

**P. LUNARDI**  
*Rock Soil*  
Via Petrarca, 3  
24100 Bergame (Italie)

# Conception et exécution des tunnels d'après l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les sols : proposition d'une nouvelle approche

## Résumé

Les procédures de conception et d'exécution, adoptées jusqu'ici, se basent sur des critères de classification uniquement géologiques et géomécaniques et ignorent pratiquement les nouvelles technologies dont l'on dispose aujourd'hui. Elles ne se sont pas révélées appropriées pour satisfaire les exigences auxquelles elles doivent répondre. Prenant note de ce fait, l'auteur explique brièvement les principes directeurs d'une nouvelle approche de conception et d'exécution, basée sur l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les sols.

---

## Design and construction of tunnels using the method based on the analysis of controlled deformation in rocks and soils : proposal for a new approach

## Abstract

Design and construction procedures adopted until now have been based on exclusively geological and geomechanical classification criteria and take no account of new technologies that are available. Furthermore, they have not in reality been adequate for the functions they are required to fulfil. In this article, the author, starting from this premise, briefly explains the basic principles of a new design and construction approach based on the analysis of controlled deformations in rocks and soils.

## Introduction

Les deux premières parties de cette étude montrent qu'on a assisté ces dernières années à des nouveautés importantes en matière de conception et de construction d'ouvrages souterrains. On peut les résumer en trois points :

1. Importance reconnue de la rigidité du noyau sur le comportement en déformation d'un tunnel au cours du creusement : des résultats positifs ont été obtenus grâce à l'utilisation du noyau en tant qu'instrument efficace de stabilisation, quel que soit le type de terrain.

2. Affirmation du concept de préconfinement de la cavité et, par voie de conséquence, mise au point d'instruments de stabilisation innovants, permettant la construction.

3. La possibilité qui en découle d'aborder en toute sécurité la construction des tunnels dans des terrains de toute espèce, quels que soient les contextes et les conditions de contrainte et de déformation.

Pour être largement accueillies et exploitées, ces nouveautés importantes obligent à mettre au jour les modèles de conception et de construction traditionnels et à mettre en place une approche différente qui en tienne dûment compte.

Ainsi donc, pour ne pas tomber dans des erreurs qui pourraient compromettre l'efficacité du travail accompli, avant de commencer à transformer en proposition pour une nouvelle approche les connaissances récemment acquises en matière de projets et de construction de tunnels, il est indispensable d'établir les lignes directrices qui doivent servir à ceux qui envisagent de concevoir et de construire un ouvrage souterrain.

Il est raisonnable d'affirmer que, pour concevoir et construire correctement un ouvrage souterrain, il est fondamental :

### • dans la phase de la conception

– de connaître parfaitement le milieu dans lequel il faudra opérer, et tout particulièrement ses caractéristiques de résistance et de déformabilité ;

– d'étudier au préalable le comportement mécanique (réponse en déformation de ce milieu à l'excavation), en l'absence d'interventions de stabilisation ;

– de définir le type d'actions de confinement et de préconfinement nécessaires pour maîtriser et contrôler la réponse en déformation du milieu à l'excavation ;

– de choisir le type d'intervention de stabilisation parmi celles dont nous disposons à l'heure actuelle grâce aux technologies existantes, sur la base des actions de préconfinement et de confinement qu'elles sont à même d'assurer ;

– de mettre en place – en fonction du comportement prévu du milieu d'excavation – les sections type tout en définissant, en plus des interventions de stabilisation les plus appropriées au contexte dans lequel on est supposé devoir opérer, les phases, les cadences et les temps de leur mise en chantier ;

– de mesurer et vérifier à l'aide de calculs mathématiques, les interventions choisies pour obtenir le comportement voulu du milieu vis-à-vis de l'excavation ainsi que le coefficient de sécurité nécessaire de l'ouvrage.

### • dans la phase de la construction

– de vérifier, sur le chantier, si le comportement du milieu vis-à-vis de l'excavation correspond bien à celui qui a été calculé à travers l'analyse de la phase de la conception, avant de procéder à la mise au point du projet et équilibrer le poids des interventions entre le front de taille et le périmètre de la cavité.

Il en résulte que la conception et la construction d'un ouvrage souterrain doivent inévitablement se structurer dans le temps à travers :

1. une *phase de reconnaissance* liée à la connaissance géologique, géomécanique et hydrologique du milieu ;

2. une *phase de diagnostic* liée à la prévision théorique du comportement du milieu c'est-à-dire de la réponse en déformation, en l'absence d'interventions de stabilisation ;

3. une *phase de thérapie* liée tout d'abord à la définition des modalités d'excavation et de stabilisation du milieu pour contrôler sa réponse en déformation, puis, à l'évaluation théorique de l'efficacité des solutions choisies ;

4. une *phase de vérification* liée au contrôle expérimental du comportement réel du milieu vis-à-vis de l'excavation (réponse en déformation) pour la mise au point des systèmes d'excavation et de stabilisation.

Pour le projet et la construction d'ouvrages souterrains, deux principaux types d'approche ont été adoptés.

Certains auteurs ont proposé des modèles de support au concepteur pour préparer le projet des ouvrages de stabilisation et de revêtement d'un tunnel d'après les classifications géomécaniques.

Parmi ceux-ci, les modèles de Bieniawski (RMR System) et de Barton (Q System) sont bien connus. Tous deux définissent des classes géomécaniques sur la base d'une série de paramètres géomécaniques et géostruc-turels. Ils associent à chaque classe des interventions type de stabilisation qui déterminent les sections type de projet. Malheureusement – et les auteurs [3] sont les premiers à le regretter – il a été fait un usage assez erroné de ce type de classifications dans la mesure où l'on a prétendu les utiliser comme base de méthodes complètes de conception et de construction et non simplement en tant que simples supports pour les ingénieurs spécialistes de tunnels ce qui était dans l'intention des auteurs.

Utilisées dans des buts différents de ceux pour lesquels elles avaient été conçues, les classifications géomécaniques et, par voie de conséquence, les méthodes de conception et de construction qui s'y réfèrent, comme la NATM, ont révélé des limites considérables.

Elles peuvent être difficilement appliquées aux roches tendres, aux flyshs et aux sols. Elles ne tiennent pas suffisamment compte des effets de tension naturelle, des dimensions et de la géométrie de l'excavation vis-à-vis du comportement en déformation de la cavité. Elles ne sont pas mises à jour en tant que systèmes de construction capables de produire des actions de préconfinement de la cavité (le jet-grouting horizontal, le prédécoupage mécanique, le prérenforcement du noyau d'avancement à l'aide de tubes en résine armée de fibres de verre, etc.). Tout cela constitue des limites réelles. De telle sorte que les approches de conception et de construction qui s'y réfèrent se révèlent inévitablement incomplètes et ne sont pas valables universellement.

Une alternative existe à ce type d'approche essentiellement *empirique*. Elle est résolument *théorique* et a débouché sur des résultats intéressants encore qu'exclusivement limités jusqu'ici à la phase de conception de l'ouvrage souterrain. Cette approche recourt à l'instrument mathématique pour décrire le plus fidèlement possible les contraintes et les déformations du terrain et des structures de revêtement pour les dimensionner. Les résultats les plus importants obtenus par cette approche sont :

- d'avoir défini le concept de pression de confinement de la cavité permettant au projeteur spécialiste des ouvrages en souterrain de contrôler l'étendue du terrain plastifié sur le contour du tunnel (rayon plastique  $R_p$ ), ce que Kastner a démontré analytiquement pour la première fois en 1962 ;

- d'avoir reconnu que le problème du calcul des dimensions du revêtement d'un tunnel est absolument tridimensionnel et qu'il n'est pas permis de négliger ce facteur, tout particulièrement lorsqu'il s'agit d'affronter des situations d'avancement dans des terrains soumis à des états de tension élevés par rapport à leurs caractéristiques de résistance et de déformabilité. En ce sens, Lombardi a eu le mérite remarquable d'avoir compris l'importance - pour la statique d'un ouvrage souterrain - du noyau de terrain sur le front de taille ;

- d'avoir démontré que la valeur de la pression exercée par le massif environnant sur les structures de stabilisation et de revêtement d'un tunnel n'est pas prédéterminé et qu'il dépend, entre autres choses, des modalités d'excavation et de mise en œuvre des structures (nous le déduisons de la méthode de calcul des « lignes caractéristiques » (Lombardi, 1974) et de la méthode de « convergence-confinement » (Panet *et al.*).

L'approche théorique a fourni aux projeteurs les instruments de calcul nécessaires pour évaluer les contraintes et les déformations d'un massif et pour dimensionner les structures de stabilisation et de revêtement d'un tunnel. Elle ne tient cependant pas compte des problèmes de construction de sorte qu'elle ne constitue certes pas une méthode de conception et de construction intégrée. Elle ne fournit notamment pas d'indications concernant la manière de traiter les situations d'instabilité du front de taille.

La figure 1 montre schématiquement les limites présentées par chacune des approches illustrées, réparties

sur chacune des quatre phases fondamentales de la conception-construction d'un ouvrage souterrain (reconnaissance, diagnostic, thérapie, vérification).

Tout récemment, grâce aux connaissances acquises au cours de la recherche illustrée dans la deuxième partie de cet article (voir *RFG* n° 84), il a été possible de penser à un nouveau concept d'encadrement des tunnels qui, tout en utilisant ce qui a été fait de bon par les deux approches traditionnelles dont nous avons parlé, contourne leurs limites et apporte une réponse appropriée aux quatre phases de conception et de construction citées (Fig. 1).

Ce troisième et dernier volet de cette étude illustre brièvement mais complètement les concepts essentiels.

