

Prof. ing. Pietro Lunardi

**CONVERGENCE - CONFINEMENT OU EXTRUSION - PRECONFINEMENT ?**

Conferenza tenuta in occasione del Giubileo scientifico del Prof. Pierre Habib

Parigi, 19 maggio 1998

# Convergence-confinement ou extrusion-préconfinement ?

P. LUNARDI

Directeur Technique de Rocksoil - Milan, Italie

Professeur à l'Université de Parme

**RÉSUMÉ:** Cette communication illustre les études faites par l'auteur et par ses collaborateurs dans le but de transposer dans la pratique les évidences issues d'une recherche entamée il y a plus de 25 ans sur la cinématique de l'évolution des excavations en tunnel, recherches qui mettent avant tout en relief l'importance de la rigidité du noyau d'avancement pour le contrôle des phénomènes de déformation dans le tunnel et des charges sur les revêtements définitifs à long terme.

*" Il n'existe pas de tunnel facile ou difficile pour des motifs de hauteur de recouvrement ou de qualité de terrains à traverser. Il n'existe que des situations de contrainte et de déformation du massif dans lesquelles le contrôle de la stabilité des excavations peut être possible ou ne pas l'être, en fonction de la connaissance des équilibres naturels préexistants, d'une approche conceptuelle correcte et de la disponibilité de moyens appropriés d'excavation et de stabilisation ".*

## 1. Avant propos

Nous le savons bien, au cours de l'excavation d'un tunnel, l'avancement du front de taille provoque une perturbation dans le terrain qui se propage longitudinalement et transversalement en altérant le champ de contrainte préexistant dans le milieu. L'extension de la zone perturbée :

- est fonction :
  - de la géométrie et des dimensions de l'excavation,
  - des caractéristiques géomécaniques du terrain,
  - du champ de contrainte préexistant,
  - de la vitesse d'avancement du front de taille,
- elle est mesurée :
  - en amont du front de taille à partir du rayon d'influence  $R_f$  du front,

- en aval du front de taille à partir du rayon d'influence de la cavité  $R_c$ .

Il est permis de supposer –dans une première approximation et à l'exception des cas où la perturbation produite par l'excavation laisse le terrain dans le domaine élastique– que les deux rayons d'influence  $R_f$  et  $R_c$  correspondent au rayon de plastification  $R_p$  (figure 1).

A l'intérieur du volume de terrain limité par  $R_p$  les caractéristiques de résistance et de déformation du matériau diminuent jusqu'aux valeurs résiduelles, et cette chute s'accompagne d'un phénomène de foisonnement (dilatation) plus ou moins marqué selon le champ de contraintes initial et du type de terrain en jeu.

Par ailleurs, chose bien connue, le phénomène de la plastification du terrain est strictement lié à celui de la formation de l'effet de voûte et de l'évolution des phénomènes de déformation qui se manifestent dans le tunnel (réponse en déformation). Notamment, plus la bande de terrain sur le contour de la cavité est importante, et plus l'effet de voûte se forme loin de celle-ci et plus les phénomènes en déformation sont grands, ce qui entraîne des problèmes de stabilité de

$V$  = vitesse d'avancement

$R_f$  = rayon d'influence du front de taille

$R'_c$  = rayon d'influence de la cavité sans revêtement

$R_c$  = rayon d'influence de la cavité avec revêtement

$R_p$  = rayon de plastification  
 $f(\phi, c, \varphi, \gamma H, p_a, V)$

$R_f \rightarrow R_p$   
 $R_c \rightarrow R_p$

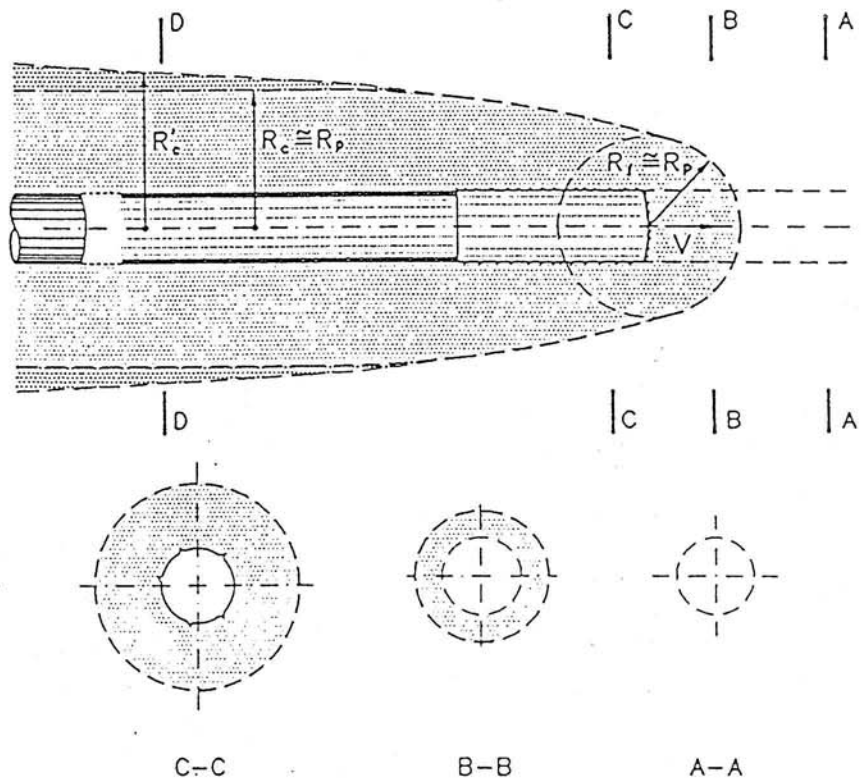
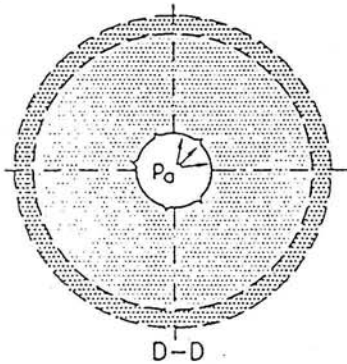


Figure 1.

la cavité et des poussées à long terme sur les revêtements (charges de fluage). Ce sont là des motifs qui doivent pousser le projeteur de tunnels à se préoccuper de réduire le plus possible la valeur  $R_p$  à court et à long terme.

La formulation de  $R_p$  sur le plan théorique et son contrôle sur le plan pratique ont fait l'objet de nombreuses études et applications.

En ce qui concerne la formulation de  $R_p$ , Kastner, en simplifiant le problème par une schématisation plane axisymétrique, fut le premier à en fournir une qui soit capable d'évaluer sa valeur, transversalement au tunnel, avec une précision suffisante dans une section en aval du front de taille, non influencée par la présence de ce dernier [1]. En particulier, avec la formule connue  $R_p = f(r_a, c, \phi, \gamma H, p_a)$ , il mit pour la première fois en évidence qu'en exerçant une pression radiale de confinement  $p_a$  à l'intérieur de la cavité, il était possible de contrôler le phénomène de la plastification du terrain sur son contour.

En conformité avec les indications de Kastner, par la suite adoptées par de très nombreux auteurs, des interventions actives de stabilisation à action radiale ont été proposées et utilisées pour le contrôle de  $R_p$  et de la réponse en déformation de la cavité, des interventions capables de produire la pression  $p_a$  de confinement nécessaire (boulonnage, béton projeté, etc.).

