

# les mesures in-situ dans les tunnels

par

**Pierre Londe**

Directeur, Coyne et Bellier  
Bureau d'Ingénieurs-Conseils  
Paris - France

## LES MESURES IN SITU DANS LES TUNNELS

Les méthodes modernes de dimensionnement et d'exécution des tunnels sont un compromis, ou plutôt un va-et-vient entre deux approches opposées ; la première consiste à tâtonner jusqu'à trouver le revêtement le plus économique, la seconde consiste à calculer en se servant de modèles théoriques.

Ce sont les mesures in situ qui fournissent la possibilité de ce compromis.

Ce sont elles aussi qui assurent la sécurité au cours de la vie de l'ouvrage.

### 1) Mesures avant l'exécution

Ces mesures sont destinées à fournir les données sur la **nature**, la **structure** et l'**état des contraintes** du massif.

Les renseignements tirés des sondages sont en général très maigres, surtout lorsque la couverture atteint plusieurs centaines de mètres.

Les essais couramment effectués en sondage (mesure de déformabilité au dilatomètre, mesure de la perméabilité, de la piézométrie, diagraphies) deviennent alors impraticables.

C'est surtout par l'exécution de galeries de reconnaissance (galeries pilote) qu'il est possible de recueillir les informations nécessaires sur le massif. Les mesures suivantes, réalisées en galeries, sont les plus utiles :

- mesure des contraintes naturelles au vérin plat ;
- mesure des contraintes naturelles par sur-carottage ;
- mesure de déformabilité à la plaque ;
- mesures par « petite sismique » ;
- mesure de convergence relative.

### 2) Mesures pendant l'exécution

Ces mesures sont destinées à contrôler, en cours d'exécution, la **validité du modèle mécanique** utilisé par le projeteur ainsi que la valeur numérique des **paramètres significatifs** introduits dans ce modèle. Elles permettent l'adaptation du dimensionnement des soutènements provisoires comme des revêtements définitifs en fonction du comportement réel du tunnel. Ces mesures, enfin, sont fondamentales pour la **sécurité du chantier**.

Deux règles sont à respecter si l'on veut faire bon usage de ces mesures :

- ne jamais éliminer à la légère un résultat inattendu ;
- mesurer des quantités qui, par nature, ne sont pas trop dispersées.

Les mesures suivantes sont les plus utiles :

- mesure de la convergence relative ;
- mesure des déplacements absolus ;
- mesure des efforts dans les barres d'ancrage.

### 3) Mesures en exploitation

Le rôle de ces mesures est de vérifier la **sécurité des ouvrages** en exploitation. Les conditions météorologiques ne sont pas les mêmes que lors de l'exécution, et d'autres appareils sont nécessaires. L'appareil idéal est fiable à long terme, automatique et lu à distance.

Les mesures suivantes sont les plus utiles :

- mesures des contraintes dans le revêtement ;
- mesure des déplacements relatifs ou absolus ;
- mesures d'alarme automatique.

### IN SITU MEASUREMENTS IN TUNNELS

Modern tunnel design and construction methods are a compromise or rather a swing back and forth between two entirely opposite approaches: one to find the most efficient support method by trial and error, the other by computation.

It is in situ measurement which makes this compromise possible. It ensures also the completed tunnel is safe in service.

1) **Measurements before construction** produce information on the **nature, structure** and **state of stress** of the rock mass. Boreholes are not usually very instructive, especially through several hundred metres of overburden.

Pilot tunnels for reconnaissance purposes are the main means of collecting information on the rock. The most useful measurements made in such tunnels are:

- natural stress measurements by the flat jack method;
- natural stress methods by overcoring;
- plate deformation tests;
- «petite sismique» measurements;
- yield measurements.

2) **Measurements during construction** are designed to **check the engineering model** used by the designers and the actual numerical values of the

**significant parameters** employed in it. They provide a basis for tailoring temporary and permanent support to actual conditions. Such measurements are also essential for **safety of workmen**.

There are two rules that must be followed:

- quantities which, by their very nature, are not too scattered, must be measured;
- and unsuspected results must not be lightly discarded.

The most useful measurements are:

- relative yield;
- absolute displacements;
- rock bolt loads.

3) **Measurements made during the service life** of the tunnel monitor the long-term safety under service conditions. Instrumentation requirements are not the same as during construction and other instruments are needed. The ideal instrument is reliable, automatic and remote reading.

The most useful measurements are:

- stresses in lining;
- relative and absolute displacements;
- automatic alarms.

# les mesures in-situ dans les tunnels (\*)

par Pierre LONDE

## INTRODUCTION

La plupart des tunnels sont creusés dans des massifs rocheux, c'est-à-dire dans un milieu **discontinu, anisotrope, hétérogène** et dont les discontinuités sont **remplies d'eau**. La mécanique des milieux continus, familière aux ingénieurs pour le calcul des structures, ne convient plus et les lois de la mécanique des sols sont inapplicables. Au surplus, l'excavation d'un tunnel supprime localement la continuité naturelle des efforts internes du massif. Faire un tunnel c'est d'abord **décharger** le milieu rocheux. Pour qu'un modèle mécanique soit correct, il faut qu'il tienne compte du comportement du massif au déchargement. Malheureusement, ce comportement est actuellement très difficile à prévoir, aussi bien pour le court terme que pour le long

terme. C'est dans ce contexte difficile qu'intervient le **rôle capital des mesures in situ**.

Les méthodes modernes pour dimensionner le soutènement d'un tunnel sont un compromis, ou plutôt un va-et-vient, entre deux démarches opposées : la première consisterait à **essayer** sur place jusqu'à trouver le revêtement le plus économique ; la seconde consisterait à **calculer** en se servant uniquement de modèles théoriques. Ce sont les mesures *in situ* qui fournissent la possibilité de ce compromis fécond.

Les mesures interviennent de façons distinctes aux trois stades de la vie d'un tunnel : avant son exécution ; pendant les travaux ; au cours de son exploitation en service.

