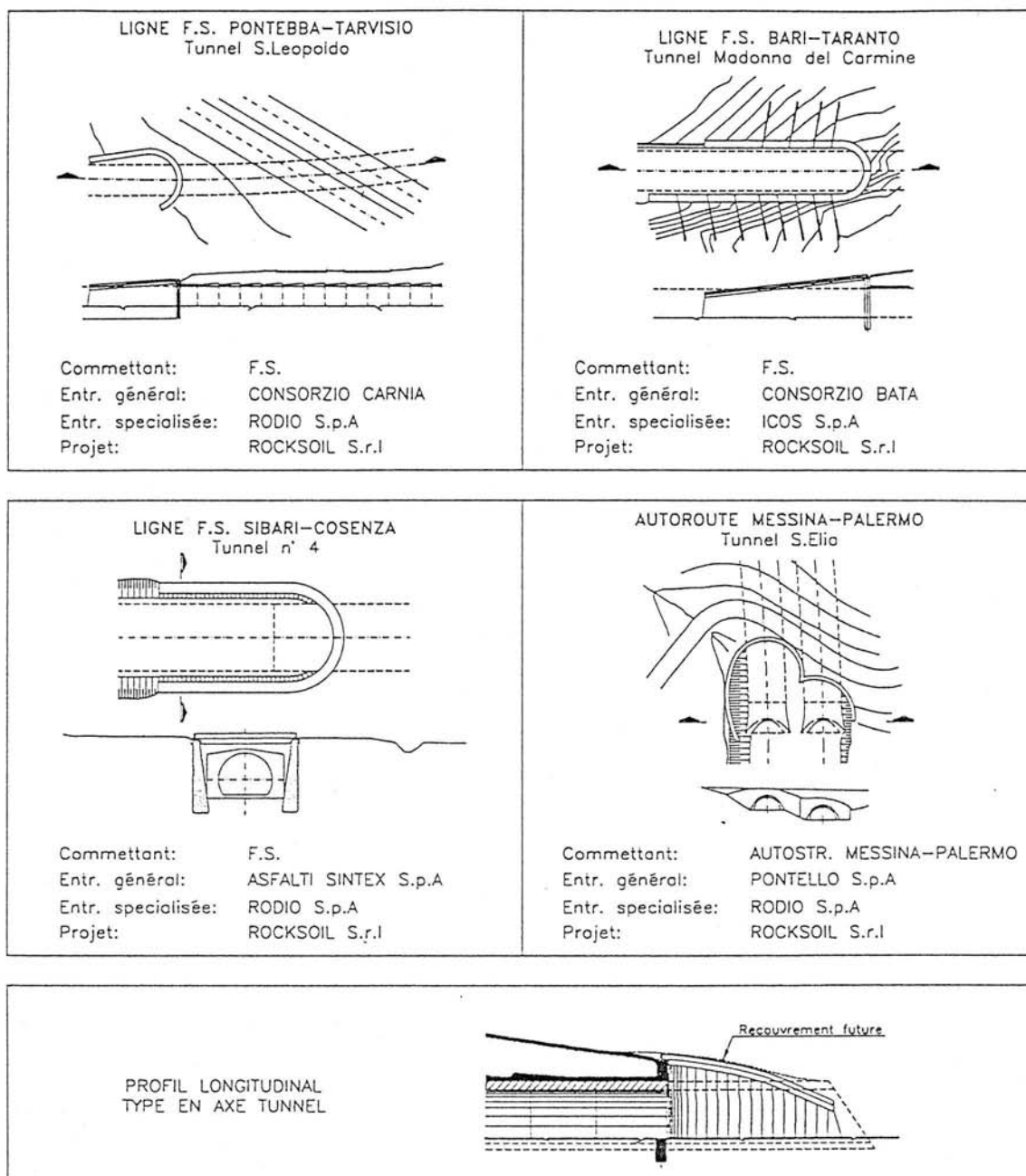


Fig. 23a

et se répercutent par la suite sur la stabilité et la tenue du périmètre de la cavité.