Cette façon d'affronter le problème (en réglant la pression radiale  $p_a$  de confinement de la cavité en fonction de la valeur de  $R_p$  que le projeteur décide d'accepter) a permis de résoudre avec succès l'excavation de tunnels dans des situations de contrainte et de déformation faibles ou moyennes, mais elle a montré ses limites face à des contraintes et des déformations d'une certaine importance ou extrêmes.

Mais, dans la mesure où le projeteur doit être capable de réduire  $R_p$  le plus possible (et, par voie de conséquence, la réponse en déformation du milieu), dans toutes les situations possibles de contrainte et de

déformation et pas seulement dans quelques unes, lorsqu'il doit faire face à des états importants ou extrêmes, il ne peut pas se contenter de l'approche adoptée jusqu'ici (laquelle prévoit seulement le contrôle de  $R_p$  en aval du front de taille, à l'aide d'actions et d'interventions de simple confinement de la cavité ou du front). Il est obligé d'affronter le phénomène de plastification et de réponse en déformation du milieu à l'endroit où il se produit, c'est-à-dire en amont du front de taille, en étudiant de nouvelles formulations pour  $R_p$  et en définissant de nouvelles actions et de nouvelles interventions pour le contrôler.

De ce point de vue, l'histoire du phénomène de plastification et de réponse en déformation qui s'ensuit est comparable à celle d'un être humain. Si nous voulons l'éduquer, il faut commencer à le faire dès sa plus tendre enfance. Si nous prétendons n'intervenir qu'au moment de sa maturité, nous risquons de perdre le contrôle de la situation et de manquer notre objectif.

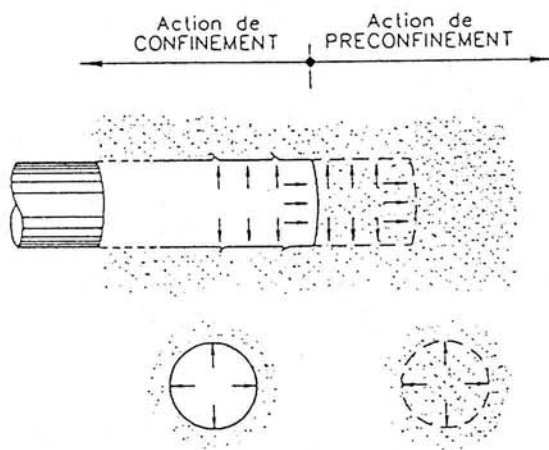


Figure 2.

Pour faire face au phénomène de plastification et à la réponse en déformation qui s'ensuit, à l'endroit même où ils se produisent, et pour réussir à les contrôler et à les maîtriser, même dans des situations de contrainte et de déformation difficiles, il est nécessaire de perfectionner considérablement la conception

et la construction des tunnels. Dès lors il devient impératif :

- de traiter le problème –dans la phase de diagnostic– non plus comme un problème plan, mais tridimensionnel, tel qu'il est dans la réalité, élargissant l'approche du projeteur par la mise au point de nouvelles méthodes permettant d'interpréter les phénomènes sur la base de leur évolution réelle. Dans les cas notamment où les états de contrainte provoqués par l'ouverture de la cavité, en fonction des caractéristiques de résistance et de déformabilité du milieu, permettent d'opérer en termes de simple confinement de la cavité, le projeteur pourra se limiter à étudier le problème en termes de "convergence-confinement" : s'il fallait opérer également en termes de confinement du front dans la mesure où l'on constate des phénomènes d'instabilité provoqués par des états de contrainte moyens ou faibles, le problème pourra être étudié selon des modèles d' "extrusion-confinement". Si enfin les états de contrainte sont élevés au point de rendre vaines les actions de confinement de la cavité et du front, le concepteur devra recourir à des actions de préconfinement de la cavité (figure-2) et le problème du dimensionnement et de la vérification des interventions de stabilisation nécessaires devra être abordé en adoptant de nouveaux modèles "extrusion-préconfinement" qui, bien qu'ayant déjà faits l'objet d'études de la part de nombreux auteurs, ont besoin d'être approfondis ;
- définir, dans la phase de thérapie, les nouvelles actions à produire en amont du front de taille (préconfinement de la cavité), ainsi que les interventions de stabilisation nécessaires pour les garantir. Interventions qui devront à leur tour se prolonger par des actions et des interventions classiques appliquées en aval du front de taille. En agissant

dans cette direction, il semble possible d'obtenir –à bon prix– des actions de pré-confinement de la cavité assez élevées, donc des rayons de plastification réduits qu'il sera par ailleurs facile et économique de conserver en aval du front au moyen d'ouvrages adéquats de revêtement (résultat maximum pour un effort minimum).

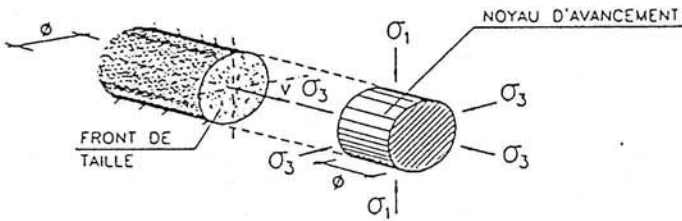


Figure 3.a : Définition du noyau d'avancement.

## 2- Études expérimentales et théoriques pour la mise au point d'une nouvelle approche de conception et de construction

Sur la base des critères qui viennent d'être exposés, pour résoudre les situations de contrainte et de déformation importantes ou extrêmes, grâce à la maîtrise opportune du phénomène de la plastification et des phénomènes de déformation qui s'ensuivent dès le début de leur développement en amont du front de taille, nous avons mis en place, depuis plus de vingt ans, une recherche expérimentale, développée à travers trois phases fondamentales, sur la base de critères absolument nouveaux [2], et qui a exigé pour sa mise en place la définition de nouvelles références indiquées sur la figure 3 :

- le noyau d'avancement : identifiable par le volume de terrain qui se trouve en amont du front de taille, dont la forme est pratiquement cylindrique, et les dimensions transversale et longitudinale sont de l'ordre du diamètre du tunnel ;
- l'extrusion : identifiable par la composante primaire de la réponse en déformation du milieu sous

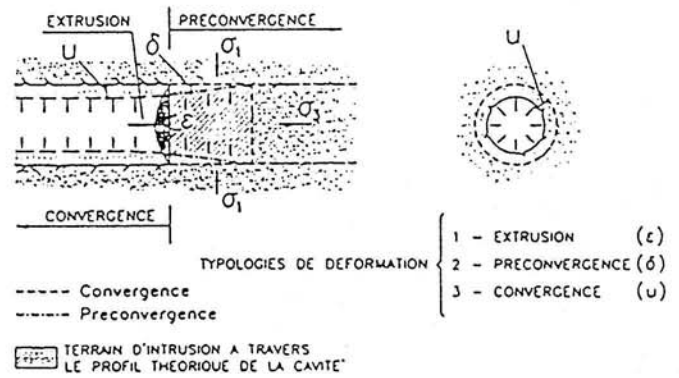


Figure 3.b : Définitions d'extrusion de préconvergence et de convergence.

l'action de l'excavation qui se développe dans une large mesure à l'intérieur du noyau d'avancement: en fonction de la résistance, de la déformabilité du noyau et du champ de contraintes initial auquel il est soumis, l'extrusion se manifeste au niveau de la surface délimitée par le front de taille, longitudinalement à l'axe du tunnel, avec des géométries de déformation plus ou moins axisymétriques (bombement du front) ou de basculement gravitationnel (rotation du front) :

- la préconvergence de la cavité : identifiable par la convergence du profil théorique d'excavation en amont du front, qui dépend étroitement des caractéristiques de résistance et de déformabilité du noyau d'avancement en rapport avec l'état de contrainte initial.