## LES MESURES AVANT LES TRAVAUX

### 1. RECONNAISSANCES GENERALES

La première difficulté des reconnaissances tient à ce que les corrélations entre les propriétés géotechniques et les données géologiques sont floues et parfois même inexistantes. Seules pourtant importent réellement au concepteur de l'ouvrage **les propriétés géotechniques**, c'est-à-dire celles qui s'expriment en termes de déformabilité, de résistance mécanique, de contraintes naturelles, de direction d'anisotropie, de perméabilité, etc.

La seconde difficulté, d'autant plus grave que le tunnel est plus long et sous plus grande couverture, vient **des incertitudes** de la géologie et de l'hydrogéologie à grande profondeur. Malgré tout le soin mis par le géologue, il est constant que les exécutants aient des surprises lors des travaux.

Une erreur commune est de laisser le géologue tra-

vailer seul. Il est alors tenté de fournir, selon son tempérament, soit un modèle d'apparence sûre et entièrement défini où les hypothèses de travail sont dangereusement masquées par des coupes convaincantes, soit à l'inverse un rapport trop chargé de mises en garde contre le pire et qui, de ce fait, n'est plus utilisable. La vérité d'une étude géologique exploitable est entre ces deux extrêmes. Et pour y arriver, il n'y a qu'une méthode : la concertation, tout au long de la reconnaissance, entre le géologue et le concepteur du tunnel. Alors, les propriétés géotechniques **significatives** pour l'ouvrage seront mises en lumière plus vite, les incertitudes du modèle géologique seront délimitées, la part de risque irréductible sera connue et dans l'ensemble **les aléas du projet seront réduits**. C'est-à-dire que le projet sera meilleur.

### 2. GALERIES DE RECONNAISSANCE

Un moyen efficace, mais souvent jugé trop onéreux, est de pénétrer dans le massif avec des **galeries de reconnaissance**. L'idéal est la galerie pilote creusée tout le long du tracé du futur tunnel (fig. 1). En réalité, ses avantages sont tels que ce qui peut paraître en première analyse une dépense excessive se révèle être une source d'économie, à la fois par les assurances qu'elle apporte au stade du projet et par les aléas d'exécution qu'elle supprime. La galerie de reconnaissance permet en effet :

- de connaître sans lacune **les données naturelles, le long du tracé** ; on peut y faire **des mesures géotechniques** ;
- de prévoir **les procédés d'exécution** les mieux adaptés, notamment pour l'excavation et le soutènement provisoire ; elle éclaire les entrepreneurs soumissionnaires ;
- de faire **une section d'essai**, de la dimension du tunnel définitif, si on le juge nécessaire.

Ces mérites multiples et fondamentaux justifient largement que les maîtres d'ouvrage trouvent les moyens d'engager la dépense correspondante malgré la difficulté évidente qu'ils rencontrent à le faire tant qu'ils n'ont pas les crédits de travaux proprement dits.

(\*) Conférence donnée le 20 octobre 1977, au Comité Français de Mécanique des Roches et présentée en anglais le 5 avril 1977, au symposium de Zurich « Field measurements in rock mechanics ».

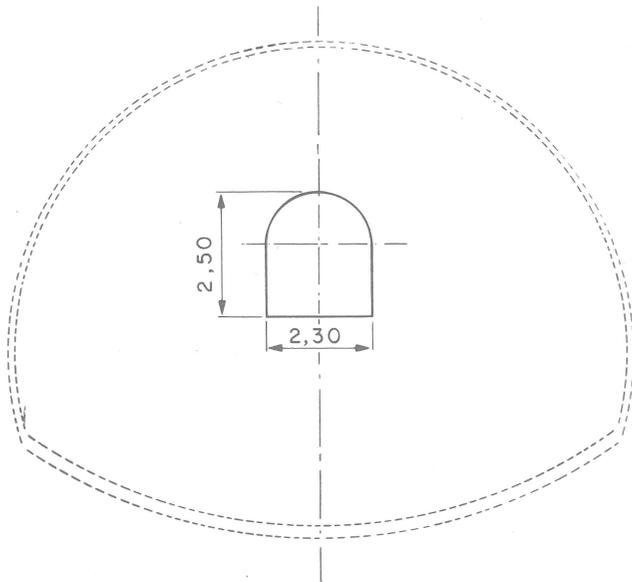


Fig. 1. — Galerie de reconnaissance.

## 2.1. Essais in situ en galerie

### Mesure des contraintes naturelles au vérin plat

La technique moderne de creusement de la saignée à la scie circulaire, et l'insertion du vérin plat sans interposition de mortier (fig. 2) permet de placer la saignée dans l'importe quelle position, y compris en calotte. On peut ainsi mesurer les contraintes tangentielles en piédroit et en calotte, ainsi que la contrainte longitudinale. Si l'on admet le comportement élastique linéaire pour le massif, on peut en déduire les contraintes principales supposées verticales et horizontales. Les valeurs qu'on tire de ce calcul approché sont **des ordres de grandeur**, qui renseignent utilement sur le type de problème qu'on aura à résoudre à l'exécution. Elles donnent notamment la direction de la contrainte majeure, loin d'être toujours la contrainte verticale.

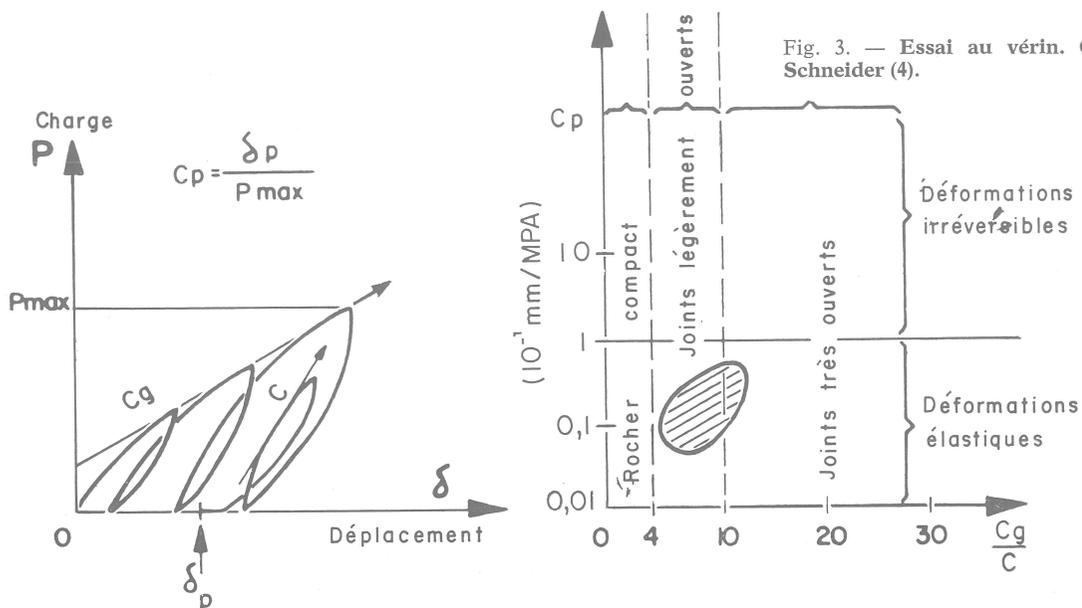
La méthode de « surcarottage » sera décrite au paragraphe 3.1. à propos des essais en sondages.