2

## Critère d'encadrement selon l'approche basée sur l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les sols

L'approche basée sur l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les sols se distingue de celles qui ont été prises comme référence jusqu'ici pour des raisons importantes en partie illustrées dans les chapitres déjà publiés de cet article. Entre autres choses, cette approche :

1. prévoit que la *conception* et la *construction* d'un tunnel ne s'identifient plus comme dans le passé. Elles représentent deux phases bien distinctes ayant chacune une physionomie bien définie au niveau chronologique et pratique ;

2. fait référence à un nouveau type d'encadrement des ouvrages souterrains, basée sur un seul paramètre commun à toutes les excavations. Le comportement de contrainte et de déformation du système front de taille-noyau d'avancement ;

3. fait référence à la prévision, au contrôle et à l'interprétation de la réponse en déformation, du massif à l'excavation qui devient le seul paramètre auquel se référer. Pour commencer, par la voie théorique, comme objet de prévision et de contrôle. Puis par la voie expé-

| Méthodes de conception et/ou de construction | Théorie de Kastner - Fenner | NATM (Nouvelle Méthode Austrichienne) | Classifications géomécaniques (Beniawski, Barton, ecc.) | Théorie des lignes caractéristiques | ADECO-RS |
|--|-----------------------------|---------------------------------------|---|-------------------------------------|----------|
| Phase de Reconnaissance                      | ●                           |                                       | ●   | ●                                   | ●        |
| Phase de Diagnostic                          | ●                           |                                       | ●   | ●                                   | ●        |
| Phase de Thérapie                            |                             | ●                                     |   |                                     | ●        |
| Phase de Vérification                        |                             | ●                                     |   | ●                                   | ●        |

FIG. 1 Comparaison entre les contributions fournies par les différentes écoles au problème de la conception et de la construction des tunnels. Comparison among contributions provided by different schools to the problem of design and construction of tunnels.

rimentale, comme objet de lecture et d'interprétation pour la mise au point du projet en cours de chantier ;

4. introduit le concept de *préconfinement de la cavité* qui intègre le concept déjà bien connu de confinement et permet d'apporter des solutions, même aux conditions statiques les plus difficiles, d'une manière programmée, sans recourir à des improvisations dans la construction ;

5. prévoit l'emploi de *systèmes de conservation* pour maintenir le plus intactes possible les caractéristiques géotechniques et structurelles du terrain dans le sens de « matériau de construction », lorsque ces caractéristiques jouent un rôle fondamental sur la vitesse et sur la cadence d'avancement des travaux souterrains.

Nous l'avons dit, l'introduction d'un nouveau concept d'encadrement des ouvrages souterrains est un élément particulier de cette approche.

Partant de l'observation que les déformations du milieu au cours de l'excavation et donc la stabilité même d'un tunnel sont liées au comportement du noyau d'avancement, c'est la *stabilité du système front de taille-noyau d'avancement* qui devient l'élément d'encadrement. Faisant référence à un paramètre unique valable pour tous les types de terrain (le comportement de contrainte et de déformation du noyau de terrain en amont du front de taille) l'approche contourne donc les limites des systèmes adoptés jusqu'ici, tout particulièrement dans le cas de terrains à faible consistance.

Comme nous l'avons vu dans la deuxième partie de cette étude, trois catégories fondamentales de comportement sont définies (voir § 3, Fig. 19) :

- catégorie A : Comportement à front stable ou de type rocheux ;
- catégorie B : Comportement à front stable à court terme ou comportement de type cohérent ;
- catégorie C : Comportement à front instable ou de type sans cohésion.

## 2.1

### Catégorie A

Elle se manifeste lorsque l'état de coaction dans le terrain, au front de taille et sur le contour de la cavité, ne dépasse pas les caractéristiques de résistance du milieu. Plus le profil d'excavation adhère au profil théorique et plus « l'effet de voûte » se forme près du profil d'excavation.

Les phénomènes de déformation évoluent dans le domaine élastique. Ils sont immédiats et de l'ordre de quelques centimètres.

Le front de taille est globalement stable. Il peut se produire simplement des instabilités locales qui se ramènent à quelques chutes de blocs sous l'effet de leur poids propre, isolés par une structure défavorable du massif rocheux. Dans ce contexte, l'anisotropie des contraintes et de la déformation du terrain joue effectivement un rôle fondamental.

La présence éventuelle d'eau, même en régime hydro-dynamique, n'influence pas la stabilité du tunnel, à moins qu'il ne s'agisse de terrains altérables ou que des gradients hydrauliques trop intenses ne provoquent une dénivellation capable de battre en brèche la résistance au cisaillement le long des plans de discontinuité.

Les interventions de stabilisation sont généralement destinées à empêcher la dégradation du terrain et à conserver le profil de l'excavation.

## 2.2

### Catégorie B

Elle se manifeste lorsqu'au cours de l'avancement l'état de coaction dans le terrain, au front de taille et sur le contour de la cavité, est susceptible de dépasser la capacité de résistance du milieu en domaine élastique.

« L'effet de voûte » ne se réalise pas immédiatement sur le contour de la cavité mais à une distance qui dépend de l'épaisseur de l'anneau où le terrain subit le phénomène de plastification.

Les phénomènes de déformation évoluent dans le domaine élastoplastique. Ils sont différés et de l'ordre du décimètre.

Dans les cadences normales d'avancement, le front de taille reste stable à court terme et sa stabilité s'améliore ou se détériore selon que la vitesse d'avancement augmente ou diminue. Le cas échéant, les déformations du noyau sous la forme d'extrusions ne conditionnent pas la stabilité du tunnel parce que le terrain est encore en mesure de mobiliser une résistance résiduelle suffisante.

Les phénomènes d'instabilité, sous la forme d'écaillages diffus sur le front de taille et sur le contour de la cavité, laissent le temps d'opérer après le passage du front de taille des interventions de stabilisation traditionnelles de confinement radial. Dans certains cas, il peut s'avérer nécessaire de recourir également à des actions de préconfinement de la cavité, équilibrant les interventions de stabilisation entre le front de taille et la cavité, de manière à contenir les phénomènes de déformation dans des limites acceptables.

La présence d'eau, tout particulièrement si elle est en régime hydro-dynamique, réduit la capacité de résistance au cisaillement du terrain, favorise l'extension de la plastification et accroît ainsi l'importance des phénomènes d'instabilité. Il est donc nécessaire de la prévenir essentiellement dans la zone du front, déviant son parcours à l'extérieur du noyau.

## 2.3

### Catégorie C

Elle se manifeste lorsque l'état de coaction dans le terrain dépasse sensiblement sa capacité de résistance, même dans la zone du front de taille. « L'effet de voûte » ne peut se former ni au front, ni sur le contour de la cavité car le terrain ne possède pas une résistance résiduelle suffisante. Les phénomènes de déformation sont inacceptables, dans la mesure où ils évoluent immédiatement vers la rupture, donnant lieu à de graves manifestations d'instabilité telles que l'effondrement du front de taille et l'écrasement de la cavité sans laisser le temps d'agir par des interventions de confinement radial. Il s'impose donc de procéder à des interventions de préconsolidation en amont du front de taille, capables de développer une action de préconfinement qui puisse créer des effets de voûte artificiels.

Si elle n'est pas correctement traitée, la présence d'eau en régime hydro-statique réduit davantage encore la capacité de résistance au cisaillement du ter-

rain, favorise l'extension de la plastification et accroît en définitive l'importance des phénomènes de déformation. Cette même présence d'eau, en régime hydrodynamique, se traduit par des phénomènes d'entraînement de matériau et de renard absolument inacceptables. Il est donc nécessaire de la prévenir essentiellement dans la zone du front et de dévier son parcours à l'extérieur du noyau.

D'après l'expérience acquise pendant plus de vingt-cinq ans de conception et de construction d'ouvrages souterrains, nous pouvons dire que tous les cas d'ouvrages déjà réalisés tombent dans ces trois catégories de comportement.

3

## Phases de développement de l'approche basée sur l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les sols

Dans le développement logique du projet et de la construction d'un tunnel, l'approche fondée sur l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les sols nous pousse à procéder conformément aux phases résumées dans la figure 2, compte tenu des réponses positives attribuées à chacune des trois questions posées dans l'introduction.

La phase de la *conception* comprend :

- une *phase de reconnaissance* au cours de laquelle, en fonction des terrains rencontrés par le tunnel, le

projeteur procède à la caractérisation mécanique des roches ou des sols du milieu, indispensable pour procéder à l'analyse des équilibres naturels préexistants et pour pouvoir opérer correctement dans la phase de diagnostic qui suit ;

- une *phase de diagnostic* au cours de laquelle, sur la base des éléments réunis pendant la reconnaissance, le projeteur procède à une subdivision du tunnel en tronçons dont le comportement en déformation est homogène, dans le cadre des trois catégories de comportement A, B, C qui viennent d'être décrites. Les détails de l'évolution de la déformation et les types de charges mobilisées par l'excavation sont définis pour chacun des tronçons ;

- une *phase de thérapie* au cours de laquelle – à la suite des prévisions faites lors du diagnostic – le projeteur choisit le type d'action à adopter (préconfinement ou simple confinement) et les interventions nécessaires, dans le cadre des trois catégories de comportement A, B, C, afin d'obtenir la stabilisation complète du tunnel. Il effectue la composition des sections types longitudinales et transversales qu'il a dimensionnées et dont il va vérifier l'efficacité à travers les instruments de calcul mathématique.

La phase de la *construction* comprend :

- la *phase opérationnelle* au cours de laquelle les instruments de stabilisation sont mis en œuvre selon les prévisions conceptuelles, adaptés au niveau du confinement et du préconfinement à la réponse réelle en déformation du massif, et contrôlés selon des plans de contrôle de qualité préétablis ;

- la *phase de vérification* au cours de laquelle on vérifie – à travers la lecture et l'interprétation des phénomènes de déformation (qui sont la réponse du milieu à l'action de l'avancement) – la justesse des prévisions faites durant le diagnostic et la thérapie, afin de perfectionner la mise au point du projet à travers un équilibre des instruments de stabilisation entre le front de taille et la cavité. La vérification ne s'achève pas lorsque le tunnel est terminé. Elle se poursuit tout au long de sa vie dans le but bien précis de contrôler constamment la sécurité de son exploitation.