La " première phase de recherche " fut consacrée à l'observation systématique du comportement en déformation du système front de taille-noyau d'avancement sans se limiter à la cavité conformément à la pratique courante.

Par la suite, lors de la " deuxième phase de recherche ", sur la base d'analyses approfondies –essentiellement sur un plan chronologique– des phénomènes d'instabilité observés dans l'exécution de 400 km de tunnels au moins, dans les terrains les plus divers et dans les situations de contrainte et de défor-

mation les plus diverses, il a été tenté de vérifier l'existence de liens entre le comportement en déformation du système front de taille-noyau d'avancement (extrusion et préconvergence) et celui de la cavité (convergence).

Une fois constaté que le comportement en déformation de la cavité est systématiquement conditionné par la rigidité du noyau de terrain au front de taille, lors d'une troisième étape, appelée "troisième phase de recherche", le travail a consisté à vérifier jusqu'à quel point, en agissant sur la rigidité, donc sur la déformabilité du noyau d'avancement (extrusion, préconvergence), il était possible de régler l'extension du phénomène de plastification du terrain et par la même occasion de contrôler la réponse en déformation de la cavité (convergence).

A ce stade, il devenait impératif de concentrer toute l'attention sur le comportement du noyau d'avancement.

### 2.1- *Les études expérimentales au cours de la troisième phase de recherche*

En présence d'interventions de protection (prévoûte de jet-grouting, prédécoupage mécanique, etc.) et de renforcement (clouage par éléments structuraux en fibres de verre, injections traditionnelles, etc.), le comportement du noyau d'avancement, systématiquement lié à celui de la cavité, a été étudié au cours de la troisième phase de recherche, vis-à-vis de la stabilité et de la déformation, au moyen d'une série de contrôles et de mesures expérimentales, *in situ* et en laboratoire.

#### 2.1.1. Expérimentation en vraie grandeur au cours de la troisième phase de recherche

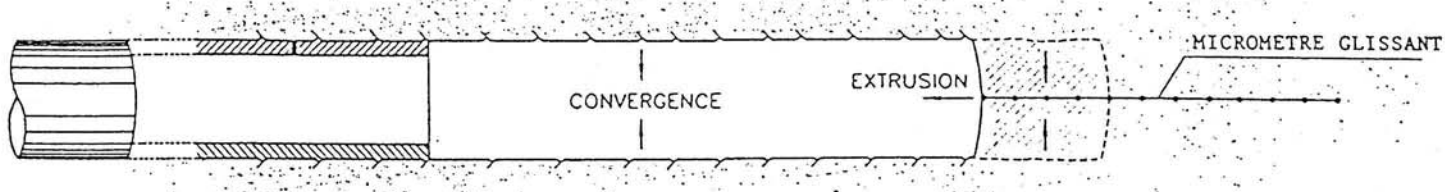
En termes de stabilité, le comportement du noyau d'avancement a été analysé en suivant une approche basée sur l'observation qui nous a permis de classer plus de mille fronts de taille et d'en résumer les caractéristiques les plus saillantes dans des fichiers judicieusement prédisposés.

En termes de déformation, ce comportement a été étudié à travers la réalisation systématique de :

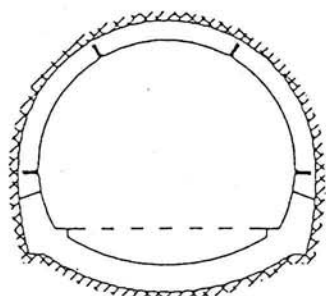
- mesures d'extrusion, obtenues en équipant le noyau d'avancement d'un dispositif horizontal de mesure de l'extrusion (type micromètre glissant) sur une longueur de 2 à 3 diamètres d'excavation. Ces mesures fournissent, en termes absolus, la déformation longitudinale subie par le terrain constituant le noyau d'avancement tant dans la phase statique (front arrêté) que dans la phase dynamique (front en avancement) ;
- relevés topographiques des déplacements absolus du front de taille, à l'aide de mires optiques, effectués à l'occasion des arrêts de l'avancement ;
- mesures de préconvergence, toutes les fois que la morphologie du terrain et l'importance de la couverture en jeu le permettaient, à partir de la surface, grâce à la mise en place d'extensomètres multibases, introduits verticalement dans le terrain au niveau de la clef et des flancs du tunnel en cours de construction, très en avance sur le passage du front [3].

Naturellement, toutes ces mesures s'accompagnaient toujours des mesures traditionnelles de convergence, et de mesures de contrainte dans les revêtements.

PHASE DE VERIFICATION

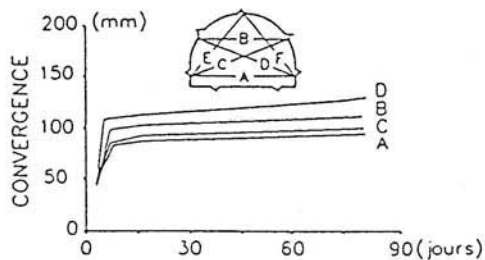


MESURES DE CONTRAINTE DANS LE REVÊTEMENT DÉFINITIF



— VERIN PLAT

MESURES DE CONVERGENCE



MESURES D'EXTRUSION

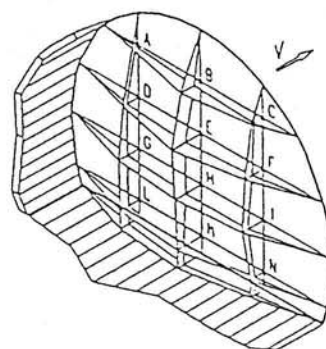
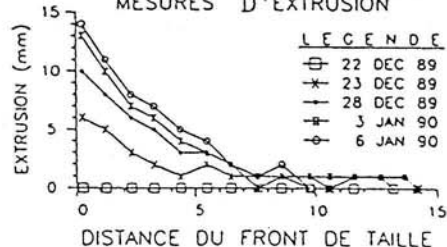


Figure 4 :

Mesures pour l'étude de l'influence de la rigidité du système front de taille-noyau d'avancement sur les charges qui agissent à long terme sur le revêtement définitif.

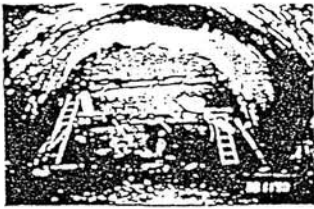
La figure 4 illustre la séquence des contrôles de contrainte et de déformation qui ont été adoptés toutes les fois qu'il s'avérait nécessaire de relever dans quelle mesure la rigidité du noyau agissait sur les charges qui s'exerçaient sur le prérevêtement et sur le revêtement définitif.