Fig. 2. — Saignée pour vérin plat en toit de galerie.

### Mesure de la déformabilité par l'essai à la plaque

Le principe de l'essai est simple. En réalité, le comportement complexe des massifs rocheux fournit des courbes non linéaires, non réversibles et affectées d'effets différés, si bien que l'interprétation des résultats est délicate. On peut en particulier définir **plusieurs** modules d'Young et **plusieurs** coefficients de



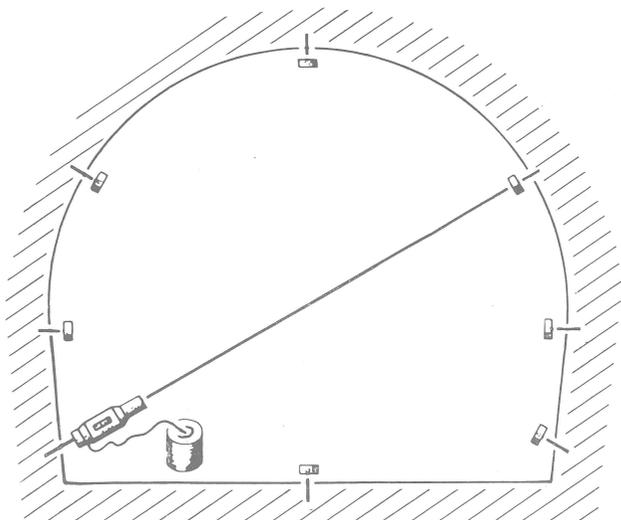


Fig. 4. — Extensomètre à fil. Mesure automatique de longueur.

Poisson. Le bon usage de l'essai est dans l'examen de la forme des courbes effort-déformation complètes plutôt que dans le calcul de modules tirés de la théorie élastique qu'on sait n'être justifiée que très rarement.

Une autre remarque fondamentale est à faire ici. L'essai à la plaque est un essai de chargement et non pas de déchargement. Il ne peut nous renseigner sur le comportement antérieur à l'essai, comportement qui est le seul en réalité à avoir une signification pour le projet du tunnel. Mais l'essai à la plaque, si on ne lui demande pas de fournir des modules de signification illusoire, a le mérite de permettre une classification des massifs rocheux (fig. 3, réf. 4).

Il est toujours utile d'apprécier les propriétés de fluage de la roche. Généralement, la loi de fluage est linéaire en  $\log(t)$ , ce qui permet, par extrapolation

de l'enfoncement en fonction du temps, de déduire un « module de déformation différée » ; ce module dépend évidemment de la pression appliquée.

La nature discontinue des massifs rocheux a pour conséquence d'induire un effet d'échelle marqué pour presque toutes les propriétés mécaniques. Ainsi, la déformabilité du massif doit-elle être mesurée sur un volume aussi grand que possible. Il est, à ce point de vue, préférable d'utiliser la force totale développée par le vérin sous la forme d'une contrainte modérée (7 MPa) appliquée à une grande surface d'appui (diamètre 60 cm), plutôt qu'une contrainte forte appliquée à une petite surface. Les résultats sont plus directement interprétables.

#### Mesure de la convergence

La mesure de la réduction de dimension intérieure d'une galerie est beaucoup plus significative que les mesures faisant intervenir des forces ou des contraintes, d'une part parce qu'elle est plus facilement interprétable, d'autre part parce qu'elle donne des résultats moins dispersés. L'appareillage couramment utilisé en galerie de reconnaissance est très simple. Un dispositif récent et qui est appelé à un grand développement est la mesure au fil invar à tension constante. C'est ainsi que fonctionne le Distomètre (ISEHT). L'appareil utilisé en France, le Distomatic (Télémac), assure la tension à 0.1 N près (10 g) et affiche la longueur à 1/100 mm près (fig. 4).

#### Mesure des déplacements absolus

Les mesures de convergence sont des mesures relatives. Pour connaître les déplacements absolus, les méthodes de la topographie, par triangulation et nivellement avec rattachement à des bases de référence éloignées peuvent être employées. Mais elles sont longues à faire et à interpréter. On leur préfère des mesures directes de variation de longueur. L'extensomètre communément adopté, mesure la distance entre un point réputé fixe, au fond d'un forage assez long,