Aujourd'hui, l'introduction des interventions en conservation met à notre portée les instruments de construction nécessaires pour opérer avec succès et efficacité quel que soit le terrain. Il nous est enfin possible de planifier les constructions en souterrain tout comme nous l'avons fait depuis de longues années déjà avec les constructions en surface.

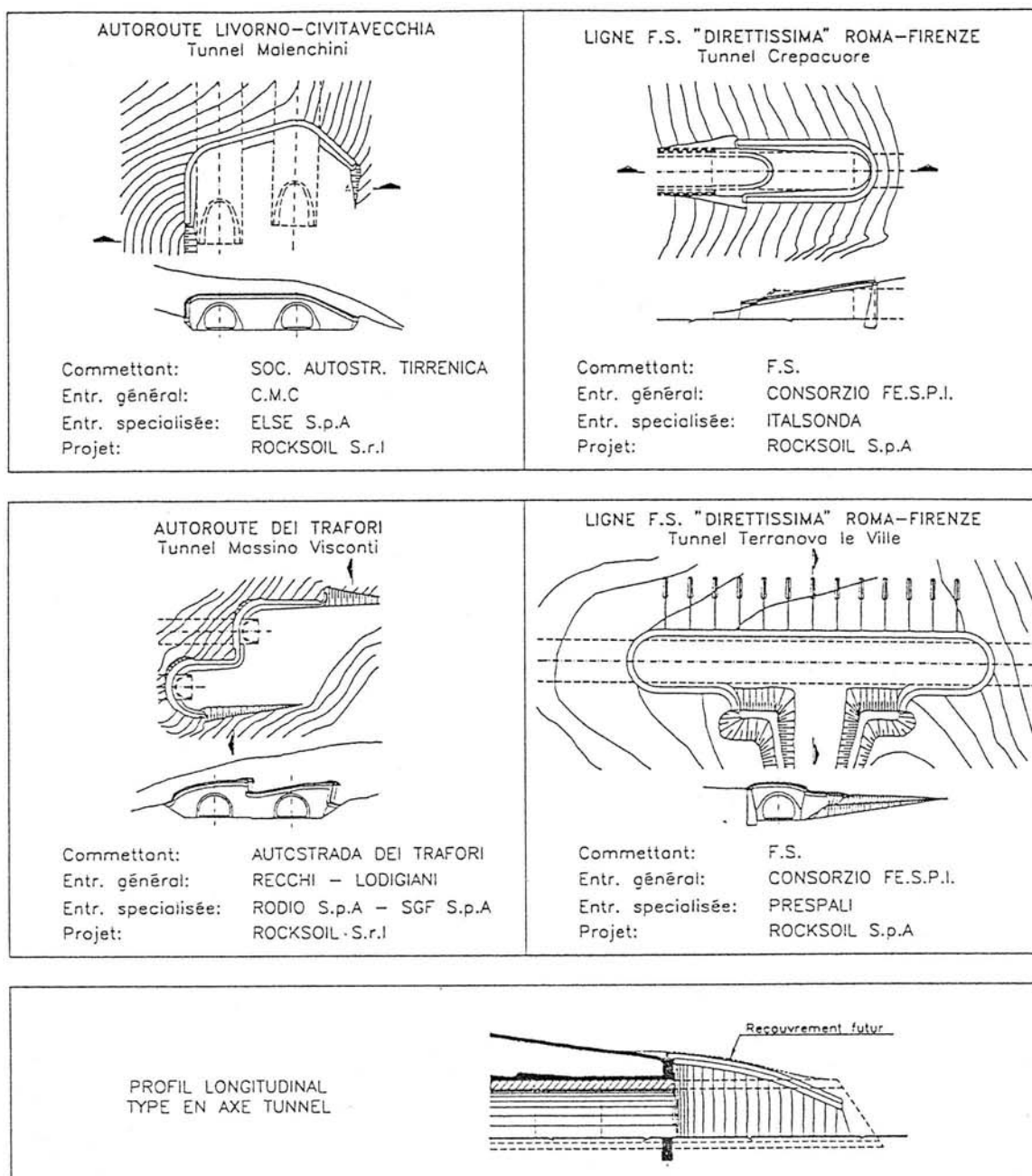


Fig. 23b

Bibliographie

[1] LUNARDI P., BINDI R., FOCARACCI A., 1989 - Nouvelles orientations pour le project 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. Colloquio Internazionale "Tunnels et micro-tunnels en terrain meuble", Parigi, 7-10 Febbraio 1989