Ce type d'expérimentations en vraie grandeur nous a permis (figure 5) :

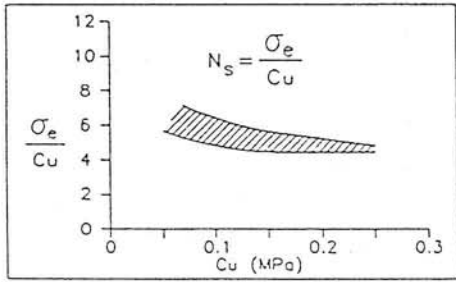
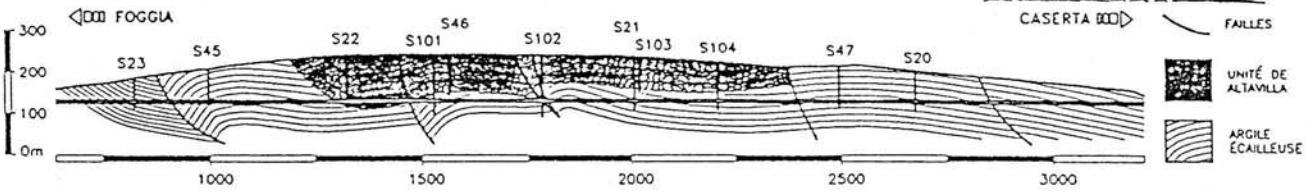
- de confirmer sans le moindre doute, à travers la construction de diagrammes spéciaux extrusion-convergence, l'existence d'une corrélation étroite entre l'importance des déformations d'extrusion permises au noyau d'avancement, et l'importance des convergences qui se manifestent après le pas-

sage du front et en particulier le fait que celles-ci diminuent avec l'augmentation de la rigidité du noyau.

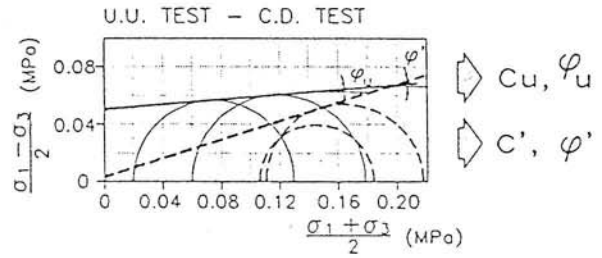
- D'évaluer, en termes absolus, à travers de simples calculs volumétriques, la préconvergence, autrement dit la convergence déjà subie par le profil théorique du tunnel avant le passage du front de taille, même lorsqu'il n'était pas possible de la mesurer directement de la surface [4].
- De vérifier le fait que l'augmentation de l'importance de l'action de préconfinement de la cavité et la réduction qui s'ensuit de la bande de terrain plastifié sur le contour du tunnel sont suivies par une charge proportionnellement inférieure sur les revêtements de la première phase et sur les revêtements définitifs [4].



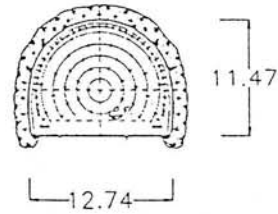
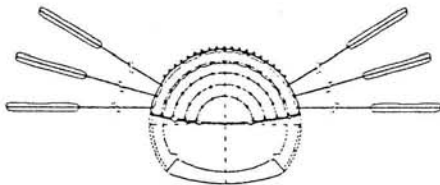
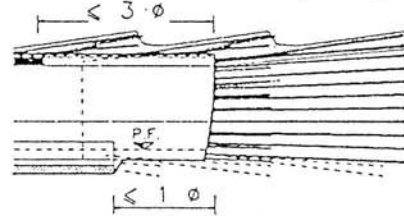
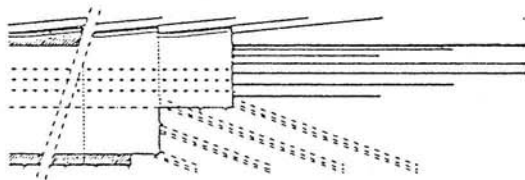
# LIGNE F.S. CASERTA-FOGGIA TUNNEL S.VITALE



PROJECT (1990)

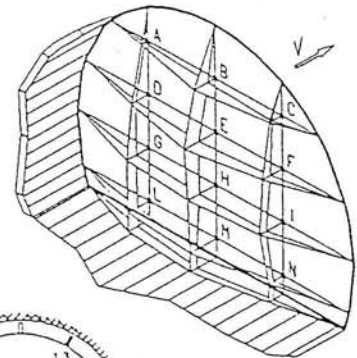
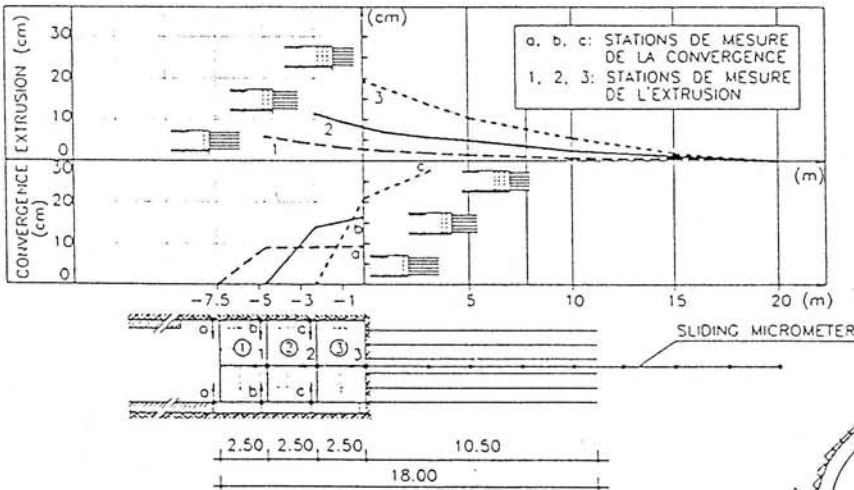


PROJECT ROCKSOIL (1992)



DIAGRAMMES EXTRUSION-CONVERGENCE

MESURES TOPOGRAPHIQUES SUR LE FRONT DE TAILLE



EFFORTS DANS LE REVÊTEMENT DÉFINITIF (bar)

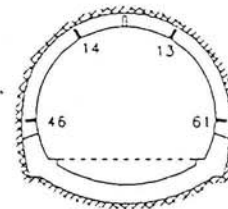


Figure 5 : Études expérimentales sur le tunnel S. Vitale.



### 2.1.2 L'expérimentation à échelle réduite durant la troisième phase de recherche

Parallèlement aux études expérimentales en vraie grandeur, des expérimentations à échelle réduite ont été faites pour analyser à fond tous les aspects du phénomène de l'extrusion du front de taille dans le tunnel.

En laboratoire, le phénomène a été déjà étudié exclusivement sur le plan du seuil de contrainte d'amorçage, par Broms et Bennermark en 1967, et par Attewell et Boden en 1971 [5], [6]. Ils étaient parvenus à la définition du coefficient de stabilité  $N_s = f(\sigma_1, \sigma_3, c_u)$  au moyen duquel il semblait possible de faire des prévisions sur l'amorçage du phénomène d'extrusion dans le tunnel.

Cette méthode, appliquée à l'étude de nombreux tunnels alors en construction pour les nouvelles lignes de chemin de fer Sibari-Cosence et Florence-Arezzo, bien que s'étant révélée fiable dans le domaine des argiles pures, s'avérait –les auteurs sont les premiers à le reconnaître– peu utile pour prévoir, dans la phase du projet, l'importance du phénomène d'extrusion en termes d'évolution de la déformation.

Pour dépasser les limites de cette méthode, il a été nécessaire de mettre au point de nouveaux modèles expérimentaux, capables de reproduire avec une plus grande précision la situation réelle du front de taille, et de fournir des indications préliminaires sur l'importance des actions à entreprendre pour contrôler le phénomène d'extrusion. Nous avons donc étudié et mis au point deux nouveaux essais :

- 1- l'essai d'extrusion en cellule triaxiale ;
- 2- l'essai d'extrusion en centrifugeuse.

Dans l'essai d'extrusion en cellule triaxiale (figure 6), l'échantillon de terrain est intro-

duit dans la cellule en reconstituant l'état de contrainte initial  $\sigma_0$  du massif. Grâce à la pression d'un fluide, cet état de contrainte  $\sigma_0$  est reproduit également à l'intérieur d'un volume cylindrique particulier, appelé chambre d'extrusion, creusé avant l'essai à l'intérieur de l'échantillon et coaxial par rapport à lui, qui simule le tunnel dans la zone du front de taille.