*Projeter* correctement un ouvrage souterrain signifie dès lors savoir *prévoir*, sur la base de la connaissance des équilibres naturels préexistants, le comportement que le terrain aura au cours de l'excavation lors du début puis de l'évolution des phénomènes de déformation et donc de définir – dans le cadre des trois catégories de comportement fondamentales – le type d'actions à mettre en place (confinement ou préconfinement) et les typologies d'intervention capables de les contenir dans des limites acceptables. Non sans établir des délais et des cadences d'application en fonction de l'avancement et de la position du front de taille.

*Construire* correctement un ouvrage souterrain signifie par ailleurs agir dans le respect des choix faits lors de la conception. Pour cela, il faut d'abord, lire très attentivement la réponse en déformation du terrain vis-à-vis de l'action d'avancement et des interventions de stabilisation, en termes d'extrusions et de convergences superficielles et profondes du front et des parois d'excavation. Il faut ensuite, après interprétation des résultats des lectures, perfectionner les percements, la vitesse, la cadence d'avancement, l'intensité, l'emplacemement et les moments d'application des interventions de stabilisation en les équilibrant correctement entre le front et le périmètre de l'excavation.

| MOMENT                | PHASE                           | ARGUMENT  |
|-----------------------|---------------------------------|---|
| DE LA<br>CONCEPTION   | – RECONNAISSANCE                | – analyse des équilibres naturels préexistants  |
|                       | – DIAGNOSTIC                    | – étude et prévision des phénomènes de déformation (*) en absence de stabilisation  |
|                       | – THERAPIE                      | – régulation des phénomènes de déformation (*) en termes de choix des systèmes de stabilisation   |
| DE LA<br>CONSTRUCTION | – OPERATIONNELLE                | – application des interventions de stabilisation pour la régulation des phénomènes de déformation (*)   |
|                       | – VERIFICATION EN COURS D'OUVRE | – contrôle et lecture des phénomènes de déformation (*) comme réponse de l'A.R. durant l'avancement des excavations (relevement extrusion du front et des convergences superficielles et profondes de l'excavation) |
|                       | – MISE AU POINT DU PROJET       | – interprétation des phénomènes de déformation (*)<br><br>– équilibrage des systèmes de stabilisation entre le front et le périmètre de l'excavation  |

(\*) Phénomènes de déformation en termes de extrusion du front et de convergence superficielle et profonde de la cavité

FIG. 2 Analyse des déformations contrôlées. Analysis of controlled deformations.

## Phase de reconnaissance

Réaliser une excavation souterraine signifie bousculer les équilibres qui existaient dans le milieu. Projeter cette excavation en perturbant le moins possible le milieu où s'opère cette excavation et en réduisant le plus possible la réponse en déformation suppose dès lors une *connaissance* préalable la plus complète possible de l'état des équilibres naturels en présence dans le terrain avant l'intervention.

Il en résulte la nécessité de faire précéder la conception et la construction d'un tunnel par une phase de reconnaissance au cours de laquelle a lieu la caractérisation du milieu à travers l'*acquisition des éléments lithologiques, structurels, stratigraphiques, morphologiques, tectoniques, hydrologiques, géotechniques, géomécaniques et des contraintes des terrains intéressés par l'ouvrage*. Ces données sont indispensables au projecteur, qui doit procéder à l'analyse des équilibres naturels préexistants et opérer correctement lors de la phase suivante de diagnostic.

La phase de reconnaissance prévoit deux étapes (Fig. 3).

Lors d'une *première étape* on établit un premier profil géologique sur un axe tracé d'après la carte géologique au 1/1 000 000, d'après la littérature existante et des relevés aérophotogrammétriques, le tout complété des relevés de surface comprenant :

- le relevé lithologique, avec une définition des principales unités ;
- le relevé géomorphologique, tenant tout particulièrement compte des conditions de stabilité des versants ;
- le relevé géostructurel, avec une définition des principales lignes de discontinuité ;
- le relevé hydro-géologique, avec une détermination du système hydrologique principal et le recensement des sources. À propos de sources, il est indispensable de mesurer leur débit et de suivre leur évolution durant le chantier pour établir l'influence de l'effet drainant de la cavité.

Le premier profil sera accompagné d'une série de fiches lithologiques des lithotypes trouvés en affleurement le long du tracé, comportant la synthèse des relevés effectués.

Au cas où l'étude de la première phase conclurait en faveur de la faisabilité d'une *galerie pilote* (Fig. 4), la conception (exécutive) peut se prévaloir avantageusement des relevés géologiques et géomécaniques dans la galerie [4, 5] ainsi que des résultats des essais *in situ* réalisés pour l'évaluation des caractéristiques de résistance et de déformabilité du massif rocheux.

Lors d'une *deuxième étape*, sur l'acquis des résultats de l'étude de la première phase, on élabore le projet des recherches géognostiques comprenant la définition des recherches géophysiques indirectes, des essais *in situ* et des sondages - essentiellement par carottage continu - de tarage, avec récupération des échantillons intacts de la portion de massif intéressée par l'excavation.

Le prélèvement d'échantillons intacts devra obligatoirement être fait à l'aide d'un équipement approprié susceptible de perturber le moins possible le massif. Les échantillons prélevés seront utilisés pour évaluer les propriétés physico-chimiques du massif rocheux en

fonction notamment de leur évolution dans le temps et également pour évaluer les paramètres géotechniques et géomécaniques.

Ceci permet de déterminer :

- la courbe intrinsèque de la matrice ;
- les paramètres de déformabilité de la matrice (module élastique initial et module de déformation totale évalué pour des niveaux de contrainte comparables à ceux qui vont s'instaurer à la suite de la construction de l'ouvrage).

Dans la mesure du possible, il est important de déterminer les caractéristiques de résistance et de déformabilité d'éventuelles discontinuités structurelles à partir desquelles on peut obtenir les courbes intrinsèques et les paramètres de déformabilité du massif sur la base de considérations détaillées.

L'étude de la deuxième phase se complète par l'estimation de l'état des contraintes naturelles, sur la base des recouvrements en jeu et des structures tectoniques principales.

Selon l'importance de l'ouvrage projeté et la complexité des structures tectoniques intéressées, il pourrait être très utile d'effectuer, le plus souvent possible, des essais pour la détermination du tenseur naturel des efforts à la profondeur de la cavité.

## Phase de diagnostic

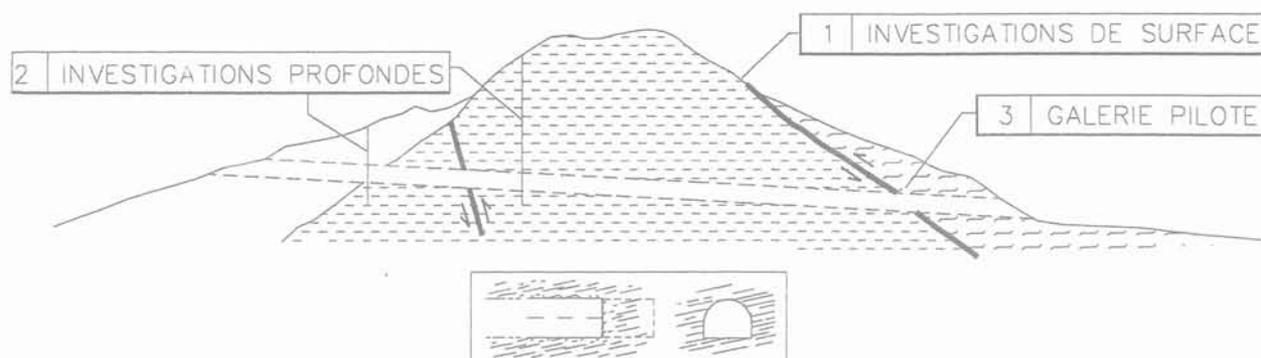
Lors de la phase de diagnostic, sur la base des éléments collectés lors de la phase de reconnaissance, le projecteur procède à une subdivision du tracé en tronçons ayant un comportement de déformation homogène dans le cadre des trois catégories fondamentales A, B et C (front stable, front stable à court terme et front instable). Pour aller de l'avant dans cet objectif, il fait des *prévisions* théoriques sur la réponse en déformation du milieu sous l'action d'excavation. Il met tout particulièrement l'accent sur les phénomènes de déformation qui - à défaut d'interventions de stabilisation - se manifesteraient au front de taille et par voie de conséquence dans la partie de terrain qui entoure la cavité.

L'analyse de la réponse en déformation du front de taille-noyau d'avancement et de la cavité est faite, en ce qui concerne la genèse, la localisation, l'évolution et l'importance, en recourant à des méthodes expérimentales et à des instruments mathématiques tels que les lignes caractéristiques, les éléments finis bi- ou tridimensionnels, etc., capables d'orienter le projecteur dans la définition de l'appartenance de différents tronçons de tunnel aux trois catégories de comportement A, B et C déjà citées.

Parmi ces méthodes, celle des lignes caractéristiques [12] utilisable dans la plupart des situations courantes se présente comme étant particulièrement utile et simple, pour atteindre ces objectifs (Fig. 5).

Parmi les méthodes expérimentales, dans certains types de terrain, les essais d'extrusion en cellule triaxiale permettent de simuler en laboratoire, sur des échantillons intacts prélevés *in situ*, l'avancement du tunnel sous les différentes couvertures et les modifications de contrainte provoquées par l'action d'excaver dans le système front de taille-noyau d'avancement en soulignant son type de comportement (Fig. 5).

