

P. LUNARDI
Milan

Conception et exécution des tunnels d'après l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les sols

Présoutènement et préconfinement

Résumé

Cet article a pour but d'illustrer d'une manière succincte une approche innovante de conception et de construction d'ouvrages souterrains. Elle est le résultat de plus de vingt-cinq années de recherche scientifique menée sur plus de 250 km de tunnels réalisés dans les conditions les plus diverses de contrainte et de déformation. A l'appui des succès nombreux et convaincants remportés sur le terrain, cette approche s'impose à l'attention des constructeurs.

On traite d'abord de l'évolution du concept de présoutènement et de préconfinement de la cavité avant d'analyser les limites des méthodes de conception et de construction adoptées jusqu'ici, pour passer ensuite à la définition des quatre conditions fondamentales auxquelles doit obligatoirement répondre une approche pour être vraiment et universellement valable.

Presupport and preconfinement

Abstract

The aim of this article is to briefly illustrate an innovative approach to the design and construction of underground works. The approach is the result of over twenty-five years of scientific research conducted on more than 250 km of tunnel under widely differing stress-strain conditions. The numerous and convincing successes achieved in the field is naturally attracting the attention of operators in the sector.

The article first discusses the evolution of the concept of presupport and preconfinement of a cavity and then examines the limits of design and construction methods employed until now. A definition is then given of the four fundamental and absolutely necessary requirements that must be satisfied if an approach is to be genuinely considered as universally valid.

Remarques préliminaires

Il est bien connu qu'au cours de la réalisation d'un tunnel, les contraintes préexistantes dans le massif sont déviées par l'ouverture de la cavité. Sur le contour se créent des zones de surcontrainte au niveau des parois de l'excavation. La *canalisation du flux des contraintes* sur le contour de l'excavation est à l'origine de l'« effet de voûte », et c'est justement grâce à l'amorce de ce phénomène qu'il est possible d'obtenir des espaces vides dans le sous-sol et de garantir leur tenue et leur durée.

L'« effet de voûte » est fonction de l'importance des états de contrainte et des caractéristiques de résistance et de déformabilité du terrain (Fig. 1). Il peut :

- 1) se produire à proximité du profil d'excavation ;
- 2) se produire loin du profil d'excavation ;
- 3) ou ne pas se produire du tout.

Le premier cas a lieu lorsque le terrain sur le contour de la cavité supporte bien le flux des contraintes déviées et répond élastiquement en termes de résistance et de déformabilité.

Le second cas se produit lorsque le terrain sur le contour de la cavité n'est pas en mesure de supporter les contraintes déviées et répond de manière inélastique en se plastifiant et la déformation est proportionnelle au volume de terrain impliqué par le phénomène de plastification. Ce dernier – qui provoque par ailleurs des augmentations de volume du terrain intéressé dans la mesure où il se propage radicalement – rejette les contraintes vers l'intérieur du massif tant que l'état de contrainte de type triaxial est compatible avec les caractéristiques de résistance du terrain.

Dans cette situation, l'« effet de voûte » se forme loin des parois de l'excavation et le terrain sur le contour, désormais altéré, ne pourra collaborer à l'équilibre final de la cavité que par sa résistance résiduelle et cela donne lieu à des phénomènes de déformation très importants (convergences, etc.).

Le troisième cas se produit lorsque le terrain sur le contour de la cavité n'est absolument pas en mesure de supporter les contraintes déviées, un champ de rupture apparaît et l'écroulement de la cavité se produit.

Dans l'analyse de ces trois cas, nous observerons que :

- l'effet voûte *par la voie naturelle* ne se produit que dans le premier cas ;
- dans le second cas, l'effet voûte ne se produit que si le terrain est « aidé » par des interventions de stabilisation ;
- dans le troisième cas, l'effet de voûte ne peut pas se produire par la voie naturelle, il devra l'être *par voie artificielle* au moyen d'interventions adéquates dans le terrain même, avant d'excaver.

Le projeteur du tunnel, dont l'objectif premier est d'étudier *si* l'effet de voûte peut s'amorcer au moment de l'excavation et *comment* il le fera, devra – d'abord vérifier si en aidant le terrain, il pourra ramener le second et le troisième cas au premier – puis il devra décider une fois pour toutes et sans équivoque s'il concevra le projet selon la *philosophie du soutènement* ou selon la *philosophie du confinement* de la cavité, ce qui n'est autre au fond que la définition de l'aide que le

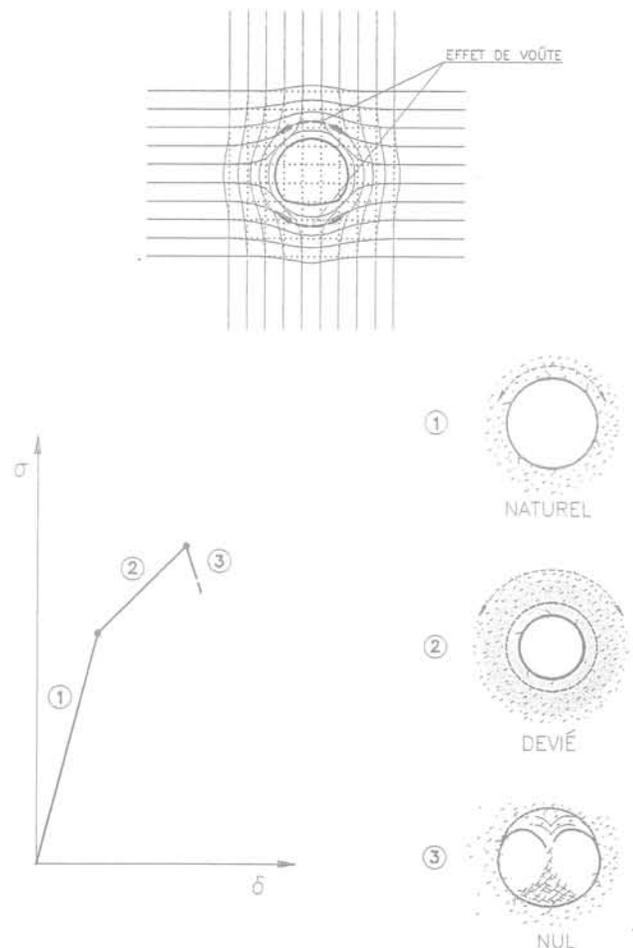


FIG. 1 L'« effet de voûte » peut se produire : 1) à proximité du profil d'excavation ; 2) loin du profil d'excavation ; 3) ou ne pas se produire du tout.

An « arch effect » can be produced : 1) near the profile of the excavation ; 2) far from the profile of the excavation ; 3) not at all.

projeteur entend apporter au terrain pour le contrôle de l'effet voûte.

Si nous analysons ce que nous entendons par soutenir et donc par présoutènement et ce que nous entendons par confiner et donc par préconfinement, nous comprenons immédiatement quelle est l'approche conceptuelle la plus appropriée (Fig. 2).

Si le projeteur décide de maintenir l'excavation par des interventions de soutènement, il devra être bien conscient que :

- soutenant le terrain, il accomplit une action passive ;
- il accepte la détente du massif et que sa réponse en déformation évolue pratiquement d'une manière incontrôlée permettant à l'effet de voûte de s'éloigner irrémédiablement du profil d'excavation ;
- ainsi faisant, il résout le problème de la stabilité de la cavité qu'il entend obtenir dans le sous-sol, selon des critères hérités de l'ingénierie minière qui, ayant des objectifs différents de l'ingénierie des tunnels, ne se préoccupe naturellement pas de retenir le massif sur le contour, de réduire le plus possible la réponse en déformation afin de respecter le profil théorique de l'excavation, de protéger l'intégrité géomécanique du

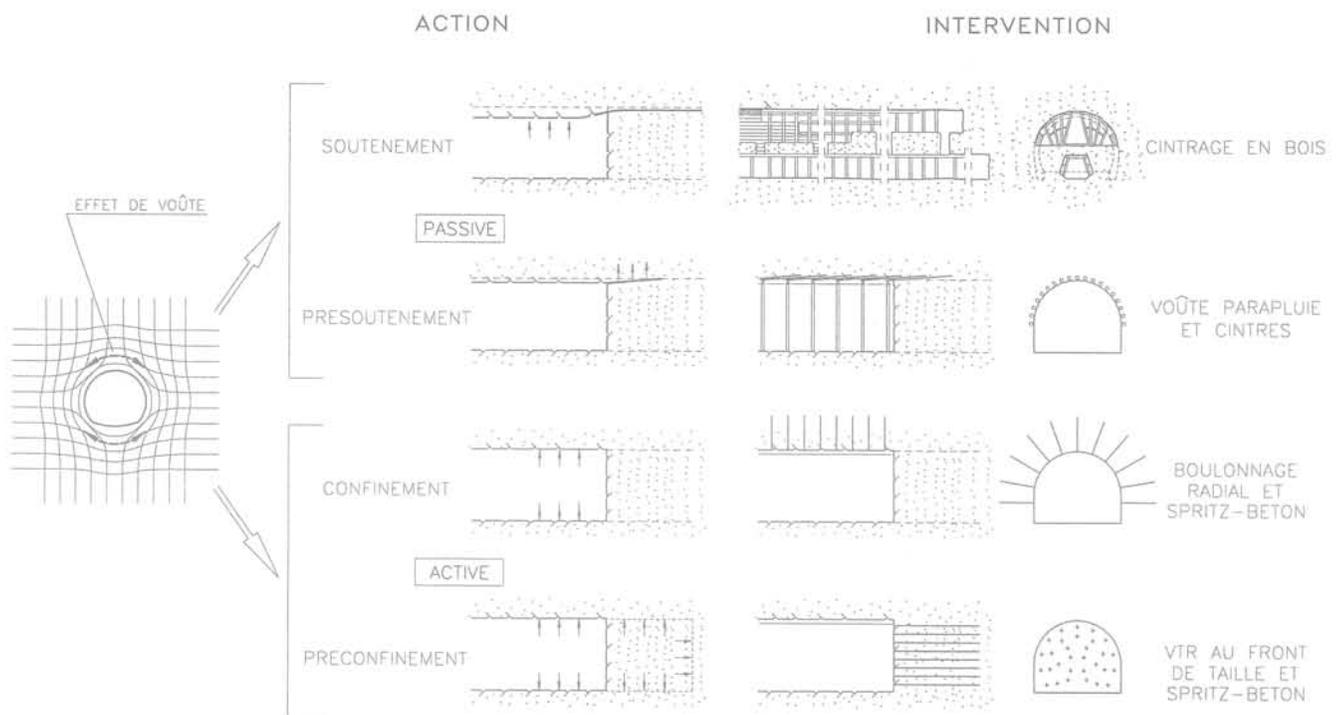


FIG. 2 Soutenant le terrain, on accomplit une action passive, confinant le terrain, on produit une action active. Supporting the ground constitutes a passive action, confinement of the ground produces an active action.

terrain et de garantir la tenue dans le temps de la cavité projetée.

Si le projeteur décide en revanche de maintenir l'excavation par des « interventions de confinement », il doit savoir que :

- confinant le terrain, il produit une action active ;
- confinant le terrain, il contrôle la détente du massif et la réponse en déformation qui s'ensuit ;
- conservant et améliorant les caractéristiques du terrain, celui-ci peut collaborer efficacement à l'équilibre final de la cavité, ce qui valorise le terrain en tant que matériau de construction et assure la formation de l'effet de voûte pas trop loin du profil d'excavation ;
- il ne pourra recourir à des « interventions de soutien » qu'en cas d'urgence pour limiter les dommages consécutifs à une erreur de conception ou de construction.