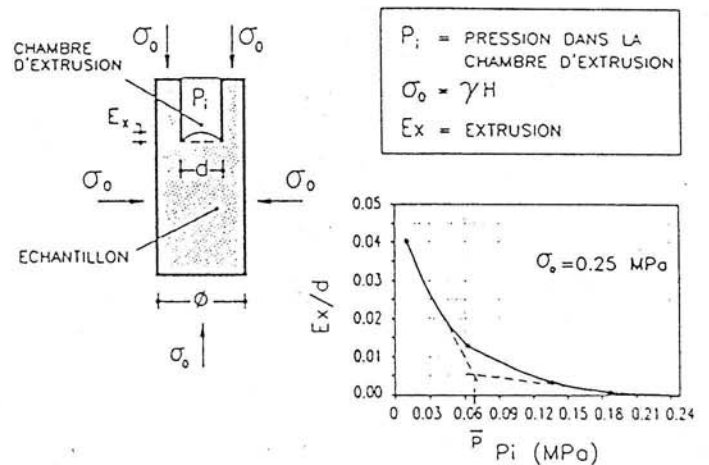


Figure 6 : Essai d'extrusion en cellule triaxiale.

Maintenant l'état de contrainte sur le contour de l'échantillon et réduisant progressivement la pression du fluide à l'intérieur de la chambre d'extrusion, on simule d'une manière réaliste la détente progressive qui se produit dans le milieu, au niveau d'une certaine section au fur et à mesure que l'on s'approche du front de taille, et on obtient une évaluation de l'importance du phénomène d'extrusion du front de taille en fonction du temps. On peut tracer également des diagrammes en fonction de la diminution de la pression interne de confinement, en obtenant des courbes semblables à celles de la figure 6, qui peuvent être immédiatement utilisées dans la phase de conception du projet pour évaluer la pression de préconfinement de la cavité nécessaire pour assurer une certaine rigidité du noyau et pour obtenir, par voie de conséquence, le contrôle voulu des préconvergences.

L'analyse des résultats fournis par les nombreux essais d'extrusion menés en cellule triaxiale permet de formuler les conclusions suivantes :

- vu les dimensions modestes de l'échantillon, les essais portent principalement sur la matrice du massif qui doit être essentiellement argileuse ;
- l'hétérogénéité éventuelle du terrain (schistosité, terrain écaillé, etc.) n'est compatible avec l'essai que si ses dimensions sont négligeables par rapport à celles de l'échantillon ;
- plus les caractéristiques du massif sont homogènes, et plus les résultats de l'essai peuvent se rapporter à l'échelle réelle.

Les essais d'extrusion en centrifugeuse ont été mis au point et réalisés pour les cas où il est nécessaire de tenir attentivement compte de l'effet de la gravité sur le phénomène de l'extrusion. Leur complexité et leur coût élevé limitent leur emploi à des cas spécifiques peu nombreux.

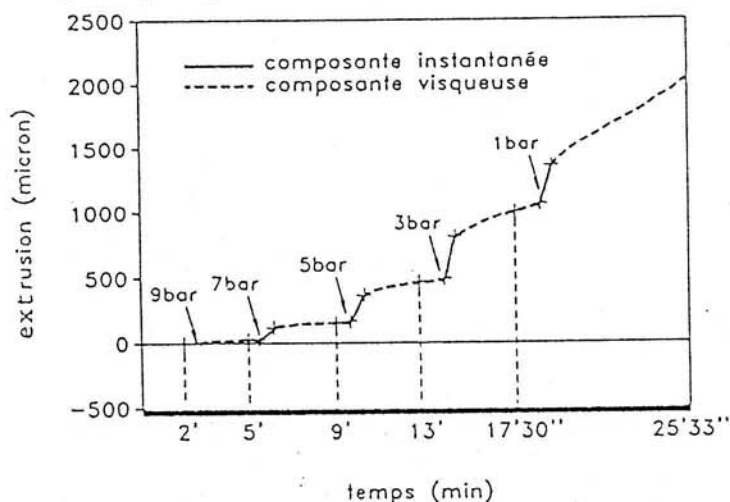


Figure 7 : Essai d'extrusion en centrifugeuse.

Les résultats obtenus (la figure 7 reproduit les résultats relatifs à un essai d'extrusion en centrifugeuse fait sur un échantillon reconstitué) montrent que l'extrusion du front se manifeste rapidement dans une décharge transitoire, à une vitesse qui augmente avec la progression du relâchement du noyau. La figure distingue, pour chaque pas de décharge, la composante instantanée de la déformation de l'extrusion et la composante visqueuse. On voit facilement qu'à la fin de l'essai, cette dernière est égale à 50% de l'extrusion totale.

Les essais d'extrusion, qu'ils soient triaxiaux ou en centrifugeuse, intégrés à de simples modèles mathématiques aux éléments finis, se sont révélés aussi extrêmement utiles pour l'étalonnage des paramètres géomécaniques ( $c$ ,  $\phi$ ,  $E$ ) à utiliser dans les calculs suivants de la conception (phases de diagnostic et thérapie) en ce qui concerne notamment les modules élastiques dans la phase de déchargement, qui simulent mieux le comportement réel du massif au cours de l'excavation.

### 2.1.3 Résultats des études expérimentales

Grâce aux nouveaux instruments de mesure et d'investigation, mis au point et utilisés au cours de l'expérimentation en vraie grandeur et à échelle réduite, la recherche expérimentale sur le noyau d'avancement considéré en tant que clé de lecture pour l'interprétation des phénomènes de déformation dans le tunnel à court et à long terme a fourni des résultats extrêmement intéressants.

Très rapidement, ces résultats :

- ont souligné que la réponse en déformation du massif à l'excavation n'est pas seulement de la convergence. Elle inclut extrusion, préconvergence et convergence ; la convergence n'est que le dernier stade d'un processus de contrainte et de déformation plutôt complexe ;
- ont révélé que cette réponse en déformation naît en amont du front, au niveau du noyau d'avancement et évolue en aval de celui-ci, à la même cadence que le phénomène de plastification du terrain le long de la cavité ;
- ont clairement indiqué l'existence d'un lien direct entre l'évolution de la plastification et de la réponse en déformation du système front de taille-noyau d'avancement qui suit (extrusion et préconvergence) et celle de la cavité (convergence). en ce sens que cette dernière est la conséquence directe

de la première, soulignant ainsi l'importance de garder sous contrôle  $R_p$  et la réponse en déformation du système front de taille-noyau d'avancement, sans se limiter au seul contrôle de la cavité ;

- ont démontré qu'en agissant sur la rigidité du noyau d'avancement par des interventions de protection et de renforcement, il est possible de contrôler sa déformabilité (extrusion, préconvergence), et donc de contrôler également le phénomène de plastification du terrain et, par conséquent, la réponse en déformation de la cavité (convergence) dans la mesure où il a été clairement établi que l'importance des charges agissant à long terme sur le revêtement dépend surtout de la rigidité du noyau.

En définitive, ces résultats permettent d'envisager le noyau d'avancement comme un nouvel instrument de stabilisation à court et à long terme de la cavité. Un instrument dont la résistance et la déformabilité jouent un rôle déterminant car capable de conditionner l'aspect qui doit, plus que tout autre, préoccuper le projecteur de tunnel à savoir le comportement du système front de taille-noyau d'avancement.