[2] FOCARACCI A., 1991 - Interventi conservativi: aspetti riguardanti l'impresa specializzata. Conferenza Internazionale su "Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo", Milano, 18-20 Marzo 1991, II: 531,545

[3] LUNARDI P., 1992 - Il consolidamento del terreno mediante jet-grouting. Quarry and Construction, N. 3

[4] ARSENA F.P., FOCARACCI A., LUNARDI P., VOLPE A., 1991 - La prima applicazione in Italia del pretaglio meccanico. Conferenza Internazionale su "Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo", Milano, 18-20 Marzo 1991, II: 549, 556

[5] LUNARDI P., 1991 - Aspetti progettuali e costruttivi nella realizzazione di gallerie in situazioni difficili: interventi di precontenimento del cavo. Conferenza Internazionale su "Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo", Milano, 18-20 Marzo 1991, II: 567, 580

[6] LUNARDI P., FOCARACCI A., GIORGI P., PAPACELLA A., 1992 - Tunnel face reinforcement in soft ground design and controls during excavation. Congresso Internazionale su "Towards New Worlds in Tunnelling", Acapulco, 16-20 Maggio 1992, II: 897, 908

[7] LUNARDI P., 1990 - Un nouveau systeme constructif pour la realisation de tunnel de grande portee dans terrains non coherents: l'"Arc Cellulaire". Colloquio Internazionale "Les fondations des grands ouvrages", Parigi, I: 227, 237

[8] LUNARDI P., 1991 - L'impiego del jet-grouting per l'attacco di gallerie in terreni soffici. Conferenza Internazionale su "Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo", Milano, 18-20 Marzo 1991, II: 227, 234

[9] LUNARDI P., 1993 - Nuovi criteri di progetto e costruzione per una corretta pianificazione delle opere in sotterraneo, Atti del Convegno "La realizzazione delle grandi opere in sotterraneo" - Verona, 27-28 Maggio 1993

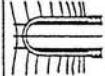
ANNÉE	COMMETTANT	TRAVAIL	Ø [m]	 L [m]	 L [m]	 L [m]	 L [m]	 N
1983	F.S.	UDINE-TARVISIO Tunnel Campiolo	12	170				
1984	F.S.	UDINE-TARVISIO Tunnel M. Palis	12	200				
1984	F.S.	PAOLA-COSENZA Tunnel Santomarco	7	150				
1984	F.S.	COMO-CHIASO Tunnel M. Olimpino	12	800				
1985	F.S.	UDINE-TARVISIO Tunnel S.Leopoldo	12	50				1
1985	ANAS	MESSINA-PALERMO Tunnel S.Elia	15	150x2				1
1985	F.S.	SIBARI-COSENZA Tunnel 1,2,3,4	10	1300	2300	2300		
1986	F.S.	BARI-TARANTO Tunn. Madonna del Carm.	12	200				2
1986	F.S.	BARI-TARANTO Tunnel S.Francesco	12	100				2
1986	F.S.	UDINE-TARVISIO Tunnel Malborghetto	12	150				1
1987	Comune Campinas	Sottopasso scalo ferroviario	14	300x2				2
1987	F.S.	UDINE-TARVISIO Tunnel Camporosso	12	650				2
1987	F.S.	UDINE-TARVISIO Tunnel S.Rocco	12	600				
1988	ANAS	AUT. DEI TRAFORI Tunnel Valsesia	15	600				
1988	ANAS	S.S. 42 Tunnel Lovere	11	200				
1988	MM	PASSANTE FERR. MILANO Stazione Venezia	30				250	
1988	F.S.	DIRETT. ROMA-FIRENZE Tunn. Talleto e Caprenne	8	2500	2800	2800		4
1988	F.S.	DIRETT. ROMA-FIRENZE Tunnel Tasso	12	150		1650		2
1988	F.S.	DIRETT. ROMA-FIRENZE Tunn. Terranova le Ville	12	200	1800	2200		3
1988	F.S.	DIRETT. ROMA-FIRENZE Tunnel Poggio Orlandi	13	250		600		2
1988	F.S.	DIRETT. ROMA-FIRENZE Tunnel Crepacuore	13	60		120		2
1989	ANAS	TANGENZ. CATANZARO Tunnel S.Giovanni	12		400	400		2
1989	ANAS	S.S. 42 Tunn. Costa Volpino	11			200		1
1989	Acqued. Pugliese	Acquedotto di Ofonto	5			200		3
1989	F.S.	TARGIA-SIRACUSA Tunnel di Siracusa	12		1000	1000		
1989	R.A.V.	AUT. AOSTA-M. BIANCO Tunnel Villeneuve	12	275x2				2