Il se dégage de ces considérations que, si un projeteur de tunnels veut concevoir et réaliser correctement un ouvrage souterrain, il ne doit prendre en considération que les « aides » au terrain (interventions de consolidation, etc.) qui produisent des effets de voûte, et n'a donc d'autre choix que la « philosophie du confinement », effaçant de son vocabulaire le mot de « soutenir » et tous ses dérivés, tels que « soutènement » ou « présoutènement ».

Même le terme de « présoutènement » – adopté pour indiquer des actions produites en amont du front de taille, pour les différencier des « soutènements » effectués en aval – est un héritage de la tradition minière et n'est autre que ce que nous appelons aujourd'hui les « tubes préforés » ou la « voûte parapluie ». Celle-ci, nous le savons bien, même constituée d'éléments structurels s'appuyant sur des cintres mis sur le chantier après l'excavation et disposés le long d'une génératrice circulaire, n'est pas à même de pro-

duire des effets de voûte à l'avancement, du fait d'une collaboration transversale réciproque insuffisante.

En matière de projets et de construction de tunnels, il faudra parler de *confinement*, terme qui se prête mieux au concept d'action active, capable de produire et de contrôler les effets de voûte au contour de la cavité, comme celle présentée par Kastner au cours des années 50, puis réalisée par Rabcewicz dans les années 60 grâce à l'introduction de nouvelles technologies et notamment du béton projeté, des cintres et des boulons.

De même, il faudra parler de *préconfinement* pour indiquer les actions actives qui produisent des effets de voûte par voie naturelle et par voie artificielle, en amont du front de taille.

Récemment, de nouvelles technologies d'avancement ont fait leur apparition dans le monde des tunnels. Elles sont capables de développer des actions de préconfinement qui remédient aux carences des technologies traditionnelles (injections, congélations, etc.) et elles permettent en définitive de réaliser, d'une part, des ouvrages souterrains dans n'importe quel type de terrain avec la même sécurité que pour la construction d'autres ouvrages de génie civil et, d'autre part, d'assurer le respect des cadences d'avancement, même dans des terrains difficiles, en d'autres termes d'industrialiser l'excavation.

La possibilité pour le projeteur de disposer de ce « nouvel instrument de préconfinement » en plus de l'instrument traditionnel du « confinement » ouvre une page nouvelle dans l'histoire des tunnels dans la mesure où elle permet d'envisager le problème du projet et de la construction avec les mêmes chances de réussite, indépendamment de la nature des terrains, tout en offrant la possibilité de mettre au point une

méthode de conception, de classification et de construction fiable qui s'applique à toutes les situations géologiques, géomécaniques et de contrainte. Une méthode qui permet enfin de planifier – au niveau des délais et des coûts – un tunnel au même titre que d'autres ouvrages de génie civil.

2

Le noyau d'avancement en tant qu'instrument de préconfinement et de stabilisation du tunnel

Ceux qui se préparent à concevoir et à construire un ouvrage souterrain doivent résoudre un problème de génie civil particulièrement complexe, cet ouvrage étant, par rapport à un ouvrage en surface, bien moins facile à déterminer quant à ses données essentielles. La construction d'un ouvrage souterrain se fait effectivement par enlèvement de matière au sein d'un milieu dont les caractéristiques ne sont pas faciles à évaluer, et qui est soumis dans la nature à des états de contrainte que les actions d'excavation et de construction modifient irréversiblement. La bonne réussite des travaux dépend du contrôle des réactions qui s'amorcent dans le milieu au cours de l'excavation.

Ainsi donc, tous ceux qui s'apprentent à concevoir et à construire un ouvrage souterrain ne peuvent pas se passer de connaître (Fig. 3) :

- le milieu à l'intérieur duquel ils opèrent ;
- l'action accomplie pour faire l'excavation ;
- la réaction attendue à la suite de l'excavation.

Le milieu qui est, dans la pratique, le matériau de construction du projecteur du tunnel, est un sujet assez anormal si on le compare aux matériaux traditionnels du génie civil : il est discontinu, hétérogène et anisotrope. Il présente, en surface, des caractéristiques assez variées, mais qui dépendent exclusivement de sa nature intrinsèque, de sa consistance naturelle (qui condi-

tionne la morphologie de la croûte terrestre), alors qu'en profondeur le milieu présente des caractéristiques changeantes, fonction notamment de l'importance des états de contrainte qui s'exercent sur lui (consistance acquise) et qui conditionnent son comportement à l'excavation.

L'action c'est l'avancement du front à l'intérieur du milieu. C'est donc un phénomène strictement cinématique : on peut imaginer l'avancement d'un tunnel comme un disque (le front de taille) qui se déplace à une certaine vitesse V à l'intérieur du massif en laissant un vide derrière lui. Il produit une perturbation dans le massif dans le sens longitudinal et dans le sens transversal, ce qui modifie les états de contraintes.

À l'intérieur de la zone perturbée, le champ de contraintes préexistant que l'on peut représenter comme un réseau de lignes de force, est dévié par la présence de l'excavation (Fig. 1) et se concentre à proximité, produisant des surtensions. L'importance de ces surcontraintes détermine, pour chacun des milieux, l'ampleur de la zone perturbée (à l'intérieur de laquelle le terrain subit une chute des caractéristiques géomécaniques et, par voie de conséquence, une augmentation de volume) et donc, en fonction de la résistance de massif σ_{qd} , le comportement de la cavité.

L'ampleur de la zone perturbée à proximité du front est définie par le rayon d'influence du front de taille R_f (Fig. 4), qui représente l'espace sur lequel le projecteur doit concentrer son attention. Pour une étude correcte du tunnel, il devra utiliser des méthodes de calcul tridimensionnelles et non seulement planes.

La réaction est la réponse en déformation du milieu à l'action de l'excavation. Elle se produit en amont du front dans la zone perturbée par les surtensions qui se sont produites dans le milieu sur le contour de la cavité et dépend du milieu (consistance) et des modalités selon lesquelles se fait l'avancement du front de taille (action).

La réponse en déformation du front et de la cavité détermine le mouvement du matériau vers le tunnel ou vers le profil théorique de l'excavation. Ce mouvement peut être synonyme d'instabilité des parois de l'excavation.

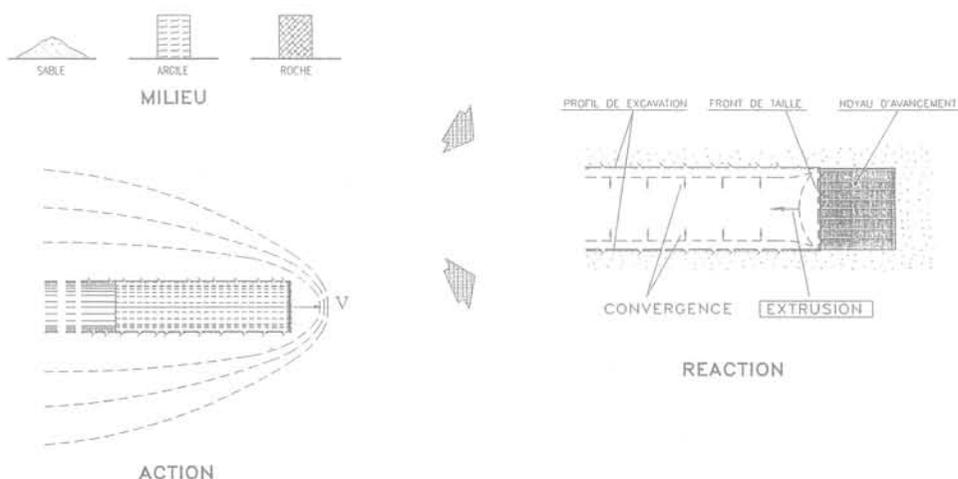


FIG. 3 Tous ceux qui s'apprentent à concevoir et à construire un ouvrage souterrain ne peuvent pas se passer de connaître : le milieu à l'intérieur duquel ils opèrent ; l'action accomplie pour faire l'excavation ; la réaction attendue à la suite de l'excavation.

Anyone who sets out to design and construct an underground opening cannot afford not to have a knowledge of : the medium in which he is operating ; the action carried out to effect excavation ; the reaction that then follows the excavation.

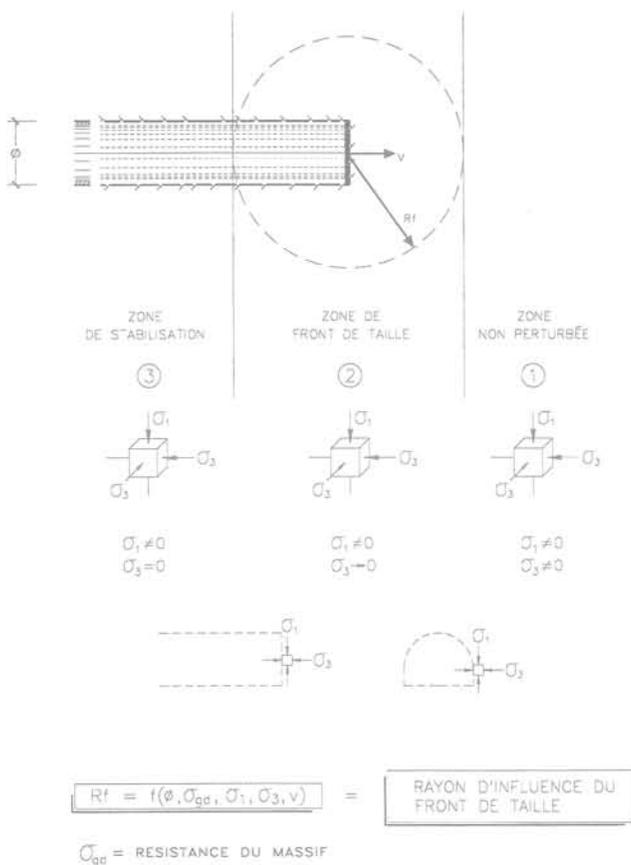


FIG. 4 L'ampleur de la zone perturbée à proximité du front est définie par le rayon d'influence du front de taille R_f .
 The extension of the disturbed zone around the tunnel face is defined as the radius of influence of the face R_f .

La réponse en déformation du front et de la cavité se traduit sous la forme (Fig. 5) :

- a) d'extrusion du front de taille ;
- b) de préconvergence (dans le sens de convergence du profil théorique en amont du front de taille) ;
- c) de convergence ;

qui peuvent à leur tour donner lieu à des manifestations d'instabilité (il est question d'instabilité toutes les fois que se produit l'intrusion de matériau dans le tunnel, au-delà du profil théorique d'excavation) :

- chutes de blocs sous l'effet du poids propre, écaillages et effondrement du front au niveau du front-noyau d'avancement ;
- chutes de blocs sous l'effet du poids propre, écaillage et effondrement de la cavité au niveau du contour de cette dernière.

Après avoir défini le *noyau d'avancement* comme le prisme de terrain en amont du front de taille, dont les dimensions transversale et longitudinale sont du même ordre de grandeur que le diamètre du tunnel (Fig. 6), il est permis d'affirmer, sur la base des expériences acquises pendant plus d'un quart de siècle de recherches menées au cours de la réalisation de 250 km de tunnels au moins, que toutes ces manifestations d'instabilité dépendent directement ou indirectement de la rigidité du noyau.

Il est possible de vérifier trois situations fondamentales (Fig. 6).