À la fin, le diagnostic se traduit par l'établissement d'un profil longitudinal du projet de tunnel qui souligne



ANALYSE DES EQUILIBRES NATURELS PREEXISTANTS



DETERMINATION DES PARAMETRES



- 1 INVESTIGATIONS DE SURFACE SUR**
  - morphologie
  - tectonique
  - structure
  - lithologie
  - stratigraphie
  - hydrologie
  - geotechnique et geomecanique
  
- 2 INVESTIGATIONS PROFONDES SUR**
  - stratigraphie
  - lithologie
  - structure
  - hydrogeologie
  - geotechnique et geomecanique
  
- 3 GALERIE PILOTE**
  - caracterisation complete geolithologique, structurelle et hydrogeologique du terrain
  - analyse des parametres de la fraise
  - essais in situ et prelevement d'echantillons
  - analyse cinematique des instabilite
  - relevement des convergences

- ETAT DE CONTRAINTE NATURELLE
 
$$\lambda = \frac{P_h}{P_v}$$
- SYSTEMES DE DISCONTINUITE
- ANISOTROPIE
- CARACTERISTIQUES DE RESISTANCE
 

|               |                        |
|---------------|------------------------|
| $\sigma_c$    | $\sigma_t$             |
| $\sigma_{gd}$ | $\sigma_{gz}$          |
| $c_p, c_r$    | $\varphi_p, \varphi_r$ |
- CARACTERISTIQUES DE DEFORMABILITE
 

|       |          |
|-------|----------|
| $E_t$ | $E_s$    |
| $E_d$ | $E_{dt}$ |
| $\nu$ |          |
- CARACTERISTIQUES DE PERMEABILITE
  - $k$
  - PRESSION HYDROSTATIQUES ET HYDRODYNAMIQUES
  - GRADIENT HYDRAULIQUE
  - $i$
  - ALIMENTATION DE LA NAPPE
  - $Q$

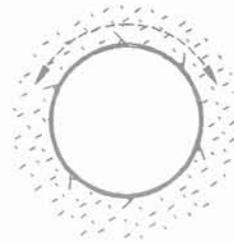
FIG. 3 Phases de reconnaissance. Diagnosis phases.

la subdivision en tronçons ayant un comportement de déformation homogène et les catégories de comportement (A, B, C) associées.

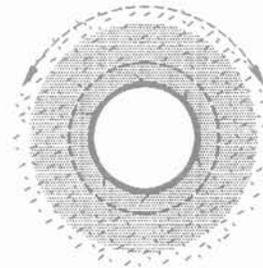
Après avoir défini l'appartenance de chaque tronçon à l'une des trois catégories de comportement, il

incombe à la phase de diagnostic de définir pour chaque catégorie :

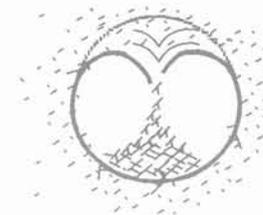
- a - les typologies de déformation qui se développeront sur le contour de l'excavation (extrusion, préconvergence et convergence) ;



① NATUREL



② DEVIÉ



③ NUL

FIG. 4 Galerie pilote et effet de voûte.  
Pilot tunnel and arch effect.

b – les manifestations d'instabilité attendues qui s'ensuivent telles que :

- les chutes de blocs sous l'effet de leur propre poids et les écaillages sur le front de taille, produits par l'extrusion du noyau et par la préconvergence,
- les chutes de blocs sous l'effet de leur propre poids et les écaillages sur le contour de la cavité produits par la convergence,
- l'écrasement de la cavité produit par l'effondrement du front de taille ;

c – les charges mobilisées par l'excavation selon les modèles de solides de chargement ou d'anneaux plastifiés (Fig. 6).

### 3.3

## Phase de thérapie

Lors de la phase de thérapie, le projeteur, sur la base des catégories de comportement définies lors de

la phase du diagnostic, choisit le type d'action à adopter (préconfinement, confinement ou présoutènement) pour obtenir la stabilisation complète du tunnel (contrôle des phénomènes de déformation).

Conformément au paragraphe 2 concernant l'importance de la rigidité du noyau d'avancement vis-à-vis du comportement en déformation du front de taille et de la cavité et, par voie de conséquence, de la stabilité du tunnel tout entier, le projeteur, en principe :

- pourra se limiter à exercer des actions de simple confinement dans le cas des tunnels ayant un comportement de déformation à front stable (catégorie A) ;

- devra tendre à produire des actions énergiques de préconfinement – au-delà naturellement de celles de confinement – dans le cas des tunnels ayant un comportement en déformation à front instable (catégorie C) ;

- pourra opter entre préconfinement ou simple confinement de la cavité en fonction de la vitesse et de la cadence d'avancement supposées être réalisées dans

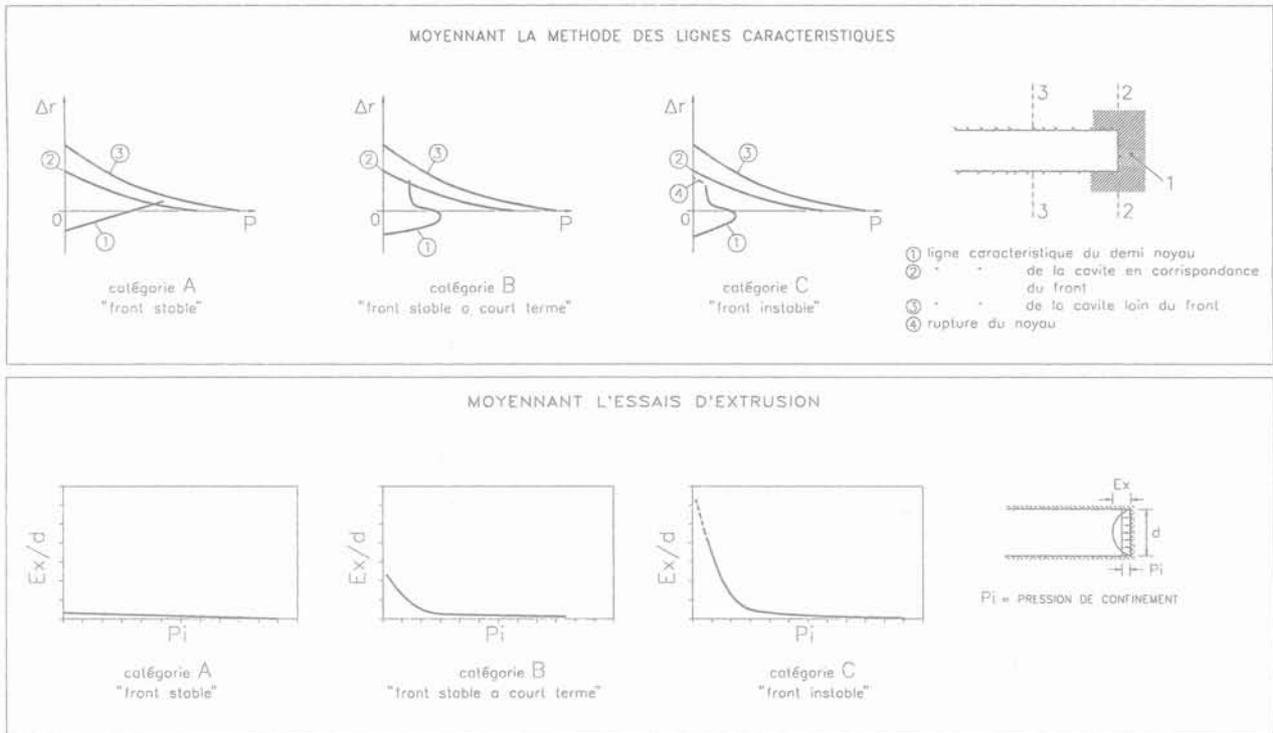


FIG. 5 Phase de diagnostic : prévision de la catégorie de comportement.  
 Diagnosis phase : prediction of the behaviour category.

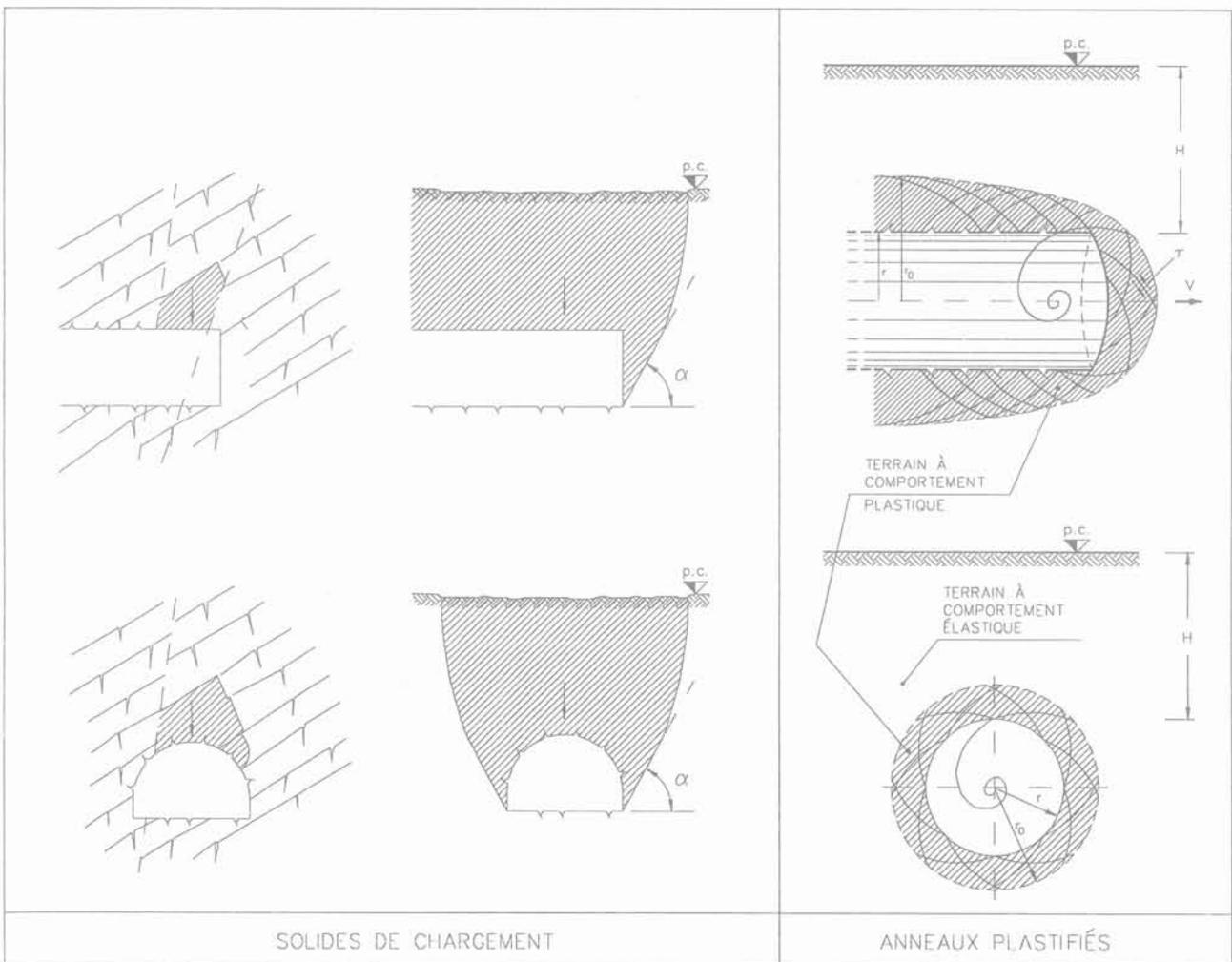


FIG. 6 Phase de diagnostic : comportement par solides de chargement et anneaux plastifiés.  
 Diagnosis phase : behaviour by load solids and by plasticised rings.

le cas des tunnels ayant un comportement en déformation à front stable à court terme (catégorie B).