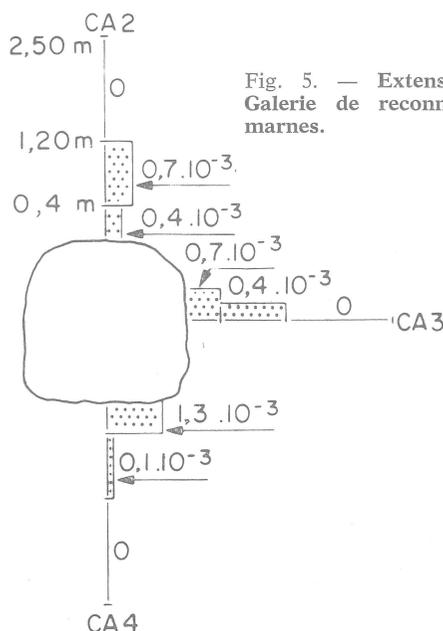
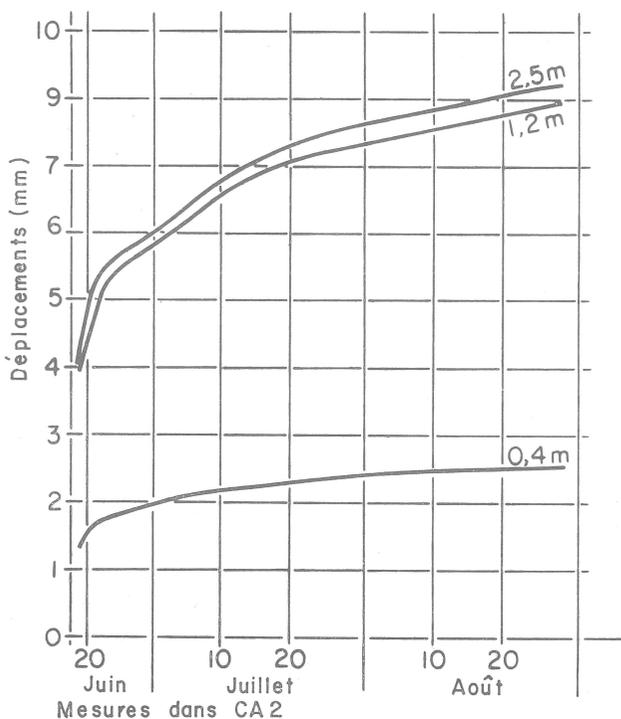


Fig. 5. — Extensomètre en forage. Galerie de reconnaissance dans des marnes.

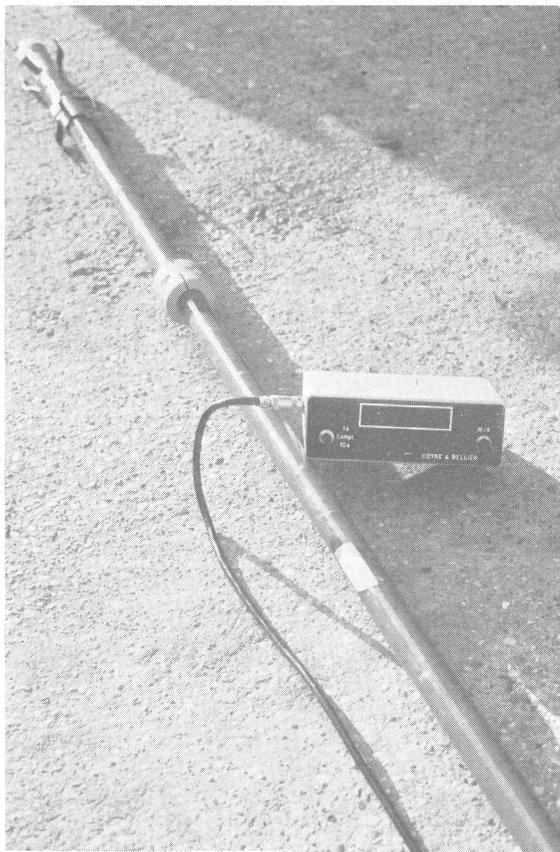


Fig. 6. — Extensomètre en forage à circuits oscillants.

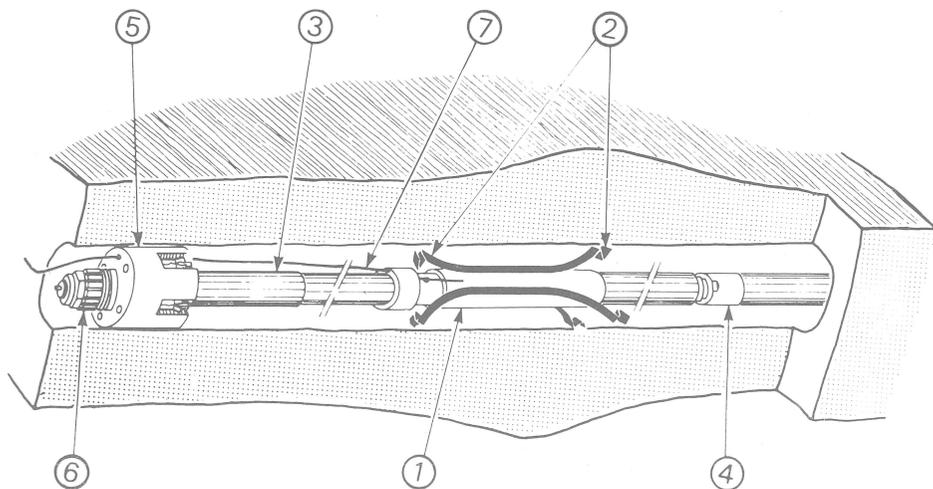


Fig. 7. — Extensomètre en forage à circuits oscillants.

1. Barre de couplage
2. Ressort d'ancrage
3. Canne
4. Connecteur étanche
5. Tête
6. Sortie
7. Aiguille de libération des ressorts

et l'entrée de ce forage. Il existe aussi des extensomètres à bases multiples, qui utilisent d'autres points intermédiaires le long du forage, de façon à obtenir la loi des déplacements du massif en profondeur et non seulement à la paroi de la galerie.

On utilise parfois des  **fils tendus**  (Terrametrics, Télémac), ou des  **barres scellées**  (Interfels) ou encore des  **tubes télescopiques**  (SEIL). La figure 5 donne un résultat type, où l'on voit que les déplacements de la paroi sont limités à une épaisseur de roche comprise entre 0.40 m et 1.20 m, et où l'on constate qu'au bout de deux mois et demi après l'ouverture de la galerie de reconnaissance ils ne sont pas encore stabilisés (évolu-

tion linéaire de 2/100 mm par jour). Cette indication est importante pour le projet.

Un appareil récent, appelé  **Distofor**  (Télémac) utilise des circuits oscillants (fig. 6 et 7). On peut dans un même forage installer un grand nombre de points de mesures. La lecture est directe et peu sujette à erreur systématique comme toutes les mesures de fréquence. Cet appareil a une très grande précision, qualité  **indispensable**  en milieu rocheux où des mesures en dents de scie, parce que pas assez précises, sont peu utilisables.