Si dans la phase d'avancement d'un tunnel, en passant d'un état de coaction de type triaxial à un état de type plan, l'annulation de l'état de coaction au front de taille ($\sigma_3 = 0$) produit sur le noyau des contraintes dans le domaine élastique, la paroi libérée (front de taille) se maintient stable avec des déformations limitées et

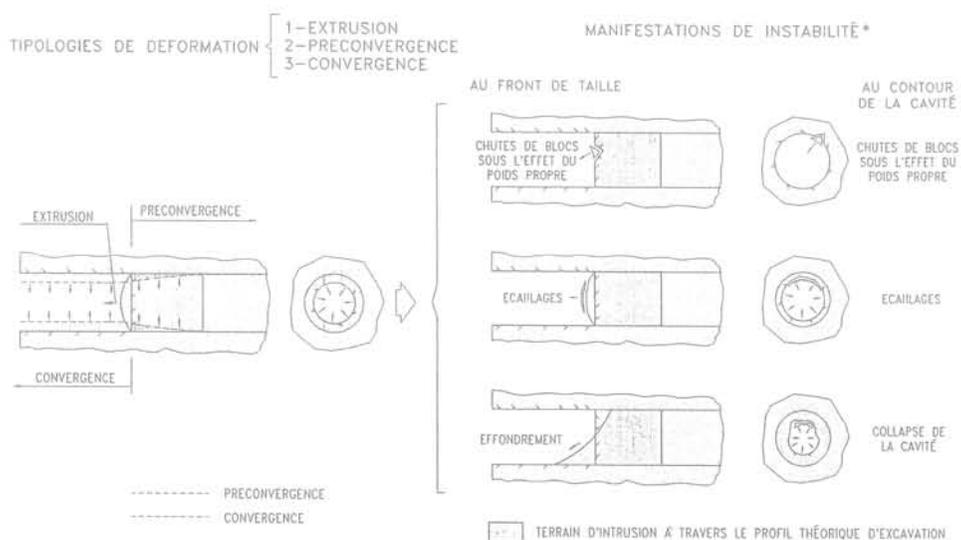


FIG. 5 La réponse en déformation du front et de la cavité se traduit sous la forme de : a) extrusion du front de taille ; b) préconvergence ; c) convergence ; qui peuvent à leur tour donner lieu à des manifestations d'instabilité.
 The deformation response of the face and of the cavity can « manifest » in the following forms : a) extrusion of the face ; b) préconvergence ; c) convergence ; which can in turn give rise to phenomena of instability.

L'ARRIVÉE DU FRONT DE TAILLE MODIFIE LE CHAMP DE CONTRAINTES AUTOUR DU NOYAU EN SUPRIMANT LE CONFINEMENT SUR LE FRONT MÊME

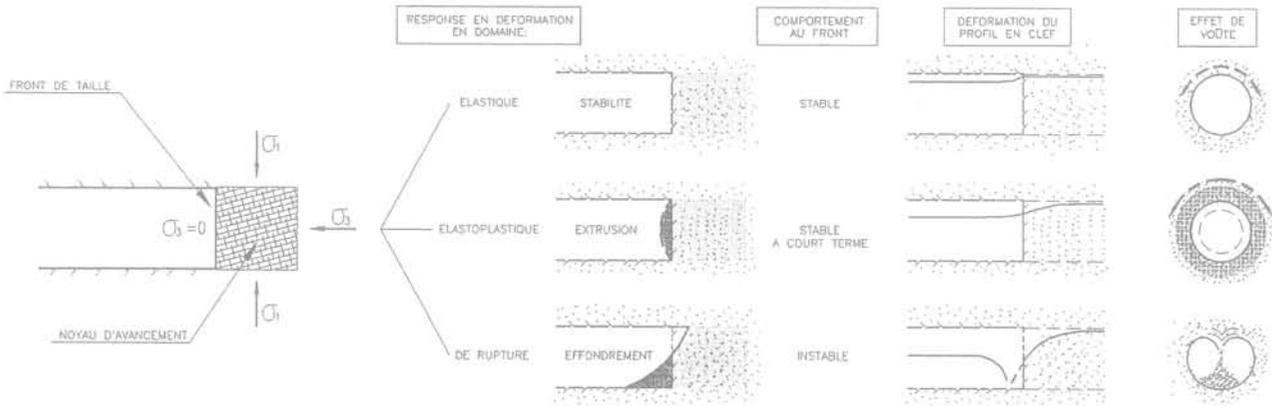
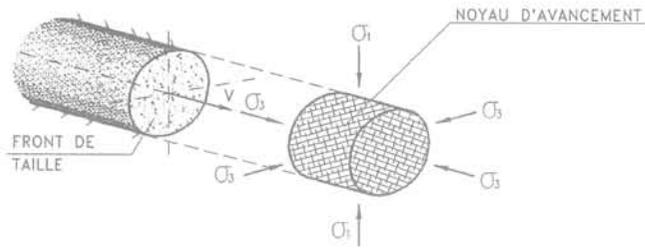


FIG. 6 Toutes les manifestations d'instabilité dépendent directement ou indirectement de la rigidité du noyau. Pendant l'avancement d'un tunnel il est possible de vérifier trois situations fondamentales : 1) front stable ; 2) front stable à court terme ; 3) front instable.

All the forms of instability depend directly or indirectly on the rigidity of the core. During tunnel advance, three basic situations can occur : 1) stable face ; 2) face stable in the short term ; 3) unstable face.

absolument négligeables. Dans ce cas, la déviation des contraintes sur le contour de la cavité (effet de voûte) se produit par voie naturelle à proximité du profil d'excavation.

Si, en revanche, l'annulation de l'état de coaction sur le front ($\sigma_3 = 0$) produit sur le noyau des contraintes qui abordent le domaine élastoplastique, la réaction est importante aussi et la paroi libre du noyau (front de taille) se déforme élastoplastiquement vers l'intérieur de la cavité (extrusion), et cela donne lieu à une situation de *stabilité à court terme*. En l'absence d'interventions, il s'amorce un phénomène de plastification qui se propage longitudinalement et radialement à partir du contour de l'excavation et cela produit le déplacement de l'« effet de voûte » vers l'intérieur du massif. Ce processus ne peut être contrôlé que par la réalisation d'interventions adéquates de stabilisation de la masse de terrain plastifié.

Enfin, si l'annulation de l'état de contrainte sur le front ($\sigma_3 = 0$) produit sur le noyau des contraintes qui sont dans le domaine de la rupture, la réponse en déformation est inacceptable, et nous avons une situation d'*instabilité* du noyau qui empêche totalement la formation de l'« effet de voûte ». C'est le cas des terrains sans cohésion pour lesquels cet effet, ne pouvant pas se former par voie naturelle, devra être produit par voie artificielle.

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

Nous pouvons donc affirmer que ces derniers sont la conséquence directe des phénomènes de déformation déjà apparus en amont du front ; autrement dit

sont la conséquence des choix conceptuels et de construction opérés en amont du front de taille pour contrôler la réponse en déformation.

Assurer la rigidité du noyau d'avancement signifie donc, éviter les phénomènes d'instabilité du front et, par voie de conséquence, contrôler l'apparition de la réponse en déformation en amont de celui-ci et donc également son évolution en aval (Fig. 7).

Des mesures expérimentales se référant à l'évolution des déformations dans le milieu en fonction de la position du front de taille confirment ce qui précède et soulignent le fait que plus le noyau se maintient rigide et reste dans le domaine élastique, plus le rayon d'influence du front R_f est réduit.



FIG. 7 Assurer la rigidité du noyau d'avancement signifie éviter les phénomènes d'instabilité du front et par voie de conséquence contrôler l'apparition de la réponse en déformation en amont de celui-ci et donc également son évolution en aval.

Ensuring the rigidity of the core means preventing face instability and as a consequence, controlling the onset of deformation responses ahead of it and hence also the development of the response down stream.

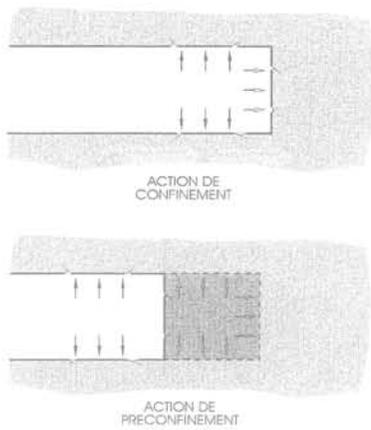


FIG. 8 Actions de confinement et de préconfinement sur une cavité.
Cavity confinement and preconfinement actions.

Mais comment le projeteur peut-il garantir la rigidité du noyau sur le front de taille ? En produisant des actions de *préconfinement de la cavité* destinées, d'une part, à décharger le noyau des états de surtension (action de protection), et d'autre part, à conserver ou à améliorer les caractéristiques de résistance et de déformabilité du terrain (action de consolidation). L'action de préconfinement de la cavité est ainsi définie pour la distinguer de celle du simple *confinement* qui agit sur son contour, en aval du front de taille (Fig. 8).

L'action de préconfinement s'oppose à l'apparition de la réponse en déformation en amont du front de taille et limite donc son évolution en aval et facilite son contrôle. De sorte qu'il convient de donner au noyau suffisamment de rigidité pour maintenir le terrain autant que faire se peut dans le domaine élastique à l'intérieur du rayon d'influence du front de taille et cela afin d'obtenir l'effet de voûte le plus proche du contour de la cavité et avoir donc des phénomènes de déformation réduits.

L'importance de la mise en place de l'action de préconfinement de la cavité dans la conception et dans la construction des tunnels réside dans le fait qu'elle donne au concepteur un nouvel instrument qui complète ceux qui sont normalement utilisés, liés à l'action de simple confinement, et qu'elle impose une nouvelle approche de calcul. De fait, dans les cas où les états de contraintes provoqués par l'ouverture de la cavité permettent, en fonction des caractéristiques de résistance et de déformabilité du noyau, de choisir les instruments de stabilisation exclusivement au niveau du confinement de la cavité, le projeteur se limitera à étudier le problème en termes de « convergence-confinement » (Fig. 9) ; s'il fallait choisir également au niveau du confinement du front dans la mesure où il se produit des phénomènes d'extrusion pour des états de contrainte réduits, le problème sera étudié selon des modèles d'« extrusion-confinement ». Enfin, si les états de contrainte sont élevés au point de rendre vaines les actions de confinement de la cavité et du front, le projeteur devra travailler sur la rigidité du noyau en adoptant des solutions de préconfinement de la cavité et trouver la solution du problème de dimensionnement et de vérification des interventions sur le noyau en recourant à de nouveaux modèles « extrusion-préconfinement » qui dans le passé ont fait l'objet d'études par plusieurs auteurs (Fig. 10) et qui, à présent, à la lumière de l'importance

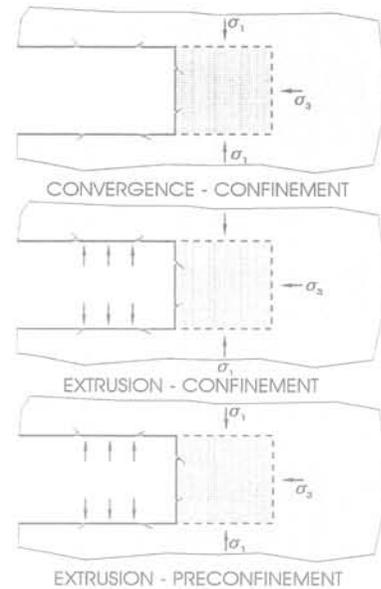


FIG. 9 En fonction de la situation de contrainte et de déformation du noyau, le projeteur pourra choisir les instruments de stabilisation qui s'imposent en étudiant le problème en termes de convergence-confinement, extrusion-confinement ou extrusion-préconfinement.
In relation to the stress-strain situation of the core, the tunnel designer can choose the stabilisation instruments by studying the problem in terms of convergence-confinement, extrusion-confinement or extrusion-preconfinement.

revêtue par le noyau d'avancement en tant qu'outil de stabilisation de la cavité, demandent des mises à jour ultérieures.