Fig. 24a: projects réalisées par Rocksoil S.p.A de Milan.

ANNÉE	COMMETTANT	TRAVAIL	Ø [m]	 L [m]	 L [m]	 L [m]	 L [m]	 N
1989	R.A.V.	AUT. AOSTA-M. BIANCO Tunnel Aise	12	290x2				4
1989	F.S.	UDINE-TARVISIO Tunnel Tarvisio	16	1000				1
1989	SAT	AUT. LIVORNO-CIVITAV. Tunnel Malenchini	12	900x2				2
1989	SAT	AUT. LIVORNO-CIVITAV. Tunnel Rimazzano	12	900x2		900x2		2
1990	Comune di Roma	Sottopasso via Cristoforo Colombo	12,5	150				
1990	ANAS	S.S. 1 Tunnel Montenero	11	150x2		2350x2		2
1990	LAURO	S.S. 38 Tunn. Valmagg. Bolladore	12	150				4
1990	COGEFAR	S.S. 38 Tunnel Mondadizza	12	60				1
1990	CARIBONI	S.S. 38 Tunn. Le Prese e Verzedo	12	100				2
1990	LODIGIANI	S.S. 38 Tunnel San Antonio	12	40				2
1990	TECNO_ SVILUPPO	S.S. 38 Tunnel Tolo	12	80				2
1990	SECOL	S.S. 38 Tunnel Cepina	12	70				1
1990	R.A.V.	AUT. AOSTA-M. BIANCO Tunnel Leverogne	12	270x2				2
1990	R.A.V.	AUT. AOSTA-M. BIANCO Tunnel Villerot	12	240x2				4
1990	R.A.V.	AUT. AOSTA-M. BIANCO Tunnel Les Crêtes	12	450x2				2
1990	MM	MILANO Sottop. tangenziale Est	11	70				2
1991	ANAS	S.S. 510 Lotti 5,6,7	11	900		400		15
1991	ANAS	S.S. 237 Tunnel Sabbio	11	300				3
1991	F.S.	CASERTA-FOGGIA Tunnel S.Vitale	12		300	1300		
1991	ANAS	S.S. 62 Tunnel M. Barro	11	100x2				1
1991	PIZZA_ ROTTI	S.S. 470 Tunnel Lenna	12	30				
1992	ANAS	E 45 Tunnel Quarto	11	100x2		200x2		3
1993	F.S.	ANCONA-BARI Tunnel Vasto	10	1270	1850	4970		
1993	F.S.	FIRENZE-EMPOLI Tunnel S.Vito	12	130		200		1
1993	F.S.	FIRENZE-EMPOLI Tunnel Bellosguardo	12	125		360		2
1993	ANAS	S.S. 106 Tunnel Lofiri	11	90x2		90x2		2
1993	INTER_ METRO	METROPOLITANA DI ROMA Staz. Baldo degli Ubaldi	21		120	120		

Fig. 24b: projects réalisées par Rocksoil S.p.A de Milan.