#### Mesure des venues d'eau

Lorsque la galerie de reconnaissance est le siège de venues d'eau, il est recommandé de les collecter pour pouvoir en mesurer le débit. Cette mesure, et son évolution dans le temps, en relation si possible avec les mesures  **piézométriques**  faites au voisinage ainsi qu'avec les débits des sources de la région, donne des indications précieuses sur le régime des eaux souterraines.

#### Mesures en « Petite sismique »

La « Petite sismique » (réf. 4) est une adaptation de la sismique traditionnelle pour servir à caractériser les propriétés mécaniques fondamentales du massif rocheux liées à la nature de sa fracturation. Le principe de la méthode consiste à mesurer, à l'aide d'un appareillage portable léger, non seulement les célérités (longitudinales et  **transversales** ) des ondes dues à un choc, mais aussi d'analyser le spectre du signal reçu, de chiffrer sa  **longueur d'onde**  et d'apprécier la  **perte d'énergie**  le long du parcours. Ces différents paramètres ont été corrélés empiriquement sur un grand nombre de massifs avec les propriétés fondamentales

de la fracturation telles que sa densité et sa nature, ouverte ou à remplissage argileux ; on tire aussi des indications sur la qualité de la matrice rocheuse. Enfin, des  **corrélations**  significatives permettent d'évaluer à partir des paramètres dynamiques comme la fréquence du signal reçu, la valeur de certains paramètres statiques qu'on obtient normalement mais moins facilement par l'essai à la plaque (fig. 8). Chaque point de la figure représente un site différent, depuis du granite massif jusqu'à des roches sédimentaires tendres.

La « Petite sismique » est une  **méthode rapide et économique**  d'identification du massif traversé par une galerie, qui revalorise beaucoup la reconnaissance.

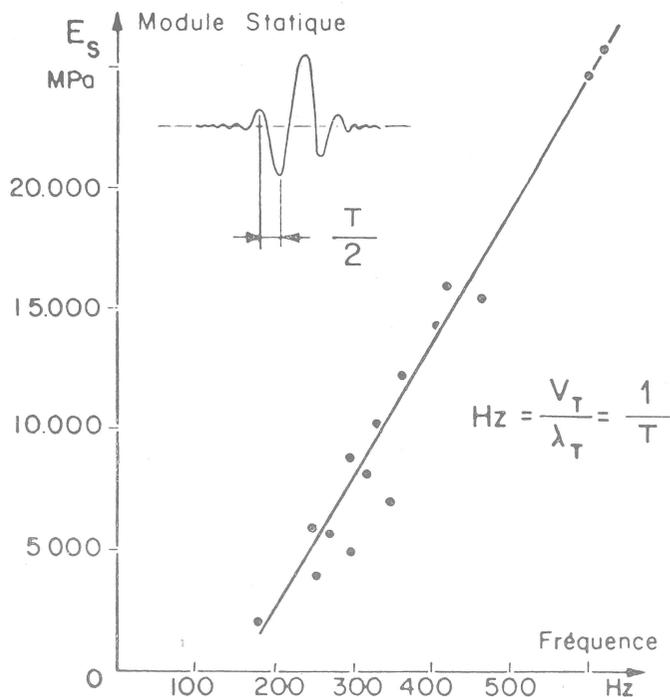


Fig. 8. — Corrélation entre petite sismique et essai au vérin.

#### Essais d'ancrage

La galerie de reconnaissance est précieuse pour faire, avant les travaux, des essais sur la tenue des

boulons d'ancrage. On peut y tester les meilleurs moyens de perforation et de scellement et y étudier l'évolution des efforts dans les boulons. L'essai le plus simple, récemment normalisé par la Société Internationale de Mécanique des Roches (SIMR), est la **résistance à l'arrachement d'un boulon scellé** (réf. 7). Un essai beaucoup plus élaboré, et qui n'a encore reçu que très peu d'applications, consiste à sceller des **boulons creux**, de section équivalente aux boulons normaux, à l'intérieur desquels sont placés des capteurs de déformation.

#### 2.2. Essais sur échantillons

##### Essais d'identification

La galerie de reconnaissance se prête bien au prélèvement d'échantillons représentatifs tant des sols, en particulier des remplissages de fractures et de failles, que des roches. Il sera mentionné ici pour mémoire l'intérêt qu'il y a à déterminer au laboratoire les propriétés servant à l'**identification** (classification) des terrains ainsi que celles dont l'interprétation mécanique est utilisée dans le projet : **résistance au cisaillement** des discontinuités, qui importe à la stabilité, et **résistance à la compression** de la matrice, qui renseigne sur le comportement à la foration. Une préoccupation majeure est la recherche des terrains **gonflants** ; dès qu'un terrain est suspect, il faut en faire l'**analyse minéralogique**. Enfin, toujours pour apprécier la réaction de la roche aux outils d'excavation on peut faire des **essais d'abrasivité**. La SIMR vient de publier des recommandations concernant ces essais (réf. 6).

### 3. SONDAGES

Les renseignements tirés des sondages sont en général insuffisants, surtout lorsque la couverture atteint plusieurs centaines de mètres d'épaisseur. Cela tient au nombre nécessairement limité de sondages qu'on peut pratiquement faire (coût et délai) et à la faible portion de ces sondages directement utilisable pour le projet. Dans la figure 9, quatre sondages, totalisant une longueur de forage de 600 m, fournissent seulement 50 à 60 m de carottes situées dans la zone du futur tunnel. D'autre part, les renseignements géologiques sont très **incomplets** et le dessin de la structure générale du massif comporte de grandes incertitudes qu'un géologue averti doit mentionner **explicitement** par des points d'interrogation et des lignes en pointillé. Malgré ces critiques, on peut dans certaines conditions en tirer parti mieux qu'on ne le fait couramment, notamment du point de vue géotechnique.

#### 3.1. Essais en sondage

##### Mesure des contraintes naturelles par surcarottage

De nombreux auteurs ont abordé ce problème difficile. Il consiste à rechercher les contraintes régnant dans le massif à l'aide des déformations qui accompagnent leur **libération complète**.