3

Interventions de préconfinement

Dans le paragraphe précédent, nous avons souligné comment le noyau d'avancement en fonction de sa rigidité était à même :

AUTEUR	METHODE EMPLOYEE	DOMAINE DE APPLICABILITE														
		FORME	RECOURBEMENTS		TERRAIN		PARAMETRES EMPLOYES									
			SAS	ELEVE	PUREMENT COHERENT	ETRAITRE		C _u	q	v _e	E	σ ₁	σ ₃			
BROMS-BENN.	EXPERIMENTAL	○	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
LOMBARDI PANET-GUENOT	EN TERMES DE CONTRAINTE ET DEFORMATIONS	○	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
ELLSTEN		○	+8	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
TAMEZ	ANALYSE DE STABILITE	○	8	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
TAMEZ GEN.		○	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
CHAMBRON-CO.	CALCUL A RUPTURE	○	+5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
LECA-PANET		○	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

FIG. 10 Études théoriques et expérimentales sur le front de taille du tunnel.
Theoretical and experimental studies on tunnel face stability.

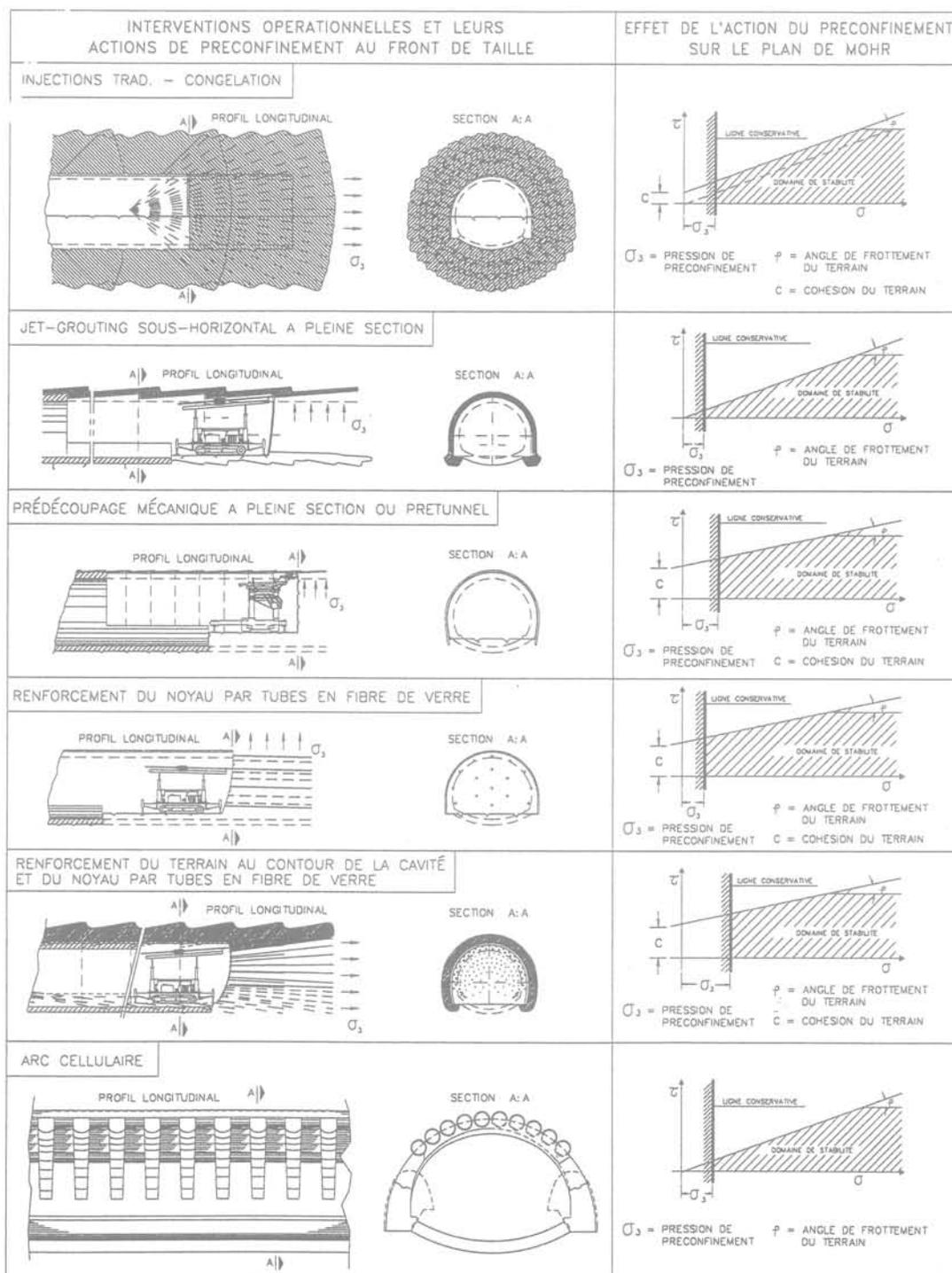
- de produire actions de préconfinement ;
- en produisant des actions de préconfinement, de contrôler la réponse en déformation ;
- en contrôlant la réponse en déformation, d'agir en tant qu'instrument de stabilisation d'un tunnel en phase de construction.

Examinons alors les interventions à la disposition du projeteur pour garantir la rigidité du noyau d'avancement afin qu'il puisse réaliser cette action de préconfinement de la cavité, indispensable, en particulier pour affronter les terrains dits « difficiles », et qui sont consi-

dérés comme tels pour des raisons liées à leur consistance naturelle, aux états de contraintes et à la présence d'eau.

Il s'agit d'interventions de conception généralement récente qui, du fait de l'action qu'elles exercent en amont du front de taille, pour empêcher la détente du massif et pour conserver la contrainte σ_3 dans des valeurs positives, sont définies comme des « interventions de conservation » (Fig. 11).

L'action de conservation exercée par ces interventions, peut être représentée dans le plan de Mohr par



Interventions conçues et réalisées les 10 dernières années

FIG. 11 Interventions par action de préconfinement. Techniques that exert a pre-confinement action.

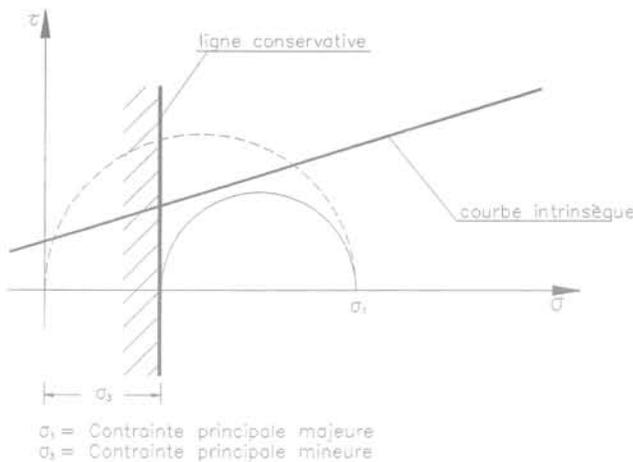


FIG. 12 L'action de conservation est représentée sur le plan de Mohr moyennant une ligne dite « de conservation ».
The « conservation » action is represented on the Mohr plane by a line called the « conservation line ».

une ligne, justement dite « de conservation », qui représente la limite au-delà de laquelle la contrainte principale mineure σ_3 ne doit pas déchoir, pour garder le plus possible inaltérée la courbe intrinsèque du terrain et ne pas perdre le contrôle de la réponse en déformation du massif (Fig. 12).

Ces interventions, complémentaires aux interventions traditionnelles de simple confinement du front et de la cavité (Fig. 13), par les actions de conservation qu'ils opèrent face au noyau d'avancement, peuvent être à leur tour partagées en (Fig. 14) :

- *interventions de conservation directes*, lorsqu'elles produisent une déviation des contraintes autour du contour du noyau, par exemple au moyen de prévoûtes de terrain consolidé par du jet-grouting sub-horizontale, par des couches de béton projeté ou de béton renforcé par des fibres d'acier lors du prédécoupage mécanique (prétunnel), qui en agissant en amont du front de taille jouent une action de protection ;
- *interventions de conservation indirectes* lorsqu'elles agissent directement sur la consistance du noyau d'avancement en améliorant les caractéristiques de résistance et de déformabilité grâce à des techniques de renforcement du noyau par exemple par des ancrages tubulaires en fibres de verre qui permettent au noyau de rester stable, même en l'absence d'interventions de protection ;
- *interventions de conservation mixtes*, lorsqu'on opère au contour du noyau avec des techniques de protection et en même temps directement à l'intérieur du noyau par des techniques de renforcement, qui prédisposent le noyau à garder sa propre intégrité, même lorsque la nature des terrains et l'entité des recouvrements en jeux tendent à créer des conditions de stabilité difficile.

On peut considérer comme *interventions de conservation directes* (Fig. 15) :

- le système de jet-grouting sub-horizontale (Fig. 16), qui permet de réaliser, à l'avancement, des prévoûtes de terrain consolidé capables de garantir la formation de l'effet de voûte par voie artificielle, même dans des terrains complètement dépourvus de cohésion (première réalisation dans l'absolu en 1983 en Italie au tunnel Campiolo, sur la

ligne ferroviaire Pontebba-Tarvisio pour les chemins de fer de l'État italien (Ferrovie dello Stato, ou FS)⁽¹⁾ ;

- le système de prédécoupage mécanique (Fig. 17), que nous avons emprunté à une technologie française (SIPREMEC) et mis au point en « pleine section », pour l'attaque programmée de terrains cohérents ou semi-cohérents, même sous la nappe. Le système consiste à réaliser à l'avancement, un prérevêtement en béton projeté renforcé par des fibres d'acier pour protéger le noyau, prérevêtement capable d'empêcher le relâchement du terrain environnant et, par voie de conséquence, de favoriser la formation de l'effet de voûte à proximité de l'arc proche du profil d'excavation (première réalisation en Italie en 1985, sur certains tunnels de la ligne de chemin de fer Sibari-Cosenza pour les chemins de fer de l'État italien)⁽²⁾ ;

- le système de prétunnel (Fig. 18), qui permet de réaliser des tunnels en pleine section dans des terrains difficiles en effectuant, en continu, la mise en place du revêtement définitif en béton en amont du front de taille. Il sera possible grâce à cette technologie, qui est à présent en phase d'expérimentation en Italie, d'élargir des tunnels autoroutiers de deux à trois voies tout en maintenant la circulation au cours des travaux ;

- le système de l'« arc cellulaire » (Fig. 19) résout le problème de la préfabrication du revêtement définitif de l'ouvrage souterrain à construire avant de commencer son excavation, dans la mesure où il permet de réaliser de grandes cavités corticales (jusqu'à 60 m d'ouverture) dans des zones urbaines, dans des terrains sans cohésion ou peu cohérents, y compris sous la nappe, pratiquement sans provoquer de tassements en surface (première réalisation dans l'absolu en 1988 pour la station « Venezia » de la transversale ferroviaire de Milan, pour MM Strutture ed Infrastrutture del Territorio SPA)⁽³⁾.