Au fur et à mesure que ces évidences expérimentales étaient acquises, il devenait de plus en plus clair que les modèles théoriques généralement proposés dans la littérature ne suffisaient pas à fournir des réponses adéquates. On a donc procédé parallèlement à mettre au point des modèles (analytiques ou numériques) capables d'offrir un encadrement théorique général aux phénomènes observés *in situ*. En opérant de la sorte, nous avons pu éviter de commettre des erreurs qui auraient pu être inévitables avec une approche théorique dépourvue des bases expérimentales indispensables du fait de l'insuffisance des modèles mathématiques utilisés et de leur incapacité de représenter la complexité du phénomène réel.

## 2.2 Études théoriques

### 2.2.1. Études utilisant des approches analytiques

Après avoir recueilli les évidences et les résultats expérimentaux en nombre suffisant, pour donner une interprétation correcte des phénomènes qui régissent le lien établi entre rigidité du système front de taille-noyau d'avancement d'une part, et les charges agissant à long terme sur les revêtements provisoires et sur les revêtements définitifs d'un tunnel de l'autre, nous avons essayé de leur donner un encadrement théorique général dépassant les limites des théories courantes.

Pour commencer, nous avons essayé de résoudre le problème grâce à la mise à jour des approches de calculs analytiques déjà existantes. Nous avons notamment essayé d'introduire le concept de noyau et de consolidation du noyau dans certaines des formulations classiques utilisées pour le dimensionnement des tunnels. Nous l'avons fait, par exemple, dans celle de la Méthode Convergence-Confinement [7] et dans celle de la Méthode des Lignes Caractéristiques [8] ; cette dernière étant la seule où le concept de noyau apparaît explicitement.

Ces formulations ont permis toutes deux de simuler les effets de la consolidation du noyau et de reproduire quelques unes des observations expérimentales, en particulier la réduction du rayon de plastification  $R_p$  et des déformations dans la zone du front de taille.

Cependant, le calcul sépare la situation de contrainte et de déformation au front de la situation loin du front (figure 8) et, de ce fait, les deux méthodes ne se sont pas révélées capables de décrire correctement le système dans son ensemble et en particulier de se souvenir, dans les formulations valables pour la zone de la cavité loin du front, des effets de ce qui s'est produit en amont du front [4].

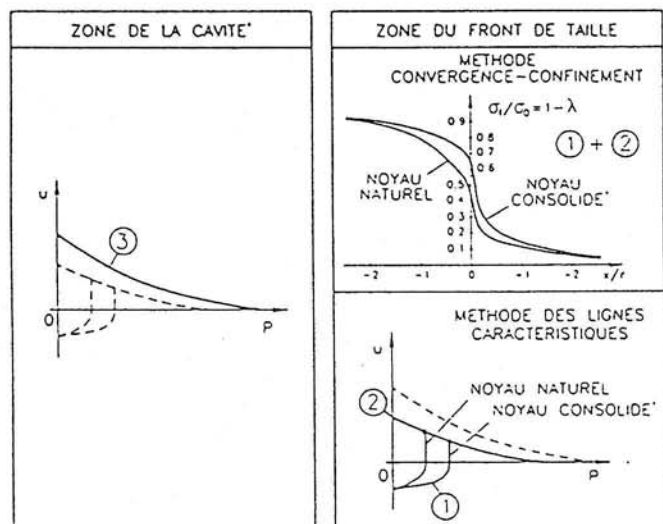
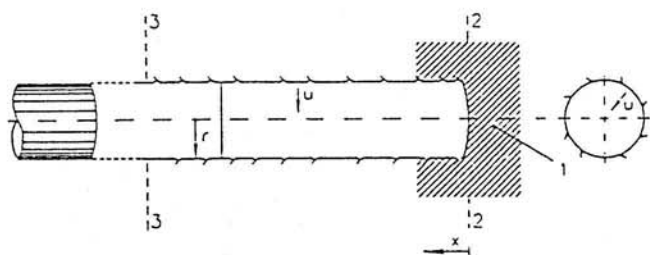


Figure 8 :

Les méthodes analytiques traditionnelles n'étudient pas avec des approches satisfaisantes la réponse en déformation dans la zone du front de taille et dans la zone de cavité.

Nous nous référons en particulier à la diminution du rayon de plastification  $R_p$ , à la réduction consécutive des déformations de la cavité (convergence) et des charges agissant sur les revêtements provisoires et sur les revêtements définitifs, phénomènes qui ne parviennent pas à se refléter dans les résultats obtenus à travers les deux formulations analytiques considérées et qui, en revanche, ont été systématiquement mis en évidence par les mesures expérimentales [4].

Il a donc fallu conclure que si les deux approches peuvent être utilement utilisées dans la phase de diagnostic pour définir le comportement du matériau lors de l'excavation, en l'absence d'interventions de préconfinement de la cavité, elles ne sont pas aussi efficaces dans la phase de la thérapie, en présence de ces interventions parce qu'elles ne permettent pas de prévoir avec une précision suffisante l'importance des

phénomènes de déformation de la cavité et pas davantage de dimensionner correctement les revêtements provisoires et les revêtements définitifs.

Il a été décidé d'abandonner ce type d'approche et de prendre la voie des modèles numériques (éléments finis ou différences finies) qui permettent de tenir compte avec une continuité certaine de toute l'histoire des contraintes et des déformations du milieu sur le contour de l'excavation, en passant de la zone amont à la zone aval du front de taille.

### 2.2.2. Études utilisant des approches numériques sur des modèles axisymétriques

L'effet de la consolidation du noyau a donc été étudié au moyen de modèles numériques aux éléments finis et aux différences finies. Nous avons commencé par utiliser des modèles de type axisymétriques, plus faciles à manier que les modèles tridimensionnels.

Il n'était pas possible ainsi de dépasser certaines limites propres aux approches analytiques déjà citées (cavité parfaitement circulaire, conditions d'état uniforme de contrainte du massif sur son contour, impossibilité d'envisager l'application de revêtements différents de l'anneau fermé et donc de simuler les phases de construction réelles).

Malgré cela, l'utilisation de ces modèles a mis en évidence que la consolidation du noyau produit une distribution différente des contraintes en amont du front et sur le contour de la cavité (figure 9) permettant enfin de confirmer, également par le calcul, qu'il se produit, tant en amont qu'en aval du front, une réduction de l'étendue de la gaine de terrain en comportement plastique et de tous les phénomènes de déformation sur le contour des excavations (non seulement de l'extrusion et de la préconvergence mais également de la convergence). En plus de cela, les analyses sur les modèles numériques axisymétriques ont révélé

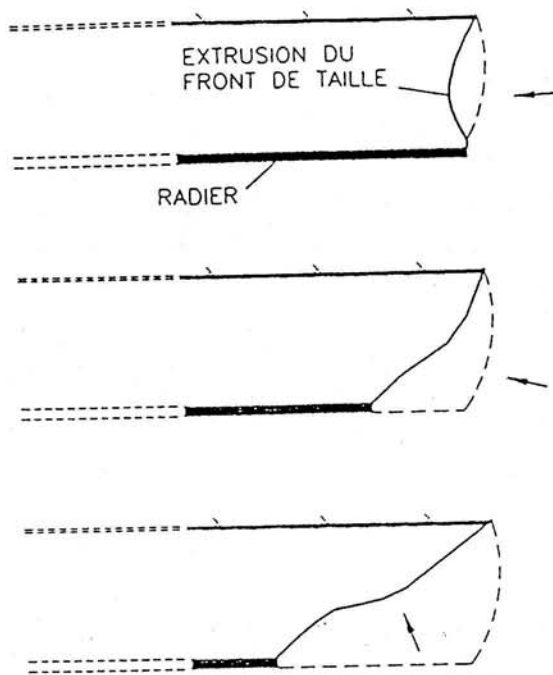


Figure 10 :  
Mécanismes de rupture du front de taille  
en fonction de la distance de pose du radier.