Une fois que le type d'action à exercer aura été choisi, il faudra mettre au point les systèmes, les cadences, les phases d'excavation et, plus encore, les interventions et les instruments de stabilisation, tout en prévoyant pour ces derniers comment et où les mettre en œuvre par rapport à la position du front de taille, et d'après les trois catégories de comportement pour qu'ils produisent l'action voulue.

Dans la pratique pour obtenir le type d'action choisie, le projeteur dispose de toute une série d'instruments grâce auxquels il peut réaliser tous les types d'intervention de stabilisation nécessaires.

Il est bon de rappeler que les interventions de stabilisation peuvent être :

- des interventions de *conservation* dont l'effet essentiel est d'empêcher la chute de la contrainte principale mineure ;
- et des interventions d'*amélioration*, lorsqu'elles agissent principalement pour augmenter les caractéristiques de résistance au cisaillement du milieu.

Parmi les instruments dont dispose le projeteur dans le cadre des **interventions produisant des actions de préconfinement de la cavité** [16] (Fig. 7), ceux qui exercent essentiellement un effet de *conservation* sont :

- les tuiles en béton projeté renforcé de fibres, réalisées en utilisant le comme coffrage [15, 16] le *prédecoupage mécanique* le long du profil d'excavation ;
- le prérenforcement du noyau, pour des profondeurs supérieures au diamètre d'excavation, à l'aide de boulons tubulaires en résine armée de fibres de verre, fixés au terrain à l'aide de mortier de ciment. Le nombre de boulons sera défini en fonction de l'aug-

mentation de la résistance au cisaillement qu'on veut lui donner [15, 17, 19, 20] ;

- les parapluies tronconiques constitués par le rapprochement de colonnes subhorizontales de terrain consolidé par *jet-grouting* [15, 18].

Exercent en revanche un effet essentiellement d'amélioration :

- les auréoles tronconiques de terrain consolidé par *injections traditionnelles* ou par *congélation* ;
- les auréoles tronconiques de *drainages* en présence de nappe.

Parmi les instruments dont dispose le projeteur dans le cadre des **interventions produisant des actions de confinement de la cavité**, ceux qui exercent essentiellement un effet de *conservation* sont :

- les *coques en béton projeté* de 1<sup>re</sup> phase, capables de produire, en fonction de leur épaisseur, une pression de confinement sur le contour de la cavité ;
- les excavations mécanisées à pleine section à l'aide de *boucliers à pression* capables de produire une pression de confinement sur le front de taille et sur la cavité (anneaux de revêtement en voussoirs préfabriqués) ;
- les excavations mécanisées à l'aide de *boucliers ouverts*, qui fournissent un confinement radial au terrain pendant les opérations d'excavation ;
- le *boulonnage radial* réalisé à l'aide de *boulons à ancrage ponctuel* qui appliquent sur le parement du tunnel une pression de confinement « active » déterminée par la précontrainte des boulons ;
- le *radier* qui crée une structure de revêtement fermée, augmentant la capacité de la coque de revêtement de 1<sup>re</sup> et de 2<sup>e</sup> phase à développer des pressions élevées de confinement sur le contour de la cavité.

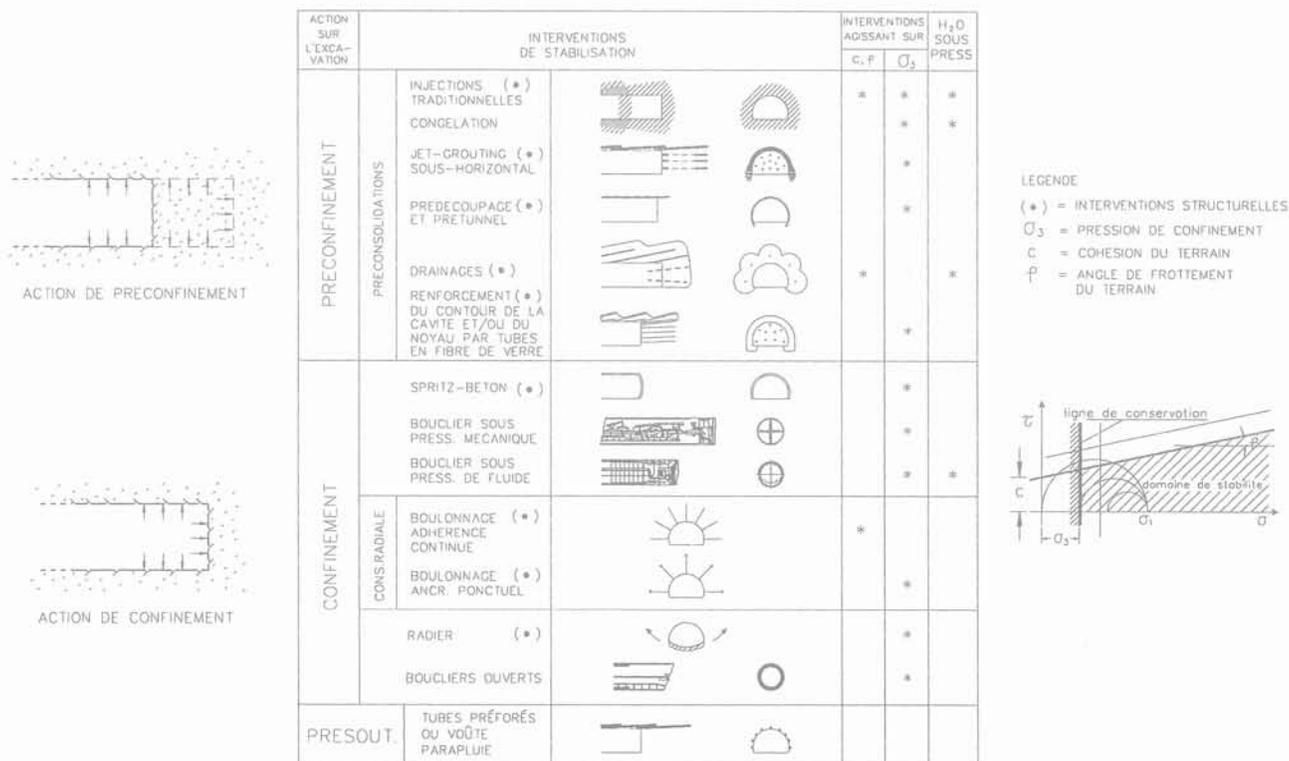


FIG. 7 Effets des interventions par action de confinement et préconfinement. Type of effect exerted by the stabilisation instruments in use.

Exerce en revanche un effet essentiellement d'amélioration :

- l'anneau de terrain armé sur le contour de la cavité, réalisé à l'aide de boulons à adhérence continue capables d'accroître la résistance au cisaillement du terrain traité et de produire un relèvement de la courbe intrinsèque.

Les instruments qui ne tombent pas dans ces deux catégories, dans la mesure où ils ne produisant ni des actions de préconfinement ni des actions de confinement, sont des interventions de présoutènement ou de soutènement, selon qu'ils agissent ou n'agissent pas en amont du front de taille. Ils n'exercent aucune influence sur la formation de « l'effet de voûte », car ils ne sont pas à même de s'opposer d'une manière appréciable à la diminution de la contrainte principale mineure et pas davantage d'améliorer d'une manière déterminante la résistance au cisaillement du terrain.

Fait, par exemple, partie des interventions de présoutènement la voûte parapluie, héritière des tubes préforés, qui bien que constituée d'éléments structuraux appuyés sur des cintres, placés après la mise en œuvre de l'excavation et placés le long d'une génératrice circulaire, ne sont pas capables de produire des effets de voûte dans l'avancement à défaut de collaboration réciproque dans le sens transversal.

#### Composition des sections type

Les paragraphes qui précèdent nous ont montré que la stabilité du système front de taille-noyau d'avancement joue un rôle fondamental sur la réponse en déformation du massif lors de l'ouverture de la cavité souterraine et, par conséquent, sur la stabilité du tunnel à court et à long terme. Nous avons également vu que les conditions de stabilité de ce système se ramènent à trois catégories fondamentales de comportement. Elles caractérisent et encadrent les tronçons examinés pour le tunnel à creuser, et il y a lieu d'en tenir compte au moment du choix des interventions de stabilisation sur lesquelles devront reposer la stabilité et la sécurité de l'ouvrage.