On peut considérer comme *intervention de conservation indirecte* (Fig. 15) :

- le système de prérenforcement du noyau au front de taille par des ancrages tubulaires en fibres de verre (Fig. 20) qui permettent de régler la rigidité du noyau et par voie de conséquence de contrôler la réponse en déformation en amont et en aval du front. Le système a été largement appliqué, notamment dans l'excavation de tunnels dans des terrains de nature argileuse où les forts états de contraintes pouvaient provoquer l'extrusion ou l'effondrement (première réalisation dans l'absolu en 1988 pour les tunnels ferroviaires du Ve lot du tronçon Arezzo Sud-Figline Valdarno de la ligne Grande Vitesse Rome-Florence pour les chemins de fer de l'État italien)⁽⁴⁾.

Les *interventions de conservation mixtes* sont réalisées en opérant en même temps une intervention directe de protection et une intervention indirecte de renforcement du noyau. On peut considérer comme *interventions conservatrices mixtes* (Fig. 21) :

⁽¹⁾ Entreprise générale : Italstrade SpA ; Entreprise spécialisée : Rodio SpA ; Projeteur : Rocksoil SpA Milan [1, 2, 4, 5, 12, 13, 14, 18, 22].

⁽²⁾ Entreprise générale : Asfalti Sintex SpA ; Entreprise spécialisée : Rodio SpA ; Projeteur : Rocksoil SpA Milan [7, 12, 13, 16, 17, 22].

⁽³⁾ Entreprise générale : Consorzio GIEMME ; Entreprise spécialisée : Smetboring SpA, Rodio SpA, Icos SpA ; Projeteur : Rocksoil SpA Milan [6, 8, 9, 10, 11, 12, 22].

⁽⁴⁾ Entreprise générale : Consorzio FESPI ; Entreprise spécialisée : Rodio SpA, Fondedile SpA ; Projeteur : Rocksoil SpA Milan [7, 12, 17, 19, 22, 23, 24].

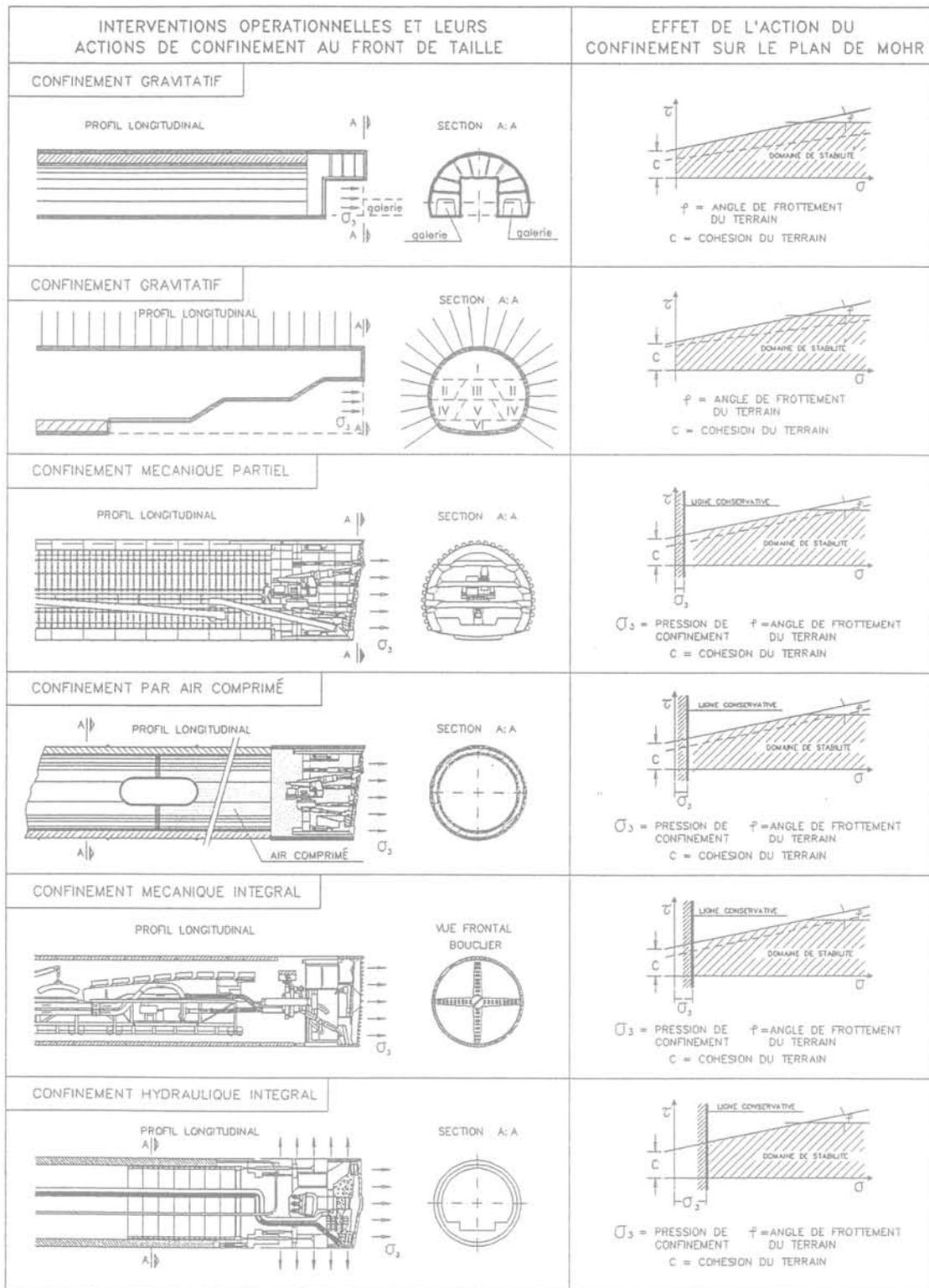


FIG. 13 Interventions par action du seul confinement.
 Techniques that exert a confinement action only.

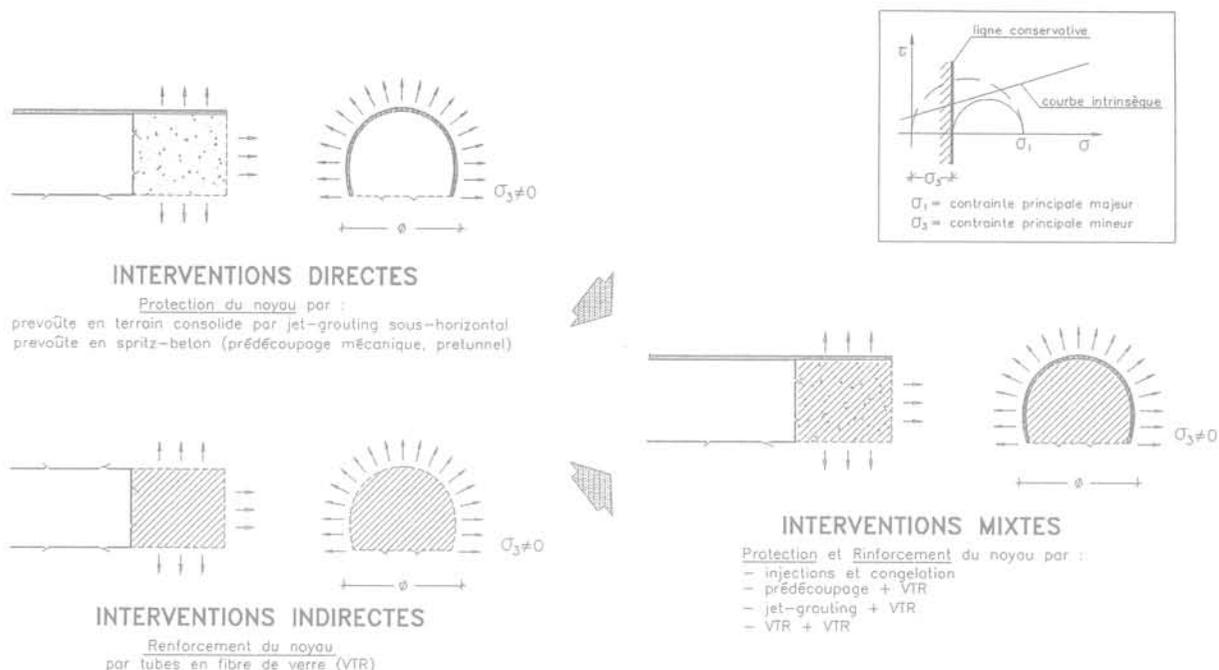


FIG. 14 Interventions de conservation par action de préconfinement : directes, indirectes et mixtes. Direct, indirect and mixed conservation techniques.

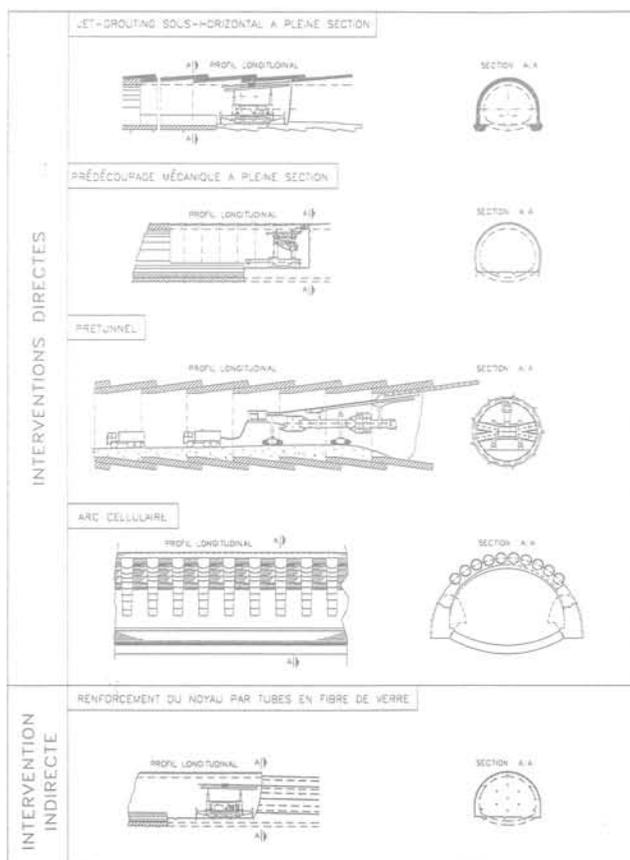


FIG. 15 Interventions de conservation directes et indirectes. Direct and indirect conservation techniques.