Ces mesures sont délicates. On obtient toujours des valeurs très dispersées, car dans un milieu discontinu les contraintes varient beaucoup au voisinage des discontinuités. La très petite base de mesure imposée par la technique du surcarottage en sondage accentue cette dispersion.

**Mesure de la déformabilité au dilatomètre** : Plusieurs appareils permettent de mesurer la variation du diamètre d'un forage sous l'effet d'une pression radiale. Le plus utilisé en France est le **Médératec**, mis au point par EDF. L'appareil donne les courbes effort-déformations dans trois directions de l'espace, c'est-à-dire qu'il fournit la déformabilité et le degré d'anisotropie du massif dans le plan perpendiculaire au forage. Il faut noter que,

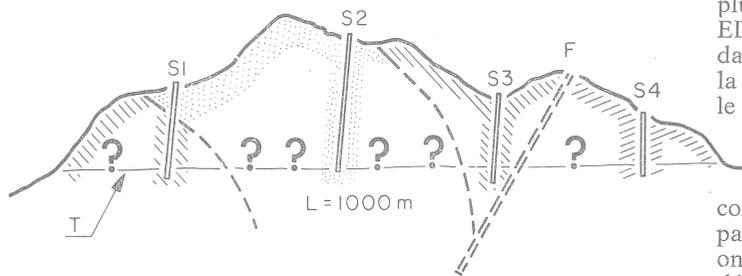


Fig. 9. — Les incertitudes d'une reconnaissance par sondages :

- S - sondage
- T - tunnel
- F - Faille
- ? - Conditions inconnues

comme dans l'essai à la plaque en galerie, on n'obtient pas le comportement au premier déchargement. Mais on peut utiliser le classement de la figure 3. Un progrès décisif sera fait le jour où un appareil du même type pourra descendre à plusieurs centaines de mètres dans des forages de diamètres usuels. Il faudra alors résoudre une difficulté sérieuse : celle du repérage de direction à grande profondeur.

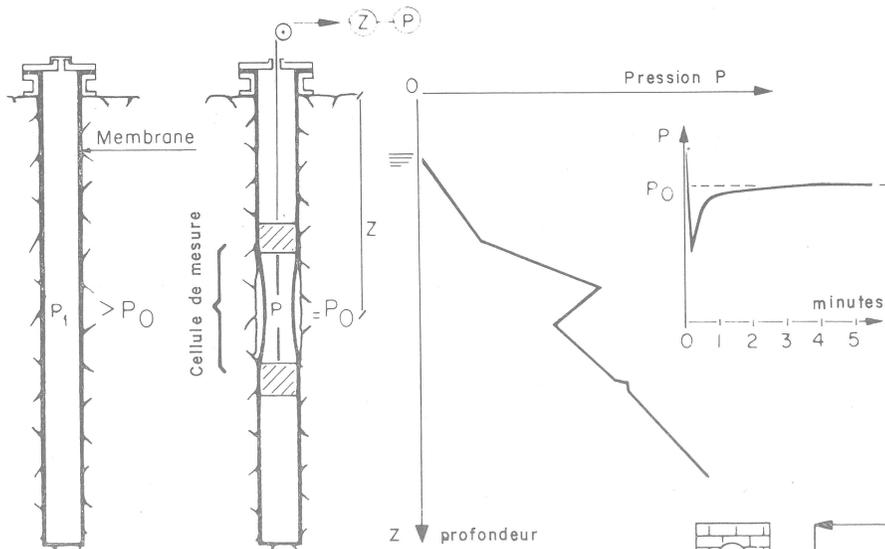


Fig. 10. — Piézomètre continu en forage.

**Mesure de la perméabilité et de la piézométrie :** Un intérêt majeur des sondages de reconnaissance réside dans les indications qu'ils fournissent quant au régime hydraulique souterrain.

La pratique des essais d'eau classiques dits « essais Lugeon » renseigne sur la nature des régimes hydrauliques possibles à travers les fractures. Ces essais, s'ils sont bien faits, donnent avant tout le **type de fracturation**. Il est erroné d'en tirer, comme on le fait trop souvent, des valeurs numériques de la perméabilité. Toutefois, ils permettent de **classer** entre eux les différents terrains rencontrés et de détecter ceux qui pourront donner lieu à des venues d'eau importantes.

La pression de l'eau présente dans les fractures de la roche est une donnée majeure pour l'appréciation du comportement du massif. Lorsque l'excavation y pénètre, elle provoque un **écoulement** dont le gradient est générateur de forces du même ordre de grandeur que celles dues au poids de la roche. Les sondages sont précieux pour la mesure de ces pressions. La solution classique consiste à descendre des crépines, séparées entre elles par bouchons étanches, chaque crépine ayant son tube piézométrique individuel. On ne peut pratiquement installer que deux ou trois crépines par forage. Une autre solution, beaucoup plus satisfaisante, consiste en un chemisage du sondage par une membrane souple étanche. Dans l'appareil de J. Bernaix (réf. 2), le **Piézofor** (fig. 10), la membrane est continue, alors que dans l'appareil de Cl. Louis, on se sert pour la mesure, d'une courte longueur de sondage laissée nue entre deux obturateurs généralisés.