Ceci dit, pour l'encadrement proposé, la figure 8 indique schématiquement les champs d'application possibles des différents instruments de stabilisation à la disposition du projeteur. Leur assemblage aboutit aux sections types capables de garantir la faisabilité de l'excavation et la stabilité à court et à long terme du tunnel. Et notamment :

- dans les tronçons de tunnel à front stable (catégorie de comportement A ; contraintes : en domaine élastique ; manifestations d'instabilité typiques : chutes de blocs sous l'effet de leur propre poids), les interventions de stabilisation proposées ont essentiellement une fonction de protection. Elles sont déterminées par l'état géostructurel du massif et par une éventuelle présence d'eau ;

- dans les tronçons de tunnel à front stable à court terme (catégorie de comportement B ; contraintes : en domaine élastoplastique ; manifestations d'instabilité typiques : chutes de blocs sous l'effet de leur propre poids par extrusion du noyau, préconvergence et convergence de la cavité), les interventions de stabilisation doivent garantir la formation de l'effet de voûte le plus près possible du profil d'excavation. Nous proposons donc des instruments capables d'empêcher la détérioration des caractéristiques de résistance et de déformabilité du terrain et notamment du système front de taille-noyau d'avancement. Ils développent des

actions de préconfinement ou de confinement capables d'empêcher l'apparition de phénomènes de plastification du massif ou pour le moins de limiter leur extension ;

- dans les tronçons de tunnel à front instable (catégorie de comportement C ; contraintes : en domaine de rupture ; manifestations d'instabilité typiques : effondrement du front de taille et écrasement de la cavité), les interventions de stabilisation doivent garantir la formation d'un effet de voûte artificiel en avance sur le front de taille. Nous proposons donc des instruments de préconfinement de la cavité qui assurent la stabilité du système front de taille-noyau d'avancement et – lorsque les phénomènes en déformation sont encore contrôlables – qui empêchent la contrainte principale mineure  $\sigma_3$  de s'annuler.

Le tableau de la figure 8 peut donc servir de point de référence au projeteur pour la définition des sections types, longitudinales et transversales.

La figure 9 montre un exemple de composition de section type C1.

#### Dimensionnement et vérification des sections type. Synthèse de la phase de thérapie

Après avoir choisi le type d'action à accomplir, prévu les interventions pour la réaliser, composé les sections type, le projeteur doit dimensionner et vérifier ces dernières avec les méthodes de calcul déjà utilisées au cours de la phase de diagnostic. A cet égard, il est très important de vérifier l'équilibre correct des interventions entre le front et le périmètre de l'excavation et d'évaluer leur degré d'efficacité lorsque l'intervention aura été effectuée, en fonction du comportement prévisible contrainte-déformation. Naturellement, selon le comportement supposé, le calcul peut être fait en recourant à de simples modèles « convergence-confinement » ou, au contraire, à des modèles plus complexes d'extrusion-confinement ou d'extrusion-préconfinement.

Le résultat de l'étude de thérapie est donc résumé en reportant la section type à adopter sur le profil géomécanique du tunnel pour chaque tronçon dont le comportement en déformation est homogène.

### 3.4

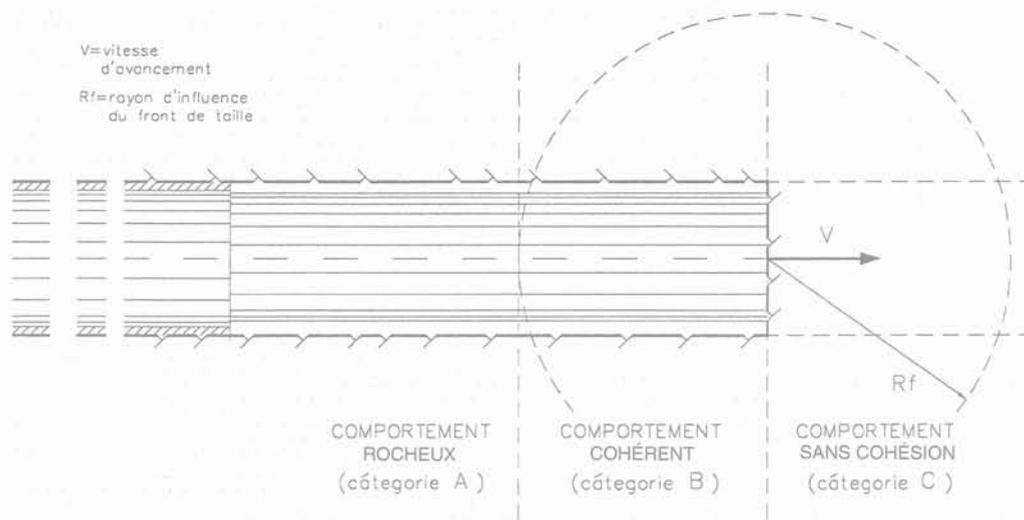
## Phase de vérification

Le démarrage des travaux d'excavation, c'est-à-dire la phase de construction, coïncide avec le démarrage de la vérification des prévisions faites lors des phases de diagnostic et de thérapie concernant les phénomènes de déformation.

Cette vérification (qui acquiert une importance considérable du fait que la conception tout entière a été basée sur ces prévisions) se fait par la mesure et le contrôle de la « réponse » du milieu à l'action de l'excavation, dans la cavité, au front de taille et aux parois de l'excavation et en surface, le long du tracé du tunnel.

Dans ce but, il faut disposer des stations de mesure appropriées, au niveau du front de taille (Fig. 10) ainsi qu'en amont et en aval.

Toutes les fois que l'avancement du front de taille est prévu dans des conditions de stabilité à court terme ou d'instabilité, et toutes les fois que le recouvrement du tunnel le permet, il est bon, voire tout à fait recommandé, de mettre en place, dans une section détermi-



|                              | FRONT   | STABLE         |                | STABLE À COURT TERME |                |                | INSTABLE       |                |                |                |                |   |
|------------------------------|---|----------------|----------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---|
|                              |   | A <sub>1</sub> | A <sub>2</sub> | B <sub>1</sub>       | B <sub>2</sub> | B <sub>3</sub> | C <sub>1</sub> | C <sub>2</sub> | C <sub>3</sub> | C <sub>4</sub> | C <sub>5</sub> |   |
| INSTRUMENTS DE STABILISATION | BOULONS RADIAUX   |                |                | ●                    | ●              |                |                |                |                |                |                |   |
|                              | SPRITZ-BÉTON ARMÉ*  |                |                | ● ●                  | ● ●            |                | ● ● ● ● ●      |                |                |                |                |   |
|                              | RENFORCEMENT DU NOYAU PAR TUBES EN FIBRE DE VERRE                               |                |                |                      | ●              |                |                | ●              |                | ●              |                |   |
|                              | RENFORCEMENT DU CONTOUR DE LA CAVITÉ ET/OU DU NOYAU PAR TUBES EN FIBRE DE VERRE |                |                |                      |                |                |                |                |                |                | ●              |   |
|                              | RADIER  |                |                |                      | ● ● ●          |                | ● ● ● ● ●      |                |                |                |                |   |
|                              | PRÉDÉCOUPAGE  |                |                |                      |                | ●              |                | ●              |                |                |                |   |
|                              | CONSOLIDATIONS RADIALES À PARTIR D'UNE GALERIE PILOTE                           |                |                |                      |                |                |                |                |                | ●              |                |   |
|                              | JET-GROUTING  |                |                |                      |                |                |                | ●              |                |                |                |   |
|                              | INJECTIONS EN AVANCEMENT  |                |                |                      |                |                |                |                |                |                |                | ● |
|                              | DRAINAGES   |                |                | ● ●                  | ● ● ●          |                | ● ● ● ● ●      | ● ●            |                |                | ●              |   |
| ENFILAGES                    |   |                | ●              |                      |                |                |                |                |                |                |                |   |
| PHÉNOMÈNES DÉFORMANTS        |   | CENTIMÉTRIQUES |                | DÉCIMÉTRIQUES        |                |                | INACCEPTABLE   |                |                |                |                |   |

\* COFFRAGE CONSTITUÉ DE CINTRES ET/OU MAILLAGE ELECTRO-SOUDÉ ET/OU FIBRES D'ACIER

P. LUNARDI -

FIG. 8 Critère de choix des instruments de stabilisation pour la composition des sections types.  
Choice of stabilisation instruments for the composition of cross section types.

née, des instruments multi-bases verticaux testés et capables de mesurer les phénomènes de déformation radiale qui précèdent l'arrivée du front (préconvergence).

De plus, pour le système front de taille-noyau d'avancement, il sera possible, à l'aide de « micro-mètres glissant » longitudinaux et d'extensomètres

radiaux multi-bases à tige de contrôler les extrusions et les convergences superficielles et profondes du massif à des distances variables du profil d'excavation. Des extensomètres à bande permettront de contrôler les convergences périmétrales en aval du front.

Plus ces mesures seront effectuées systématiquement et avec précision et plus les informations seront