– le prédécoupage mécanique et le prérenforcement simultané du noyau par des ancrages tubulaires en fibres de verre (première réalisation dans l'absolu en 1988 pour le tunnel Tasso et le tunnel Terranova Le Ville de la ligne Grande Vitesse Rome-Florence pour les chemins de fer de l'État italien⁽⁵⁾ ;

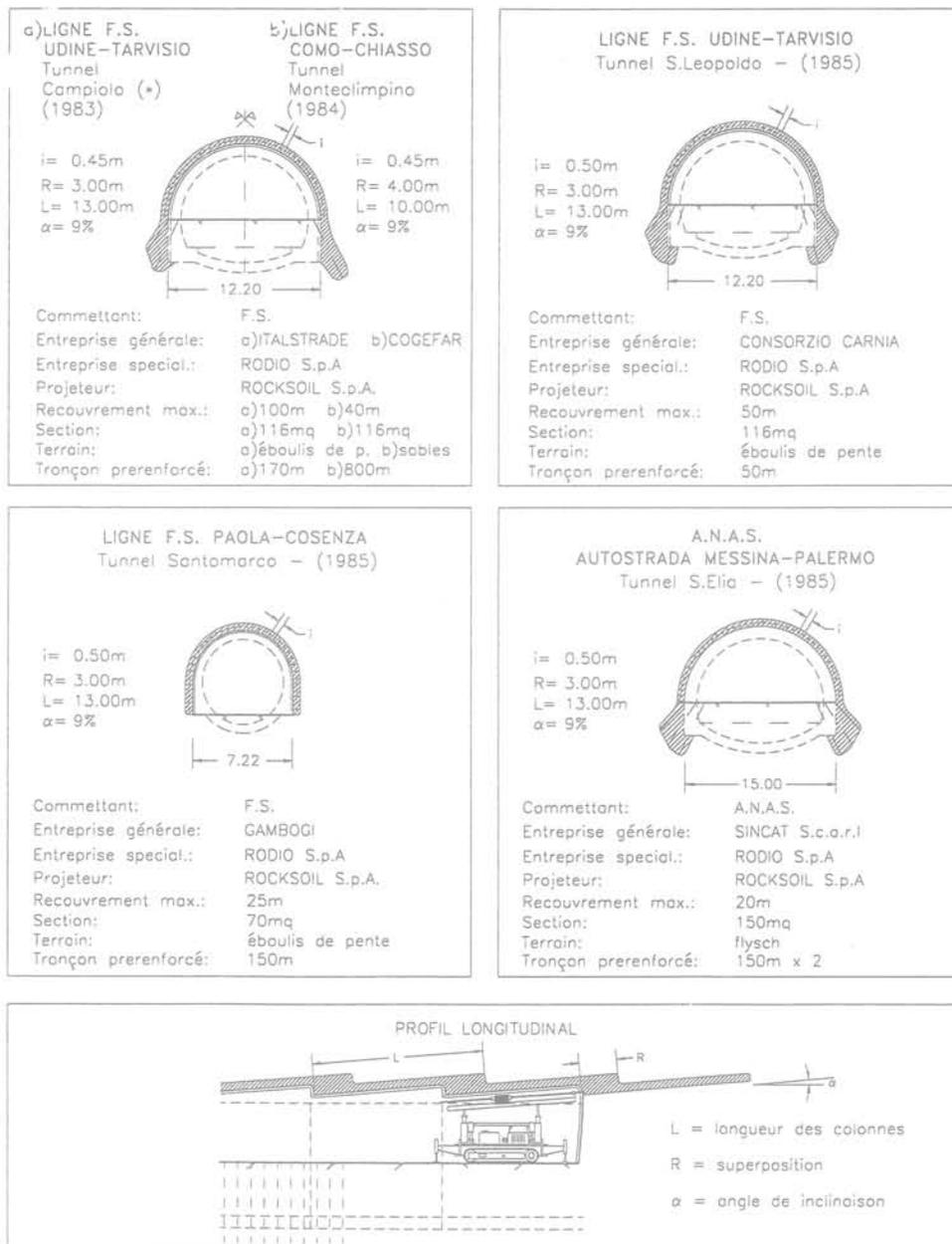
– le prérenforcement du contour de la cavité et du noyau par des boulons en fibre de verre (première réalisation dans l'absolu en 1991 pour le tunnel San Vitale de la ligne ferroviaire Caserta-Foggia pour les chemins de fer de l'État italien⁽⁶⁾ ; ou encore la préconsolidation du contour de la cavité par jet-grouting et le prérenforcement du noyau par des ancrages tubulaires en fibres de verre (première réalisation dans l'absolu en 1991 avec le tunnel Vasto de la ligne de chemin de fer Ancona-Bari pour les chemins de fer de l'État italien⁽⁷⁾).

Ces technologies unies à d'autres technologies particulières telles que le système de jet-grouting vertical (Fig. 22) avec lequel il est possible de créer dans le terrain, avant d'excaver, des coques de préconfinement de terrain consolidé, particulièrement efficaces pour la réalisation d'ouvrages d'entrée sur des versants détritiques sans compromettre leur stabilité et dans le respect le plus total de l'environnement (première réalisation dans l'absolu en 1985 pour la tête côté Pontebba du tunnel San Leopoldo de la ligne de chemin de fer Pontebba-

⁽⁵⁾ Entreprise générale : Consorzio FESPI ; Entreprise spécialisée : Rodio ; Projeteur : Rocksoil SpA Milan [7].

⁽⁶⁾ Entreprise générale : Consorzio COFERI ; Entreprise spécialisée : Consonda ; Projeteur : Rocksoil SpA Milan [23, 24].

⁽⁷⁾ Entreprise générale : Fioroni SpA ; Entreprise spécialisée : Fondazioni Speciali SpA ; Projeteur : Rocksoil SpA Milan.



(*) PREMIER EXEMPLE DE TUNNEL DE DIAMÈTRE 12.00m RÉALISÉ PAR JET-GROUTING SOUS-HORIZONTAL (1983)

FIG. 16 Premières applications du jet-grouting sub-horizontale.
First applications of near-horizontal jet-grouting system.

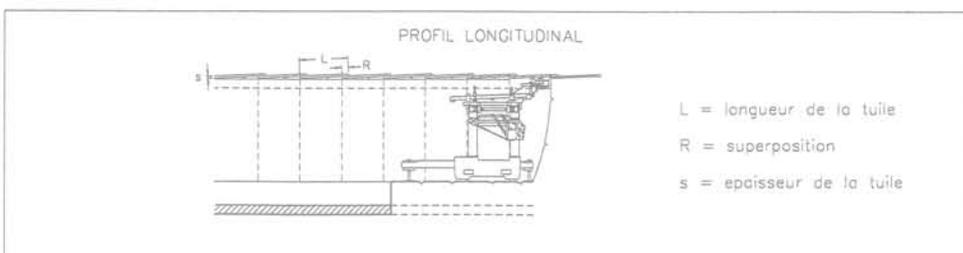
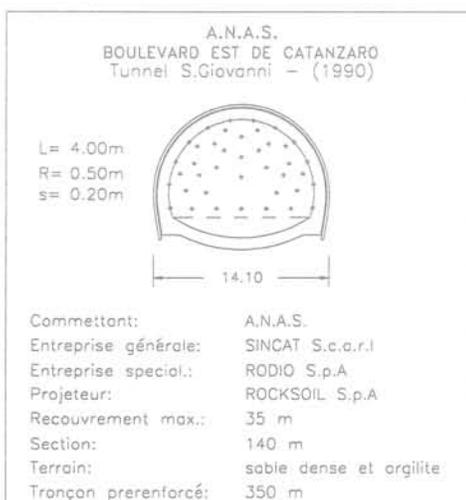
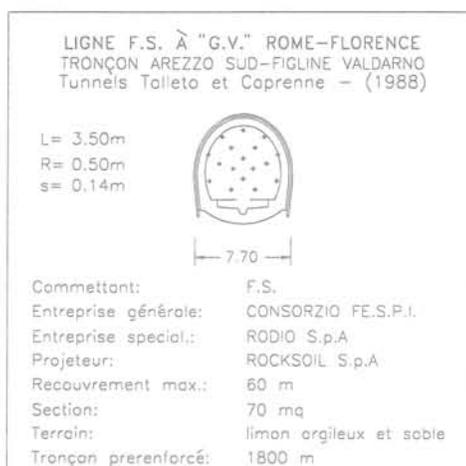
Tarvisio pour les chemins de fer de l'État italien⁽⁸⁾ ; constituent les interventions de conservation conçues par l'auteur et mises au point au cours des dix dernières années (voir tableaux I et II des travaux réalisés).

La disponibilité des technologies d'excavation conservatrices au moyen desquelles il est possible d'exercer une action de préconfinement de la cavité, quel que soit le type de terrain et quelle que soit la

situation de contrainte, a entraîné une véritable révolution dans la manière d'aborder les excavations souterraines.

Cette révolution dérive du fait que l'action de préconfinement garantit le respect des cadences d'avancement même dans les situations difficiles, empêche la détente du terrain en amont du front de taille et évite par voie de conséquence l'apparition des manifestations d'instabilité dont nous avons parlé, y compris dans les contextes où les interventions de simple « confinement » ont toujours échoué et continueront de le faire (Fig. 23). Cet état de choses constitue dès lors le point de départ indispensable pour commencer, d'une part à penser concrètement à la possibilité d'industria-

⁽⁸⁾ Entreprise générale : Consorzio Carnia ; Entreprise spécialisée : Rodio ; Projeteur : Rocksoil SpA Milan [3, 15, 18, 22].



(*) PREMIERE APPLICATION DU PREDECOPAGE MECANIQUE A PLEINE SECTION (1985)

FIG. 17 Premières applications du prédécoupage mécanique à pleine section.
First applications of full face mechanical precutting system.

liser les ouvrages souterrains et de les planifier en termes de temps et de coûts de construction indépendamment de la nature du milieu et de l'importance des recouvrements en jeu. En outre, pour commencer à mettre au point une nouvelle méthode de conception et de construction d'ouvrages souterrains qui soit capable indépendamment de la nature du milieu et de l'importance des recouvrements en jeu, de répondre aux conditions requises pour être considérée comme complète et universellement valable. Elle devra :

- 1) s'appliquer quel que soit le type de terrain et quelles que soient les situations statiques ;
- 2) fournir les instruments de conception et de construc-

tion adéquats, capables de résoudre les différentes situations quel que soit le type de terrain ;

- 3) prévoir une nette séparation entre la conception et la construction de l'ouvrage ;
- 4) permettre de planifier l'ouvrage souterrain en termes de temps et de coûts de construction.

Les méthodes les plus largement utilisées jusqu'ici n'ont pas su répondre complètement à ces exigences. Qu'il s'agisse des méthodes dérivant de critères de classement géomécanique (et donc valables exclusivement pour les massifs rocheux) ou de méthodes dérivant de systèmes de construction comme celui proposé par Rabcewicz.