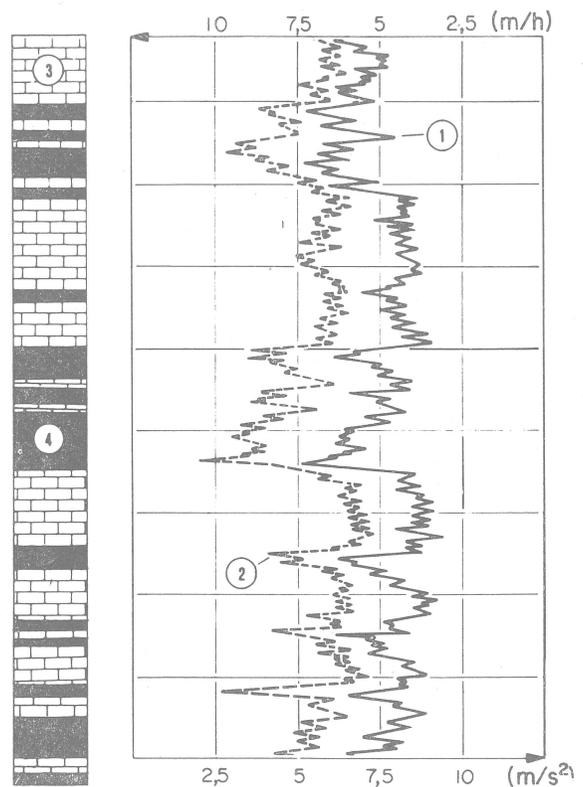
**Diagraphies en sondage :** Plusieurs types de diagraphies peuvent être faites en sondage, la technique en ayant été mise au point par les pétroliers. Néanmoins, leur usage n'étant pas très fréquent encore pour l'étude des tunnels, elles ne seront énumérées ici que pour mémoire : examen photographique, examen visuel direct à l'endoscope, examen en télévision, log-sonique (microsismique), log-électrique (résistivité), log-rayonnement gamma, log « vitesse d'avancement ». Ce dernier type de diagraphie semble vouée à un bel avenir car, peu coûteux, il valorise beaucoup les sondages en donnant les homogénéités mécaniques (fig. 11, réf. 9).

### 3.2. Mesures sur carottes

Ce n'est que depuis peu d'années qu'on commence à tirer tout le parti géotechnique qu'on peut tirer des

Fig. 11. — Diagraphie en sondage :

1. Vitesse de pénétration
2. Accélération réfléchie
3. Calcaire
4. Marne



centaines de mètres de carottes recueillies au cours d'une campagne de reconnaissance. Jusqu'alors, on transformait simplement cette matière précieuse en relevés de sondages, dits « logs » géologiques, sans en extraire toute la substance. Notons que pour pouvoir commodément y revenir, l'examen des boîtes de carottes doit être accompagné de leur **photographie systématique en couleur**, chaque boîte portant un numéro de référence clair, une échelle de longueur et une échelle chromatique.

**Essais de résistance entre pointes :** Tous les essais mentionnés au paragraphe 2.2. ci-dessus peuvent être faits sur carottes. Il ne sera question ici que d'un essai nouveau, spécifique de la mesure de la résistance des carottes. Il s'agit de la rupture par **écrasement entre pointes**. Cet essai est maintenant normalisé par la SIMR (réf. 5). On l'exécute avec un appareil portatif léger, sur le chantier même de sondage. Etant très rapide, il permet de tester un grand nombre d'échantillons.

**Fracturation des carottes** : Avec le RQD (Rock Quality Designation ou pourcentage de carottes de longueur supérieure à 10 cm) un important progrès était fait par l'introduction d'une mesure, à la place d'une appréciation subjective par le géologue ou l'ingénieur, du degré de fracturation. Le grand intérêt de cet indice est qu'il est en corrélation avec les propriétés fondamentales régissant la tenue d'une excavation. En effet, c'est l'intensité de la fracturation qui domine à la fois la déformabilité du massif et sa résistance ultime. On peut s'étonner toutefois qu'il existe une relation entre le soutènement le mieux adapté et un paramètre aussi « pauvre » que le RQD. C'est en tout cas ainsi qu'a réagi Nick Barton en proposant de nuancer la valeur fournie par le RQD en introduisant des correctifs liés à la nature des discontinuités et à la présence de l'eau (réf. 1). A l'aide de l'examen de plus de deux cents tunnels exécutés, il a établi une échelle de correspondance entre le RQD modifié et trente-huit types distincts de soutènement. Il est probable que l'avenir montrera la précision quelque peu illusoire de cette correspondance, mais elle reste extrêmement intéressante par l'usage exclusif des sondages qui y est fait.

**Classification des massifs rocheux** : De nombreux auteurs ont proposé des méthodes pour classer les mas-

sifs rocheux afin de les caractériser autrement que par des mots vagues. Il s'avère que la plus prometteuse de ces classifications, en cours d'élaboration par la SIMR, peut être pratiquée à l'aide de sondages. Cela lui donne un grand intérêt pour l'étude des tunnels profonds.

Pour être efficace, une classification doit remplir trois conditions fondamentales : être **simple**, à partir de paramètres en nombre réduits et calculables sans ambiguïté ; être **significative**, en utilisant les paramètres les plus significatifs ; être **universelle**, de façon à pouvoir être utilisée le plus généralement possible, et permettre de ce fait le maximum de comparaisons.

Le projet de classification de la SIMR retient les paramètres suivants : la dénomination géologique du massif, l'épaisseur des couches (cinq classes), l'espacement des fractures (cinq classes), la résistance à la compression simple de la matrice (cinq classes), le contraste de résistance (cinq classes).

Ce dernier critère vise à caractériser l'importance plus ou moins grande des plans de faiblesse, en donnant le pourcentage des carottes ayant une résistance à la compression inférieure à 10 % de la résistance moyenne de la roche saine. Il est possible qu'un critère plus significatif soit à définir à partir de la résistance au cisaillement des fractures ou de leur remplissage.

## MESURES PENDANT LES TRAVAUX

### 4. LA METHODE

Il est devenu classique, depuis peu il est vrai, d'utiliser la mesure pendant les travaux **comme outil de conception du projet et de détermination des méthodes d'exécution**, deux facteurs qu'on ne peut d'ailleurs pas dissocier : tel projet impose telle méthode d'exécution. Les points clés de cette méthode comportent :

- un **projet** tel qu'il puisse s'accomoder de conditions plus défavorables que celles qu'on a supposées initialement ;
- **des mesures** bien adaptées et significatives ;
- **des équipes** de chantier capables d'interpréter correctement les comportements observés et d'agir en conséquence ;
- **des experts** rapidement disponibles pour aider à prendre les décisions difficiles.

Lorsque ces facteurs sont réunis, la méthode permet **des économies spectaculaires**, et permet en outre des réalisations où **les méthodes traditionnelles auraient échoué**.

Selon la nature du projet, sa difficulté, les habitudes du maître d'ouvrage, le style du concepteur, l'expérience de l'entrepreneur, les buts recherchés par les mesures peuvent différer. Mais la tendance actuelle est très marquée : tous ceux qui sont énumérés ici sont pris en compte de plus en plus généralement.