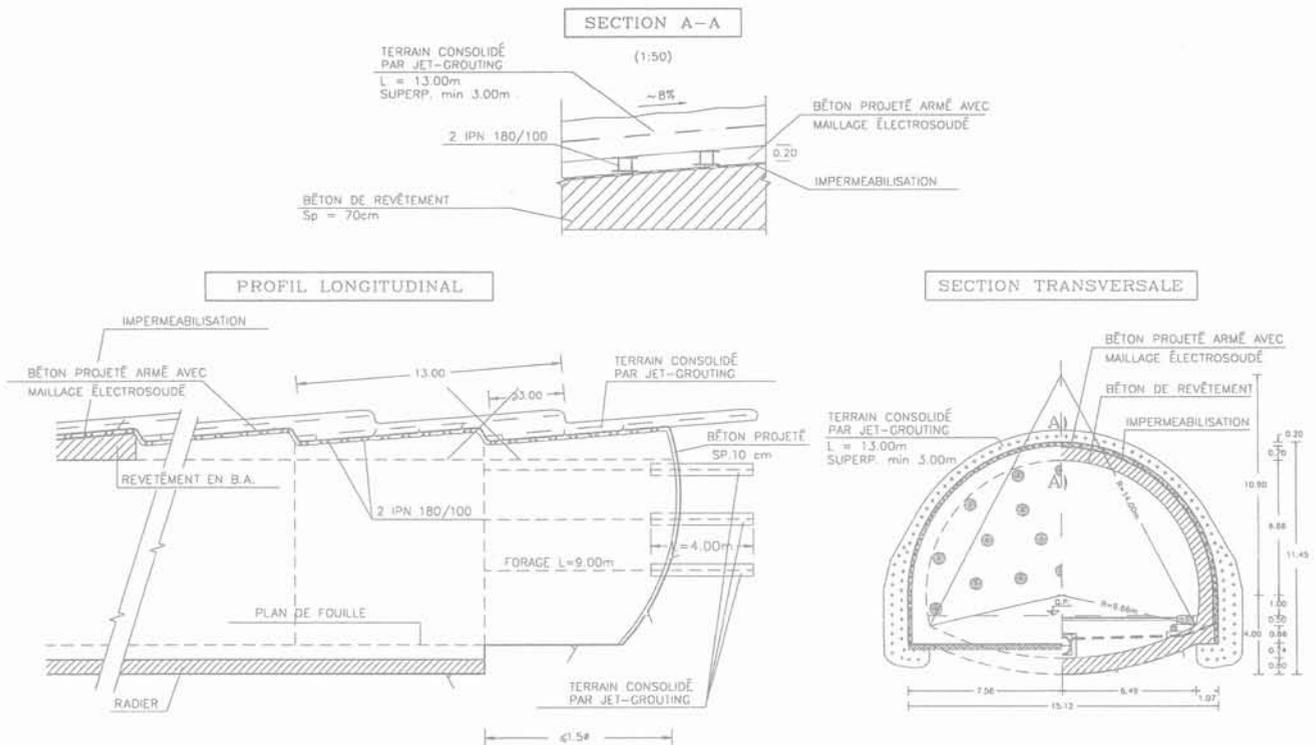


FIG. 9 Section type C1 avec jet-grouting.  
C1 type section with jet-grouting.

fiables et utiles. La tâche du projeteur pourra alors s'avérer plus ou moins complexe selon le comportement du milieu.

Si l'avancement se déroule dans un milieu à comportement de type rocheux ou sans cohésion (catégorie A ou C respectivement) où les phénomènes de déformation prévus sont tellement réduits qu'ils n'éveillent aucune préoccupation (cas des terrains lithoïdes sous des recouvrements faibles-moyens) ou tellement forts qu'ils sont inacceptables et obligent à procéder à un préconfinement de la cavité (cas des terrains sans cohésion sous n'importe quel recouvrement, argileux et lithoïdes sous de forts recouvrements), le nombre des contrôles est effectivement réduit, compte tenu du fait que les phénomènes de déformation évoluent rapidement dans le temps et que cette évolution est limitée. Le travail du projeteur s'en trouve par conséquent fortement allégé, une fois choisi le contrôle adéquat pour la situation réelle.

Lorsque l'avancement se fait dans un milieu à comportement de type cohérent (catégorie B), l'effort du projeteur change de même que l'attention qu'il doit consacrer à l'analyse des déformations du système front de taille-noyau d'avancement et à l'analyse des convergences superficielles et profondes de la cavité dont il doit suivre l'évolution dans le temps et dans l'espace.

Dans ce cas, face à des phénomènes de déformation lents, progressifs et différés, d'importance sans cesse croissante, la lecture constante des contrôles est effectivement la seule qui puisse fournir au projeteur les informations nécessaires, d'une part, pour optimiser l'intensité et l'équilibre entre front et cavité des interventions de stabilisation et, d'autre part, pour calibrer les phases, les cadences et les systèmes d'excavation.

Il est donc superflu de souligner l'importance de l'interprétation correcte des résultats fournis par les

contrôles. C'est d'elle que dépend la bonne mise au point du projet sur chantier.

En revanche, il est impératif de souligner que la phase de vérification ne s'achève pas avec l'achèvement du tunnel. Bien au contraire. Elle doit se poursuivre par une surveillance systématique destinée à contrôler la sécurité du tunnel pendant son exploitation, autrement dit pendant toute sa vie.

#### 4

## Conclusion

L'approche basée sur l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les sols est un mode de conception et de construction des ouvrages souterrains valable pour tous les types de terrains. Elle exploite les connaissances, les moyens de calcul, les technologies d'attaque les plus récentes (Fig. 11) et sert de guide au projeteur pour encadrer un tunnel dans l'une des trois catégories fondamentales de comportement. Les points de référence sont les conditions de stabilité du système front de taille-noyau d'avancement prévues grâce à une étude théorique approfondie des contraintes et des déformations menée à l'aide d'instruments de calcul mathématique. Pour chaque tronçon et en fonction du type de comportement prévu, le projeteur décide le genre d'action (préconfinement ou simple confinement) à entreprendre pour obtenir le contrôle des phénomènes de déformation. Par voie de conséquence, il choisit au fur et à mesure les interventions de stabilisation et la section type longitudinale et transversale la plus conforme à la situation. Des sections types appropriées peuvent être prévues pour tous les types de terrain et pour toutes les situations de contrainte et de déformation. Leur coût (par mètre linéaire de tunnel) et les temps d'exécution nécessaires sont automatiquement définis. De la sorte :

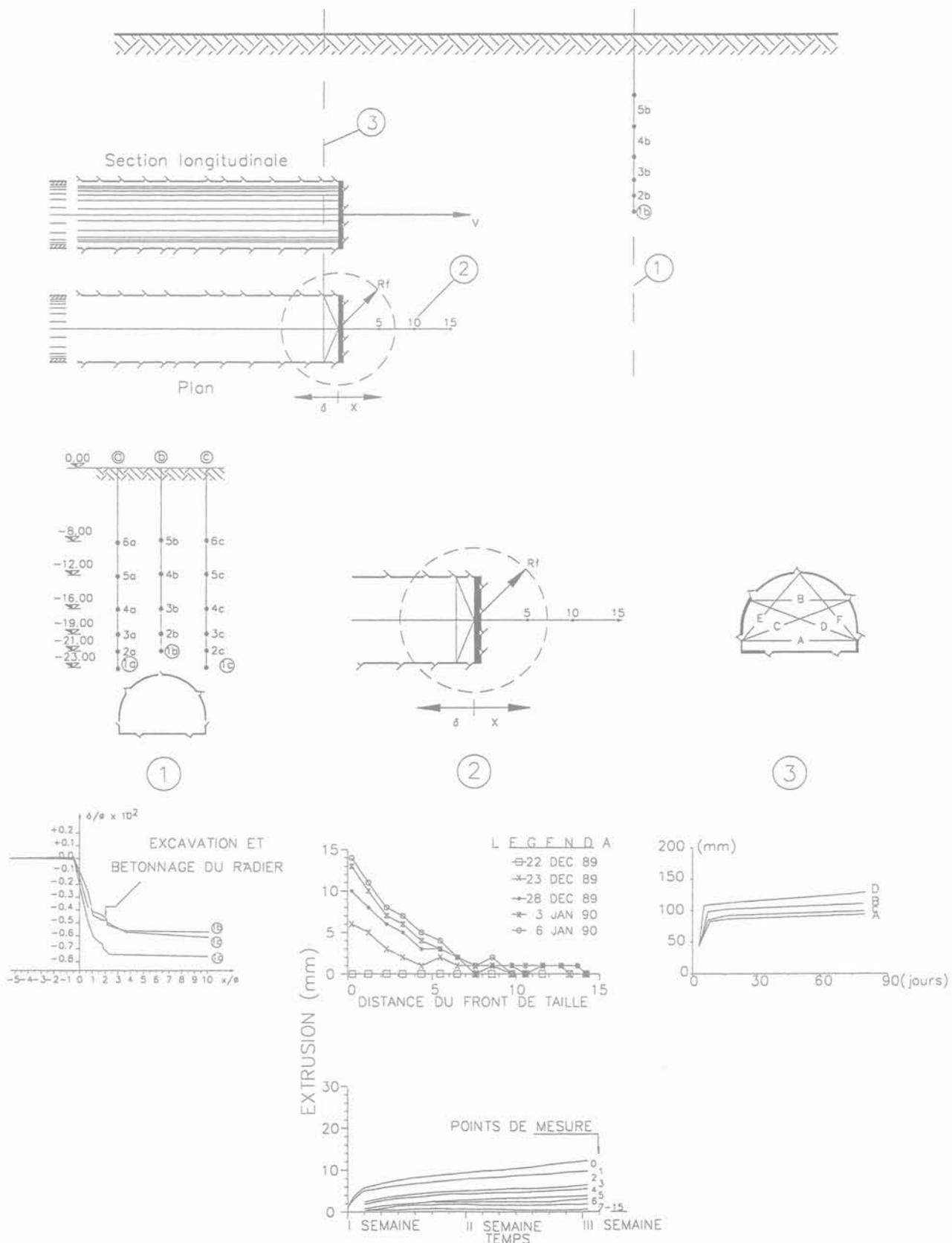


FIG. 10 Disposition des systèmes de mesure et résultats.  
Arrangement of measurement devices and results.