La Nouvelle Méthode Autrichienne (NATM), qui a

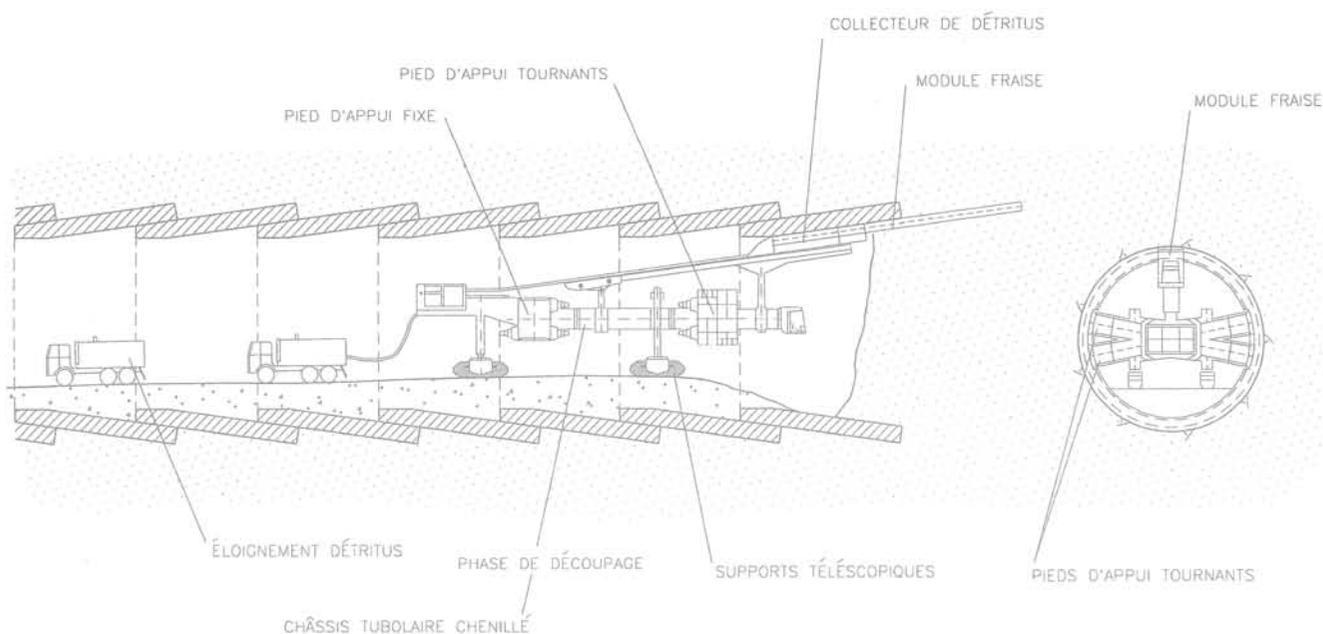


FIG. 18 Le système de « Prétunnel ».
The Pretunnel system.

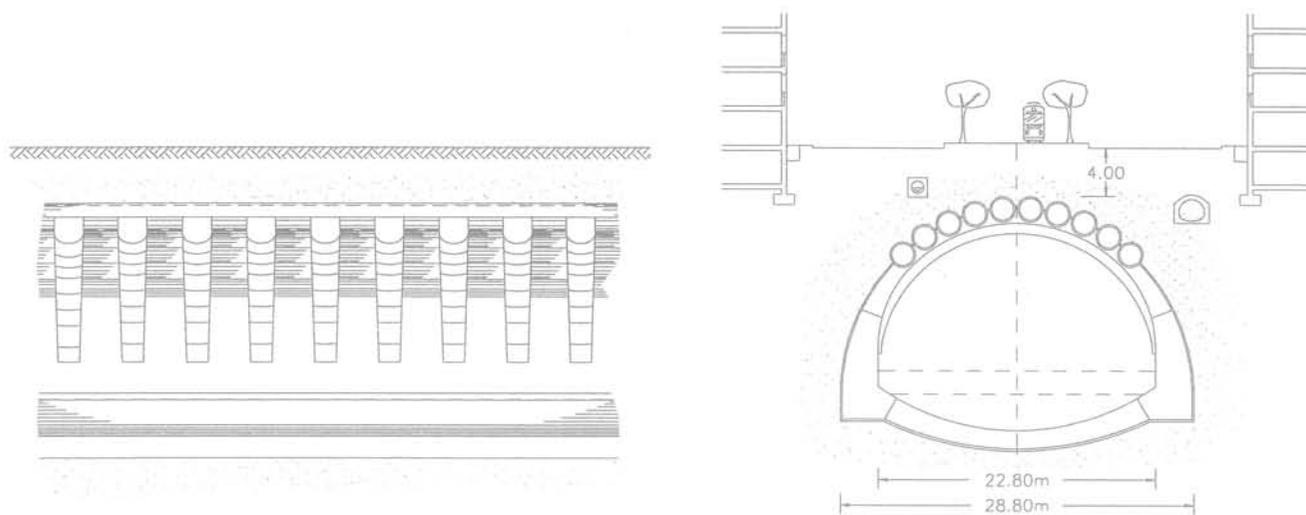


FIG. 19 Le système de l'« Arc Cellulaire ».
The Cellular Arch system.

eu au demeurant une très large diffusion ces trente dernières années, a incontestablement représenté lors de son introduction, un progrès considérable par rapport au passé. Elle a eu le mérite essentiel :

- de considérer pour la première fois le terrain comme un matériau de construction et de s'orienter vers des actions de *confinement* et non pas de soutènement ;
- d'introduire l'utilisation de nouvelles technologies de simple confinement avec une action active, telles que le béton projeté et les boulons ;

- de souligner le besoin de mesurer et d'interpréter systématiquement la réponse en déformation du massif exclusivement en termes de convergence de la cavité.

Aujourd'hui, toutefois, à la lumière des progrès récents faits dans le domaine technologique et dans le calcul, la méthode révèle des limites importantes :

- elle représente un système de classement incomplet et partiel dans la mesure où ce classement ne s'applique pas à tous les types de terrain et à toutes les situations de contraintes et de déformations ;

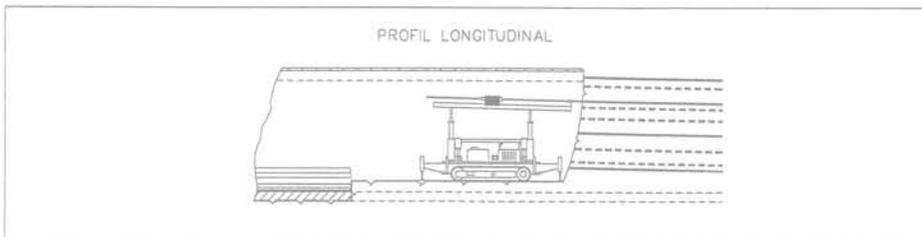


FIG. 20 Premières applications du renforcement du noyau par tubes en fibre de verre (VTR).
First applications of the reinforcement of the ground core using glass fibre tubes.

- elle néglige les nouvelles technologies et continue à prétendre, à tort, d'être à même de résoudre toutes les situations de contraintes et de déformations à travers la seule utilisation de boulons, des cintres et du béton projeté ;
- elle néglige complètement l'importance du noyau d'avancement et le besoin de l'utiliser en tant qu'instrument de stabilisation du tunnel ;
- elle ne prévoit jamais une conception nettement séparée de la construction.

Pour surmonter ces limites, une méthode a été récemment proposée qui se base sur l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les

sols [20, 21]. Elle se présente comme une nouvelle méthodologie qui a pris acte des possibilités offertes par les instruments les plus récents de recherche et de calcul au cours de la phase de conception et qui tient compte des nouvelles techniques d'avancement et de stabilisation de la cavité au cours de la phase de construction. Une méthode qui valorise sur le plan pratique la contribution scientifique et opérationnelle de la NATM et des autres méthodes utilisées dans le passé. Elles les interprètent dans un sens innovant, elle dépasse leurs limites et constitue leur évolution naturelle. Elle propose entre autres choses :

- de faire référence à un seul paramètre, autrement dit

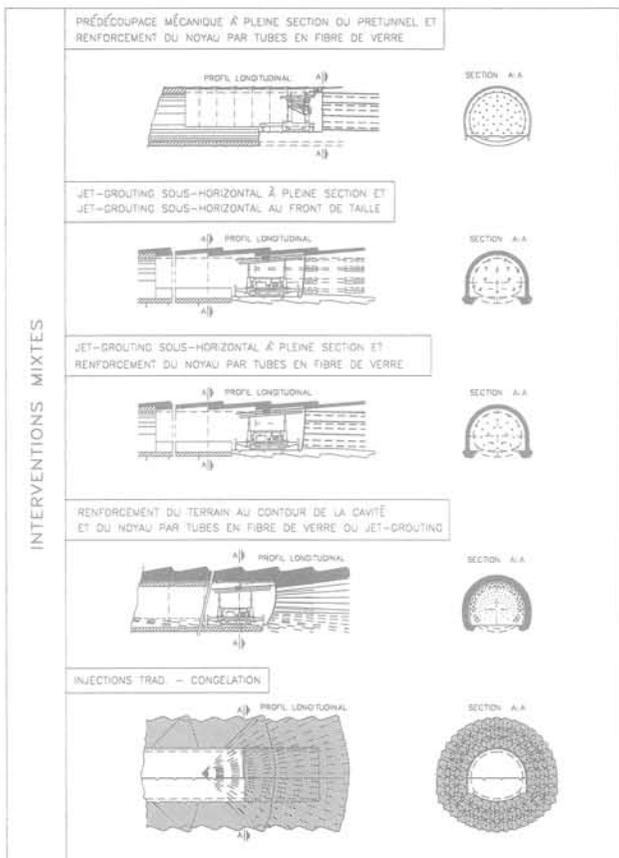


FIG. 21 Interventions de conservation mixtes.
Mixed conservation techniques.

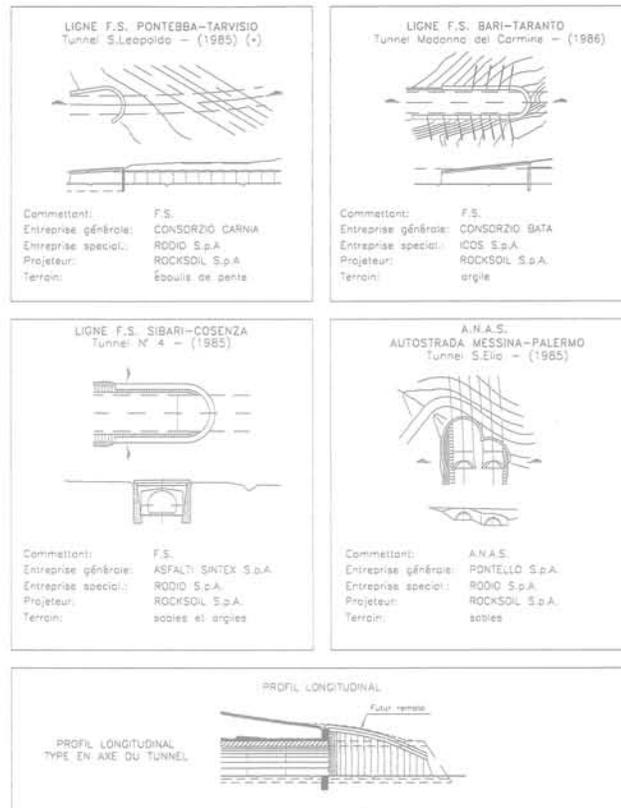


FIG. 22 Premières applications d'attaque du tunnel par jet-grouting vertical.
First applications of vertical jet-grouting system to create shells of improved ground before tunnel excavation commences.