Les résultats obtenus grâce aux modèles 3D révèlent en général un bon accord avec les observations expérimentales tant en ce qui concerne les déformations (extrusions, préconvergences et convergences) qu'en ce qui concerne les contraintes sur les ouvrages de revêtement de la cavité qui sont plus réduites en présence d'une consolidation du noyau d'avancement, ce que la recherche expérimentale a mis en évidence.

Nous illustrons rapidement, à titre d'exemple, quelques résultats significatifs obtenus avec les modèles tridimensionnels pour le tunnel de S. Vitale (figure 5).

Le modèle aux éléments finis, constitué de 6393 éléments isoparamétriques à 8 nœuds simule l'excavation du tunnel sous 100 m de couverture. Le renforcement du front est constituée de 90 éléments structurels en résine armée de fibres de verre (VTR) scellés au front et de 96 autres éléments toujours en fibres de verre, munis de valves et injectés sur le contour du profil théorique de l'excavation.

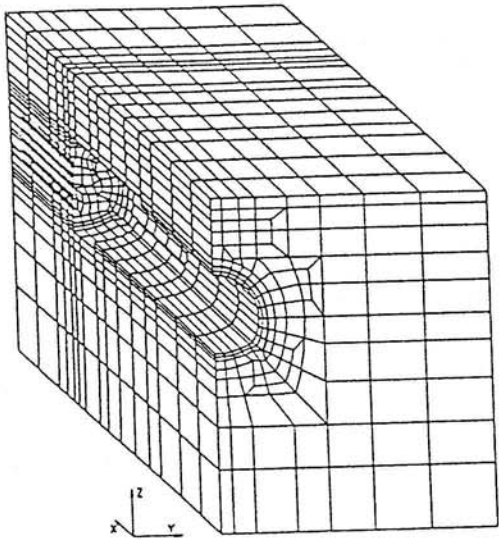
Grâce à l'examen des courbes extrusion-volée et extrusion-nombre d'éléments en VTR, les analyses nous ont permis de définir le nombre correct et la longueur appropriée de superposition des éléments en VTR à mettre en place. Il est effectivement évident qu'il existe une longueur et un nombre de boulons minimum au-dessous duquel s'amorce l'instabilité du système noyau-cavité et qu'un bon dimensionnement de l'intervention de consolidation du noyau ne peut être obtenu que grâce à des diagrammes de ce type (figure 11).

#### 2.2.4 Résultats des études théoriques

Les études théoriques menées nous ont permis de confirmer, y compris par le calcul, les observations expérimentales concernant les effets suivants de la consolidation du noyau :

- réduction des phénomènes de déformation (extrusion, préconvergence et convergence) ;
- réduction de l'étendue de la zone à comportement plastique ;
- réduction des charges sur les revêtements de la première phase et sur les revêtements définitifs (par fluage dans la zone à comportement plastique).

Ces résultats ont pu être obtenus en schématisant directement l'intervention de consolidation du front par des modèles numériques tridimensionnels, les seuls qui se soient révélés à même de fournir une simulation exhaustive et fidèle du comportement de contrainte et de déformation d'un tunnel dans la phase d'avancement et de permettre, même en cas d'adoption d'interventions de préconfinement de la cavité, un dimensionnement correct des revêtements de la première phase et des revêtements définitifs de la cavité.



- GÉOMÉTRIE ET ÉTAT DE CONTRAINTE RÉELS
- DIMENSIONNEMENT DES CONSOLIDATIONS, PRÉREVÊTEMENTS
- REVÊTEMENTS FINAUX
- VÉRIFICATION DU RENFORCEMENT DU NOYAU
- SIMULATION DES CADENCES OPÉRATIONNELLES

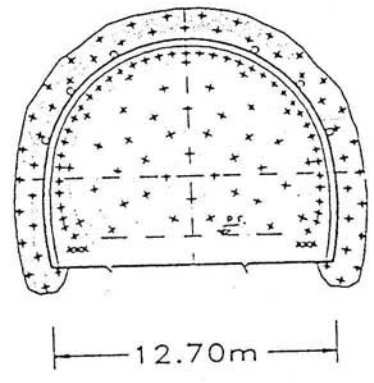
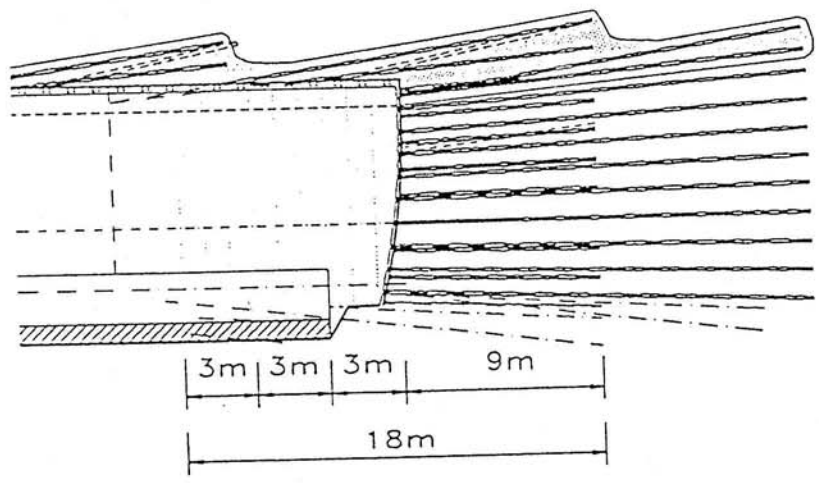
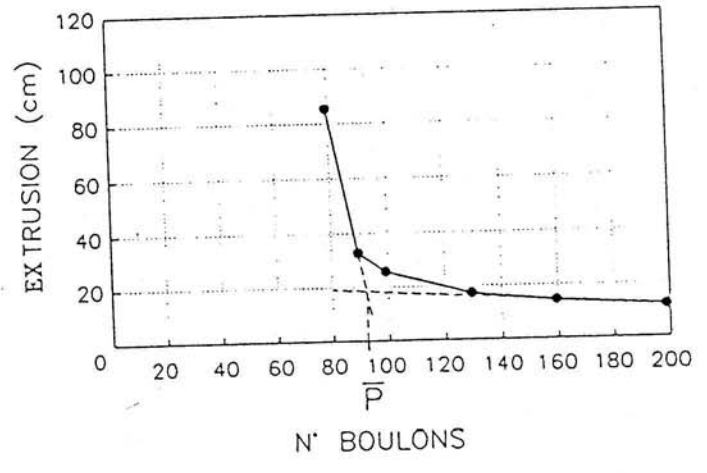
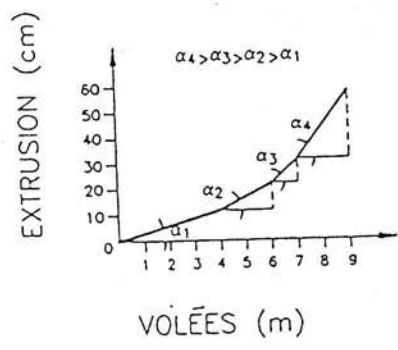


Figure 11 : Tunnel de San Vitale : Analyse MEF tridimensionnelle (3D).