• on valorise l'importance des interventions de stabilisation en tant qu'instruments indispensables pour maîtriser les phénomènes de déformation et donc en tant qu'« éléments structurels » destinés à assurer la stabilité finale de la cavité (les tunnels sont encadrés et

payés en fonction de l'importance de leur déformation). A cet égard, il faut rappeler que dans le bilan économique d'une réalisation souterraine, les interventions de stabilisation et de consolidation du terrain sont restées les seules variables significatives alors que l'on

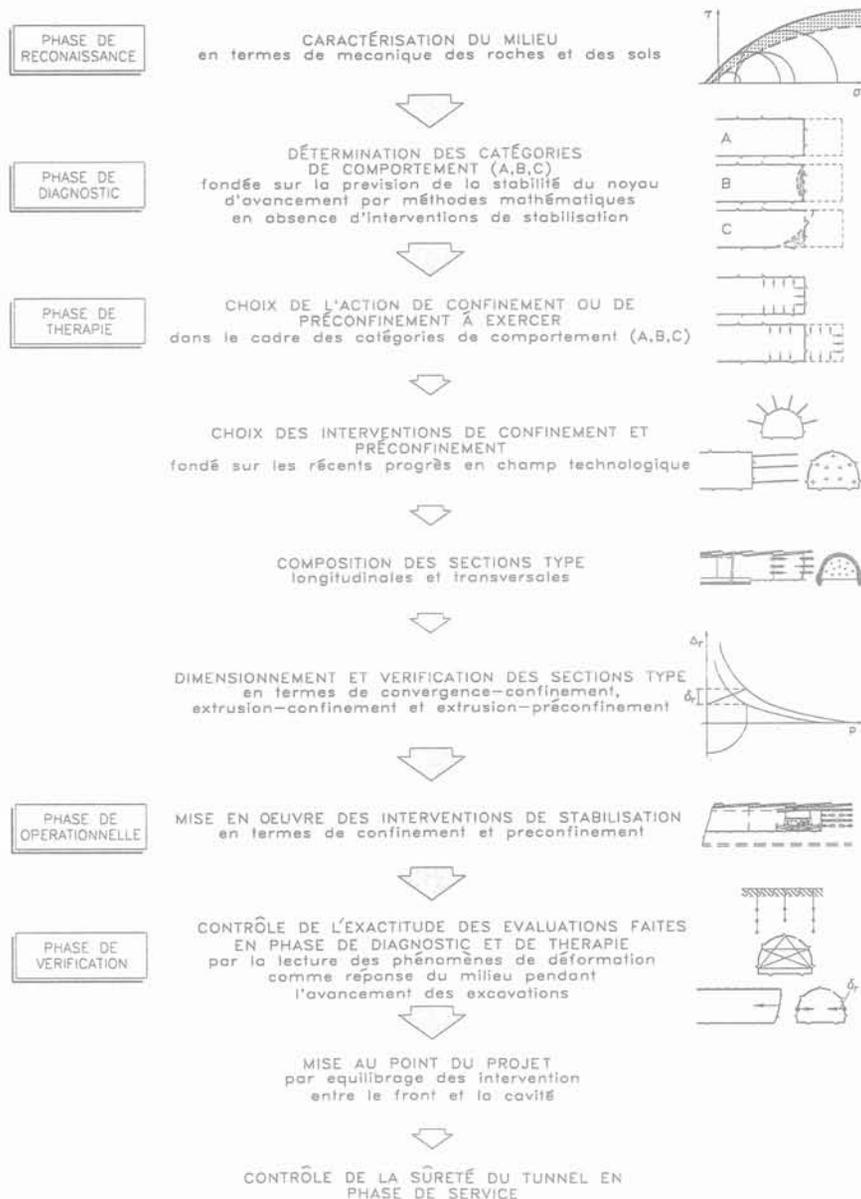


FIG. 11 Conception et exécution des tunnels.  
Design and construction of tunnels.

tend de plus en plus à considérer comme constants les postes représentés par l'excavation et le revêtement, quel que soit le type de terrain (Fig. 12) ;

- le projeteur – sur la base d'un projet complet et fiable – est amené à industrialiser les opérations d'avancement quel que soit le type de terrain, y compris les terrains les plus difficiles ;
- grâce à la possibilité de planifier les interventions, les délais et les coûts de construction, on évite le contentieux qui s'instaure normalement à l'heure actuelle entre la direction des travaux et l'entreprise de construction ;
- en adoptant comme référence un seul paramètre commun à tous les types de terrain (le comportement contrainte-déformation du front de taille), facile à mesurer objectivement au cours de l'avancement des travaux, on évite l'inconvénient le plus flagrant des systèmes de classification précédents (confronter les

classes géomécaniques avec les déformations) qui alimente si souvent le contentieux entre la direction des travaux et l'entreprise de construction.

Compte tenu de ces caractéristiques importantes, cette approche a fait l'objet en Italie d'une discussion dans une commission du ministère des Travaux publics, ayant pour objet la mise en place d'une réglementation technique et d'un cahier des charges doté d'une liste de prix valant pour tout le territoire national et, ainsi, trois importantes administrations italiennes [21-23] ont récemment refait leurs cahiers des charges.

Les exigences dictées par la planification font sans doute perdre à l'art de projeter et de construire des ouvrages souterrains une partie de leur beauté, mais elles lui confèrent très certainement une efficacité et une fonctionnalité plus grandes, sans pour autant contraindre ou conditionner l'imagination du projeteur.

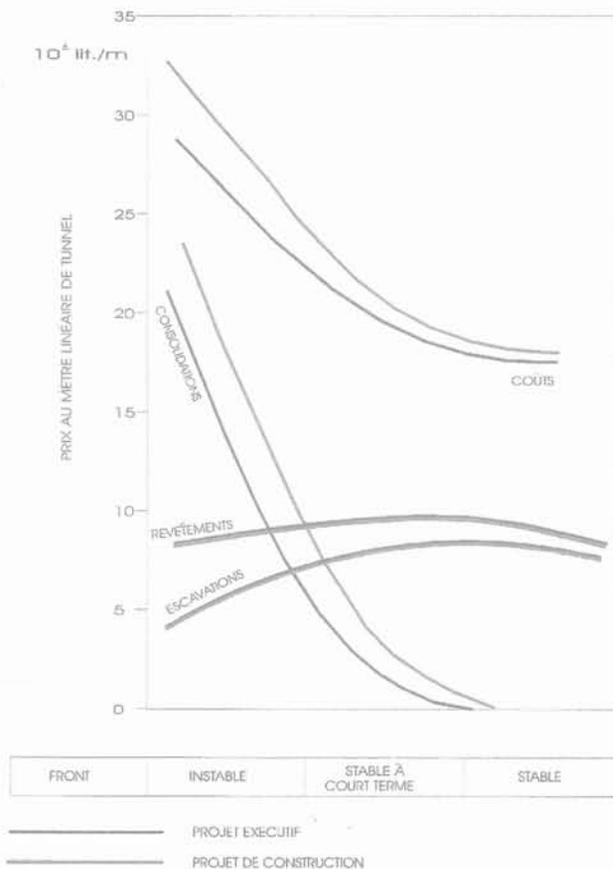


FIG. 12 Coûts unitaires des tunnels Malenchini et Rimazzano.  
Unit costs for the Malenchini and Rimazzano tunnels.

## Bibliographie

- [1] Lunardi P. – « Conception et exécution des tunnels d'après l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les sols. Présoutènement et préconfinement ». *Revue Française de Géotechnique*, n° 80, 1997.
- [2] Lunardi P. – « Conception et exécution des tunnels d'après l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les sols. Rôle et résultats de la recherche expérimentale ». *Revue Française de Géotechnique*, n° 84, 1998.
- [3] Bieniawski Z.T. – « Rock mass classification as a design aid in tunnelling ». *Tunnels & Tunnelling*, juillet 1968.
- [4] Lunardi P. – « Lo scavo delle gallerie mediante cunicolo pilota ». Politecnico di Torino, Primo ciclo di conferenze di meccanica e ingegneria delle rocce, Torino, 25-26 novembre 1986.
- [5] Campana M., Lunardi P., Papini M. – « Dealing with unexpected geological conditions in underground construction: the pilot tunnel technique ». Acts of 6th European Forum on Cost Engineering, Università Bocconi, Milano, vol. 1, 13-14 mai 1993.
- [6] Kastner H. – *Statik des Tunnel und Stollenbaues*, 1971.
- [7] Rabcewicz L.V. – « The New Austrian Tunnelling Method ». *Water Power*, 1969.
- [8] Kovari K. – « On the existence of the NATM: erroneous concepts behind the New Austrian Tunnelling Method ». *Tunnel*, 1/1994.
- [9] Lunardi P. – « Progetto e costruzione di gallerie: presentazione del metodo ADECO-RS ». ISMES. Programma di istruzione permanente, Bergamo 14-16 novembre 1988.
- [10] Lunardi P., Bindi R., Focaracci A. – « Technical and financial planning of underground works: the ADECO-RS method ». Acts of 6th European Forum on Cost Engineering, Università Bocconi, Milano, vol. 1, 13-14 mai 1993.
- [11] Lunardi P. – « Nuovi criteri di progetto e costruzione per una corretta pianificazione delle opere in sotterraneo ». SAMOTER: Convegno su La realizzazione delle grandi opere in sotterraneo, Verona, 27-28 mai 1993.
- [12] Lombardi G. – « Une méthode de calcul élastoplastique de l'état de tension et de déformation autour d'une cavité souterraine ». International Congress ISRM, Denver, 1974.
- [13] Lunardi P. – « Aspetti progettuali e costruttivi nella realizzazione di gallerie in situazioni difficili: interventi di precontenimento del cavo ». Convegno Internazionale su Il consolidamento del suolo e delle rocce nelle realizzazioni in sotterraneo, Milano, 18-20 mars 1991.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Lunardi P., Bindi R., Focaracci A. – « Nouvelles orientations pour la conception et la construction des tunnels dans des terrains meubles. Études et expériences sur le préconfinement de la cavité et la préconsolidation du noyau

## Bibliographie

---

- au front ». Colloque international Tunnels et microtunnels en terrain meuble, Paris, 7-10 février 1989.
- [17] Lunardi P., Focaracci A., Giorgi P., Papacella A. – « Tunnel face reinforcement in soft ground: design and controls during excavation ». Convegno Internazionale Towards New Worlds in Tunnelling, Acapulco, 16-20 mai 1992.
- [18] Lunardi P. – « Evolution des technologies d'excavation souterraine dans des terrains meubles ». Comité marocain des Grands Barrages, Rabat, 30 septembre 1993.
- [19] 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.
- [20] Lunardi P. – « La stabilité du front de taille dans les ouvrages souterrains en terrain meuble : études et expériences sur la consolidation du noyau d'avancement ». Symposium international Consolidation des sols : expérimentations grandeur réelle des années 80, Paris, 18 novembre 1993.
- [21] Autostrade S.p.A. – *Norme Tecniche d'Appalto*, 1992.
- [22] Italferr Sis T.A.V. S.p.A. – *Capitolato di Costruzione Opere Civili*, 1992.
- [23] A.N.A.S. – *Capitolato Speciale d'Appalto*, partie II : « Norme Tecniche », 1993.