ANNÉE	COMMITANT	TRAVAIL	Ø [m]	SECTION A-A					N
				L [m]	L [m]	L [m]	L [m]	L [m]	
1983	F.S.	UDINE-TARVISIO Tunnel Campiolo	12	170					
1984	F.S.	UDINE-TARVISIO Tunnel M. Pelis	12	200					
1984	F.S.	PAOLA-COSENZA Tunnel Santomarca	7	150					
1984	F.S.	CGMO-CHIASSO Tunnel M. Olimpico	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 Tunnels 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	Commune Compaines	Passage souterrain de la gare	14	300x2					2
1987	F.S.	UDINE-TARVISIO Tunnel Campiolo	12	650					2
1987	F.S.	UDINE-TARVISIO Tunnel S.Rocco	12	600					
1988	ANAS	AUT. DEI TRAFORZI Tunnel Vallesio	15	600					
1988	ANAS	S.S. 42 Tunnel Lavere	11	200					
1988	MM	TRANSVERSALE FERR. DE MILANO Station Venezia	30				250		
1988	F.S.	LIGNE A "OV" ROME-FLORENCE Tunn. Tolleto e Coprenne	8	2500	2800	2800			4
1988	F.S.	LIGNE A "OV" ROME-FLORENCE Tunnel Tasso	12	150		1650			2
1988	F.S.	LIGNE A "OV" ROME-FLORENCE Tunn. Terranova le Ville	12	200	1800	2200			3
1988	F.S.	LIGNE A "OV" ROME-FLORENCE Tunnel Poggio Oriente	13	250		600			2
1988	F.S.	LIGNE A "OV" ROME-FLORENCE Tunnel Crepacuore	13	60		120			2
1989	ANAS	BOULEVARD DE CATANZARO Tunnel S.Giovanni	12		400	400			2
1989	ANAS	S.S. 42 Tunn. Costa Volpina	11			200			1
1989	Aqueduc des Pouilles	Aqueduc d'Ofonia	5			200			3
1989	F.S.	TARZIA-SIRACUSA Tunnel di Siracusa	12		1000	1000			
1989	R.A.V.	AUT. AOSTA-M. BIANCO Tunnel Villeneuve	12	275x2					2

ANNÉE	COMMITANT	TRAVAIL	Ø [m]	SECTION A-A					N
				L [m]	L [m]	L [m]	L [m]	L [m]	
1989	R.A.V.	AUT. AOSTA-M. BIANCO Tunnel Avise	12	290x2					4
1989	F.S.	UDINE-TARVISIO Tunnel Tarvisio	16	1000					1
1989	SAT	AUT. LIVORNO-CIVITAV. Tunnel Maranchini	12	900x2					2
1989	SAT	AUT. LIVORNO-CIVITAV. Tunnel Rimizzano	12	900x2		900x2			2
1990	Commune de Rome	Passage souterrain via Cristoforo Colombo	12,5	150					
1990	ANAS	S.S. 1 Tunnel Montenero	11	150x2		2350x2			2
1990	LAURO	S.S. 38 Tunn. Volmagg. Balladore	12	150					4
1990	COGEFAR	S.S. 38 Tunnel Moncalizzo	12	60					1
1990	CARIBONI	S.S. 38 Tunn. Le Prese e Verzeo	12	100					2
1990	LODICIANI	S.S. 38 Tunnel San Antonio	12	40					2
1990	TECNO SVILUPPO	S.S. 38 Tunnel Tola	12	80					2
1990	SECOL	S.S. 38 Tunnel Cepino	12	70					1
1990	R.A.V.	AUT. AOSTA-M. BIANCO Tunnel Levetogne	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 Boulevard periferique 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	1800			
1991	ANAS	S.S. 62 Tunnel M. Barro	11	100x2					1
1991	PIZZA, ROTTI	S.S. 470 Tunnel Lenna	12	30					
1992	ANAS	F. 45 Tunnel Quarto	11	100x2		200x2			3
1993	F.S.	ANCONA-BARI Tunnel Vasto	12	2260	2620	4980			
1993	F.S.	FIRENZE-EMPOLI Tunnel S.Vito	12			900			
1993	F.S.	FIRENZE-EMPOLI Tunnel Bellosguardo	12	50		714			2
1993	ANAS	S.S. 106 Tunnel Lofiri	11	90x2		90x2			2
1993	INTERMETRO	METRO DE ROME Stat. Baldo degli Ubaldi	21		120	120			

TERRAIN	ARGILLES	LIMONS	SABLES	GRAVIER	ROCHES FRACTURÉES	ROCHES
INTERVENTIONS						
INJECTIONS TRADITIONNELLES						
CONGÉLATION						
JET-GROUTING SOUS-HORIZONTAL						
PRETUNNEL *						
RENFORCEMENT DU NOYAU PAR TUBES EN FIBRE DE VERRE						
PREDECOUPEGE MECANIQUE						
ARC CELLULAIRE						

FIG. 23 **Domaine d'application des interventions qui produisent des effets de voûte artificiels.**
Application range of the techniques which produce an artificial arch effect.

la réponse en déformation du milieu où est creusée l'excavation tout d'abord par voie théorique, comme objet de prévision et de mise sous contrôle, puis par voie expérimentale, comme objet de lecture et d'interprétation pour la mise au point du projet en chantier ;

– de valoriser la fonction du noyau au front de taille comme instrument de stabilisation de la cavité en phase d'excavation ;

– d'encadrer les tunnels sur la base de catégories de comportement en fonction des conditions de stabilité du noyau et du front de taille ;

– d'intégrer, dans la phase du choix et du dimensionnement des interventions de stabilisation, les approches bien connues de « convergence-confinement » et d'« extrusion-confinement » avec celle d'« extrusion-préconfinement » en faisant en sorte qu'il soit possible d'aborder la conception et la construction

des tunnels difficiles avec les mêmes critères de sécurité que ceux adoptés pour les tunnels faciles à réaliser, afin de prévoir d'une manière fiable les temps et les coûts de construction.

Aujourd'hui, l'objectif de l'industrialisation des excavations est donc à notre portée, de même que celui de la planification des ouvrages souterrains qui pourront enfin être élevés à la dignité des autres ouvrages du génie civil.

Une méthode de conception et de construction conforme aux caractéristiques que nous venons d'indiquer peut être adoptée comme référence pour le développement d'une nouvelle réglementation capable de répondre correctement aux exigences de ceux qui opèrent en souterrain (comme cela a été fait par trois importantes administrations italiennes qui ont renouvelé récemment leurs cahiers des charges [25, 26, 27].

Bibliographie

- [1] Lunardi P. – Nouvelle méthode de construction des écrans d'étanchéité dans les barrages en remblai. XIV^e Congrès international sur « Le Grand Dighe ». Rio de Janeiro, 6-7 mai 1982.
- [2] Louis C., Lunardi P. – Consolidation des sols par la technique de jet-grouting. État des connaissances et expériences. Colloque international « Renforcement en place des sols des roches ». Paris, octobre 1984.
- [3] Faoro L., Lunardi P., Pasquini M. – Il jet-grouting nel consolidamento di imbocchi di gallerie autostradali. Comptes rendus du Congrès international sur les « Grands Ouvrages en Souterrain ». Florence, 8-11 juin 1986.
- [4] Lunardi P., Mongilardi E., Tornaghi R. – Il preconsolidamento mediante jet-grouting nella realizzazione di opere in sotterraneo. Comptes rendus du Congrès international sur les « Grands Ouvrages en Souterrain ». Florence, 8-11 juin 1986.
- [5] Camargo Guazzelli J.L., Lunardi P. – Tunel de Campinas : evolucion del diseno y problemas de operacion. Comptes rendus du Congrès international sur « Les tunnels et l'eau ». Madrid, 12-15 juin 1988.
- [6] Lunardi P. – L'emploi de microtunnels pour la réalisation d'ouvrages souterrains de grande portée : l'arc cellulaire. Comptes rendus du Congrès international sur « Les tunnels et l'eau ». Madrid, 12-15 juin 1988.
- [7] Lunardi P., Bindi R., Focaracci A. – Nouvelles orientations pour le projet et la construction des tunnels dans des terrains meubles. Études et expériences sur le préconfinement de la cavité et la préconsolidation du noyau au front. Colloque international « Tunnels et micro-tunnels en terrain meuble ». Paris, 7-10 février 1989.
- [8] Colombo A., Lunardi P., Luongo E., et al. – L'Arc cellulaire pour la station Venezia du Passante Ferroviario Metropolitano de Milan. Colloque international « Tunnels et micro-tunnels en terrain meuble ». Paris, 7-10 février 1989.
- [9] Lunardi P. – Un nuovo sistema costruttivo per la realizzazione di gallerie di grande luce in terreni sciolti : l'arco cellulare. *Gallerie e grandi opere sotterranee*, n° 29, 1989.
- [10] Colombo A., Lunardi P., Luongo E. – Innovative techniques for the realization of large diameter tunnels in loose land. Comptes rendus du Congrès international « Progress and Innovation in Tunnelling ». Toronto, 9-14 septembre 1989.

- [11] Lunardi P. – Un nouveau système constructif pour la réalisation de tunnel de grande portée dans terrains non cohérents : l'arc cellulaire. Colloque international « Les fondations des grands ouvrages ». UNESCO, Paris, 27-29 mars 1990.
- [12] Lunardi P., *et al.* – Soft ground tunnelling in the Milan Metro and Milan Railway Link. Case histories. Soft Ground Tunnelling Course. Institution of Civil Engineers. Londres, 10-12 juillet 1990.
- [13] Colombo A., Lunardi P., Tesserin G.D., *et al.* – Preconsolidamento del terreno mediante jet-grouting nel sottopasso della Tangenziale Est di Milano da parte della Linea 3 della metropolitana. Comptes rendus du Congrès international sur « Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo ». Milan, 18-20 mars 1991.
- [14] Golinelli G., Lunardi P., Perelli Cippo A. – La prima applicazione del jet-grouting in orizzontale come precontenimento delle scavo di gallerie in terreni incoerenti. Comptes rendus du Congrès international sur « Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo ». Milan, 18-20 mars 1991.
- [15] Lunardi P. – L'impiego del jet-grouting per l'attacco di gallerie in terreni soffici. Comptes rendus du Congrès international sur « Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo ». Milan, 18-20 mars 1991.
- [16] Arseno F.P., Focaracci A., Lunardi P., Volpe A. – La prima applicazione in Italia del pretaglio meccanico. Comptes rendus du Congrès international sur « Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo ». Milan, 18-20 mars 1991.
- [17] Lunardi P. – Aspetti progettuali e costruttivi nella realizzazione di gallerie in situazioni difficili : interventi di precontenimento del cavo. Comptes rendus du Congrès international sur « Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo ». Milan, 18-20 mars 1991.
- [18] Lunardi P. – Il consolidamento del terreno mediante jet-grouting. *Quarry and Construction*, mars 1992.
- [19] Lunardi P., Focaracci A., Giorgi P., Papacella A. – Tunnel face reinforcement in soft ground design and controls during excavation. Comptes rendus du Congrès international sur « Towards New Worlds in Tunnelling ». Acapulco, 16-20 mai 1992.
- [20] Lunardi P., Bindi R., Focaracci A. – Technical and financial planning of underground works : The « ADECORS method ». VI Forum Europeo di Ingegneria Economica. Università Bocconi, Milan, 13-14 mai 1993.
- [21] Lunardi P. Nuovi criteri di progetto e costruzione per una corretta pianificazione delle opere in sotterraneo. SAMOTER : Comptes rendus du Congrès sur « La realizzazione delle grandi opere in sotterraneo ». Verone, 27-28 mai 1993.
- [22] Lunardi P. – Évolution des technologies d'excavation en souterrain dans des terrains meubles. Conférence au Comité marocain des Grands Barrages. Rabat, 30 septembre 1993.
- [23] Lunardi P. – Glass-resin tubes to stabilize the face of tunnels in difficult cohesive soils. SAIE : Seminar on « The application of fiber Reinforced Plastics (FRP) in civil structural engineering. Bologne, 22 octobre 1993.
- [24] Lunardi P. – La stabilité du front de taille dans les ouvrages souterrains en terrain meuble : études et expériences sur le renforcement du noyau d'avancement, Symposium international, Renforcement des sols : expérimentations en vraie grandeur des années 80, Paris, 18 novembre 1993.
- [25] AUTOSTRADE SpA. – Norme tecniche d'Appalto, 1992.
- [26] ITALFERR SIS TAV SpA. – Capitolato di Costruzione Opere Civili, 1992.
- [27] ANAS. – Capitolato Speciale d'Appalto. Parte II : Norme Tecniche, 1993.