Bien que ces types de modèles soient pour l'instant difficiles à manier malgré les progrès accomplis ces dernières années par l'informatique, il semble que ce soit la démarche juste pour obtenir une simulation correcte de l'excavation d'un tunnel en présence de consolidation du noyau.

L'utilisation de modèles numériques plus simples ne permet effectivement pas d'appréhender d'une manière suffisante la complexité des phénomènes qui se produisent. Mieux. Les approches analytiques les plus connues (lignes caractéristiques, méthode convergence-confinement) sont difficilement utilisables pour ce type d'études du fait de la non cohérence évidente entre les formulations du comportement de contrainte et de déformation de la cavité au niveau du front et loin du front.

### 3. Conclusions

L'analyse et l'étude des résultats obtenus à travers les observations sur le chantier, les expérimentations à échelle réelle et en laboratoire, les modèles analytiques et numériques ont confirmé avec certitude l'existence de liens entre phénomènes de plastification et phénomènes de déformation du terrain en amont et en aval du front de taille.

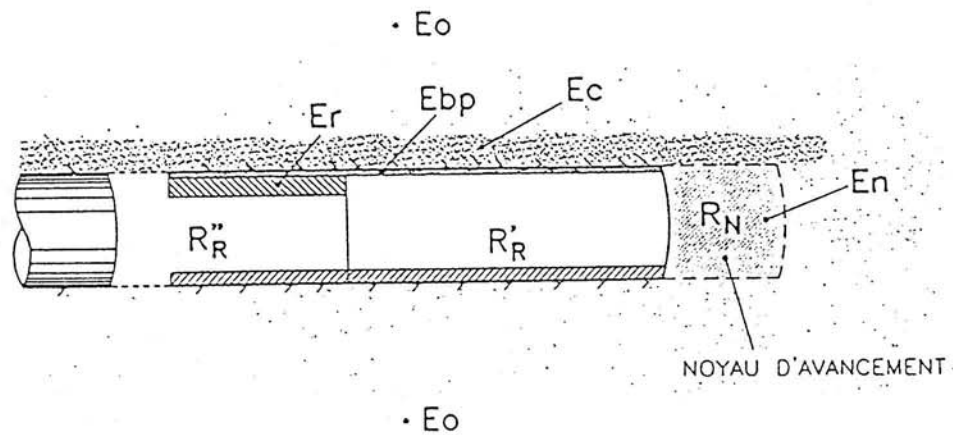
Nous avons notamment pu montrer, tout particulièrement dans des conditions de contrainte et de déformation difficiles, qu'en augmentant la rigidité du système front de taille-noyau d'avancement par des interventions de renforcement, il est possible d'obtenir une réduction significative de l'importance de la bande de terrain plastifié sur le contour de l'excavation, en amont et en aval du front, ce qui se traduit par des phénomènes de déformation et d'extrusion, de préconvergence et de convergences ainsi que par des avantages considérables au niveau des contraintes sur les revêtements définitifs, à court et à long terme.

Ces nouvelles connaissances ont débouché sur l'Analyse des DEformations COntrollées dans les Roches et dans les Sols (ADECO-RS), une approche de conception et de construction de tunnels innovante dont l'application a déjà permis de réaliser différents tunnels dont la faisabilité avait été mise en question par des échecs sérieux essayés lorsqu'on les affrontait par les critères traditionnels (NATM, etc.).

Les publications de la bibliographie [2], [9], [4], [10], [11], [12], permettent d'approfondir la connaissance de cette approche innovante non sans souligner que pour tirer réellement profit de l'application des critères d'avancement proposés (conserver ou améliorer la rigidité du noyau d'avancement et le faire d'autant plus que les conditions de contrainte et de déformation sont plus difficiles) il est indispensable de les appliquer avec toute la cohérence nécessaire.

Cela signifie que contrairement à notre habitude d'agir sur la base de critères d'avancement traditionnels qui permettent au noyau de se déformer et qui nous obligent à mettre en place des revêtements flexibles pour enrayer les phénomènes de déformation déjà amorcés, l'application des nouveaux concepts d'avancement en présence d'un noyau rigide exige impérativement –si nous ne voulons pas perdre en aval du front l'avantage obtenu en amont en renforçant le noyau– de mettre en place des revêtements tout aussi rigides et de veiller avec la plus grande attention à ce que la continuité de l'action de préconfinement de la cavité se fasse le plus uniformément possible (figure 12).

Nous voyons dès lors que l'action de préconfinement et l'action de confinement de la cavité ne sont pas en opposition entre elles et qu'elles sont même complémentaires. A la question convergence-confinement ou extrusion-préconfinement posée par le titre de cette étude, la seule réponse possible est que ces



$R_N$  = rigidité du noyau d'avancement

$R'_R$  = rigidité du revêtement de première phase

$R''_R$  = rigidité du revêtement définitif

$E_o$  = module d'élasticité du terrain naturel

$E_n$  = module d'élasticité du terrain qui constitue le noyau d'avancement

$E_c$  = module d'élasticité du terrain prérenforcé au contour de la cavité

$E_{bp}$  = module d'élasticité du béton projeté

$E_r$  = module d'élasticité du béton

Figure 12 : La rigidité des revêtements doit être comparable à celle du noyau d'avancement.

deux critères d'approche doivent en fait être eux aussi encadrés dans une vision unitaire. Si la situation de contrainte et de déformation à laquelle sera soumis le noyau d'avancement est faible (extrusions et préconvergences prévues négligeables), il pourrait s'avérer suffisant de la traiter par les méthodes traditionnelles

de Convergence-Confinement. Dans le cas contraire, (extrusions et préconvergences prévues d'une certaine importance voire résolument élevées) il deviendra impératif de l'affronter selon la méthode plus appropriée d'extrusion-préconfinement.



## Bibliographie

- [1] KASTNER H., "Statik des Tunnel -und Stollenbaues, 1962
- [2] LUNARDI P. "Conception et exécution des tunnels d'après l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les sols - Deuxième partie: Rôle et résultats de la recherche expérimentale", Quarry and Construction, mars 1995
- [3] 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
- [4] LUNARDI P., "L'influence of the rigidity of the advance core on the safety of tunnel excavation", Gallerie e grandi opere sotterranee, n° 52, 1997
- [5] BROMS B.B., BENNERMARK H., "Stability of clay at vertical openings". Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, 1967.
- [6] ATTEWELL P.B., BODEN J.B., "Development of the stability ratios for tunnels driven in clay". Tunnels and Tunneling, 1971.
- [7] PANET M., "Le calcul des tunnels par la méthode convergence-confinement", Ponts et chaussées, 1995
- [8] LOMBARDI G., AMBERG W.A., "Une méthode de calcul élasto-plastique de l'état de tension et de déformation autour d'une cavité souterraine", Congresso Internazionale ISRM, Denver, 1974
- [9] LUNARDI P., "Conception et exécution des tunnels d'après l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les sols - Première partie: Présoutènement et préconfinement", Quarry and Construction, mars 1994 ou Revue Française de Géotechnique, n° 80, 1997.
- [10] LUNARDI P., "Preconfinement of an excavation in relation to new orientations towards the design and construction of tunnels". Gallerie e grandi opere in sotterraneo, n° 45, 1995.
- [11] LUNARDI P. "Conception et exécution des tunnels d'après l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les sols - Troisième partie: Proposition de la nouvelle approche", Quarry and Construction, avril 1996
- [12] LUNARDI P., BINDI R., FOCARACCI A., "Technical and financial planning of underground works. The ADECO-RS Method", 6th European Forum on Cost Engineering, Milan, mai 1993
- [13] LUNARDI P., "Fibre-glass 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
- [14] 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