- **Prévenir** suffisamment à l'avance pour qu'une intervention corrective soit possible et évite des désordres, notamment des ruptures, et leurs conséquences désastreuses sur la sécurité du personnel et sur le prix des travaux.
- **Contrôler** certaines données spécifiques, soit qu'elles aient une signification contractuelle (débit des venues d'eau, justification des hors profils, tassements admissibles de la surface du terrain naturel,

intensité de la précontrainte, quantité de boulons, etc.), soit qu'elles soient nécessaires à mieux connaître pour y adapter le projet (traversée d'une zone de faille, d'une roche gonflante, etc.), soit qu'elles méritent d'être bien connues en prévision d'un litige, soit enfin que leur mesure améliore nos connaissances pour une bonne maintenance de l'ouvrage en service ou pour un meilleur projet d'ouvrages futurs.

- **Réduire les incertitudes** relatives aux hypothèses faites sur les paramètres du projet; ce qui augmente la confiance qu'on a en définitive dans le comportement du tunnel en service ; ce qui évite les dépenses inutiles d'un projet surdimensionné ; ce qui permet de ne pas tout fixer à l'avance et de prendre les décisions quant aux détails d'exécution en toute connaissance de cause.
- **Economiser** en faisant des travaux « sur mesure », qui sans cela seraient nécessairement surdimensionnés.
- **Crédibiliser** les méthodes modernes de construction des tunnels, à l'aide de données chiffrées convaincantes (par exemple, la réduction des convergences par le soutènement immédiat).

Le principal de ces considérations est inspiré du très intéressant petit livre récemment publié par K. Lane et donné en réf. 3.

#### 4.1. Qualités requises des instruments de mesure

Les mesures pendant les travaux ne sont pas des mesures de laboratoire ; elles se font en plein chantier, et dans un chantier particulièrement dur, celui de

travaux souterrains. Aussi, les conditions suivantes doivent-elles être réunies sous peine de voir les mesures sans signification.

- L'appareillage doit être **facile à installer et bien protégé**.
- **La sensibilité des mesures doit être grande**, car le milieu rocheux est rigide et c'est en détectant le début d'une évolution anormale qu'on pourra intervenir efficacement (ne pas oublier qu'au temps de réaction du terrain, il faut ajouter le temps de réaction des hommes).
- L'auscultation doit permettre un contrôle intégral **dans le temps et dans l'espace**, depuis l'ouverture de l'excavation jusqu'au stade final.
- Les lectures doivent être **rapides**, à interprétation **immédiate**, sans calculs intermédiaires, longs et sources d'erreurs.
- La pose et la lecture des appareils doivent **perturber au minimum** le rythme du chantier, surtout à proximité du front; ceci peut conduire à installer certains appareils à partir du terrain naturel.

Les appareils qui ont le plus de chance de réussir sont ceux qui respectent toutes ces conditions.

#### 4.2. Quelques règles à respecter pour un bon usage des mesures

Les mesures en cours d'exécution du tunnel vérifient la validité du modèle mécanique utilisé pour établir le projet, ainsi que la valeur numérique des paramètres significatifs introduits dans ce modèle.

Si donc une valeur mesurée ne correspond pas à la prévision trois explications sont *a priori* possibles : (a) la mesure est fautive ; (b) le modèle mécanique est incorrect ; (c) les valeurs numériques supposées de certaines données sont incorrectes.

Il faut souligner que l'ingénieur surpris par une mesure qu'il n'a pas prévue a trop souvent tendance à la juger fautive. C'est en général la mesure qui est bonne et le calcul, trop éloigné des conditions réelles, qui est incorrect. Lorsque la mesure insolite est jugée bonne, il reste alors à corriger le projet. Mais la chose n'est pas simple, car le nombre de paramètres intervenant dans le calcul est grand, et plusieurs corrections sont *a priori* également possibles pour expliquer le comportement observé. On ne peut sortir de cette difficulté qu'en intégrant un assez grand nombre de mesures, de natures différentes, jusqu'à ce que le modèle rende compte de la **totalité** des observations faites.

Une autre règle à respecter est de mesurer des quantités qui, par leur nature, ne sont **pas trop dispersées**. Le milieu rocheux, hétérogène et discontinu, n'a de comportement directement interprétable que sur des longueurs, des surfaces ou des volumes assez grands pour « lisser » les accidents élémentaires. Enfin, il est indispensable, pour la sécurité du chantier, de tenir **les graphiques de mesure** strictement à jour. Car ce n'est pas tant la valeur absolue d'une mesure qui prévient de la rupture que sa loi d'évolution dans le temps.

### 5. MESURES DE CONTRAINTES

Les mesures de contraintes sont les plus difficiles à interpréter, à la fois parce que l'appareillage modifie toujours la distribution locale des efforts, et parce qu'elles donnent des résultats dispersés tenant à la nature discontinue du milieu rocheux.

#### 5.1. Cellules plates

La mesure se fait sur le même principe que celle par vérin plat. Mais ici on s'intéresse aux variations de contraintes à partir d'un état initial. Les cellules couramment employées en France sont celles mises au point par Gloetzl, dont le principe est bien connu. Leur mise en place pratique est délicate, car il faut assurer un parfait contact entre la cellule et les matériaux encaissants, béton ou roche.

En fait, dans une mesure de ce type, c'est encore l'analyse de la déformation d'ensemble du revêtement de béton qui renseigne le mieux. Moyennant des hypothèses pas très difficiles à faire sur le module du béton, on utilise **l'anneau constitué par le revêtement comme un grand dynamomètre**, à l'échelle du problème considéré. S'il est équipé lui-même d'extensomètres (fig. 12), on peut faire une bonne interprétation des pressions de terrain.

#### 5.2. Dynamomètres longs

La force transmise par les ancrages peut être mesurée facilement dans les boulons à ancrage ponctuel. Il suffit d'installer un **dynamomètre en tête de boulon**. Il existe à cet effet des disques dynamométriques de faible encombrement. Lorsque le boulon est scellé sur toute

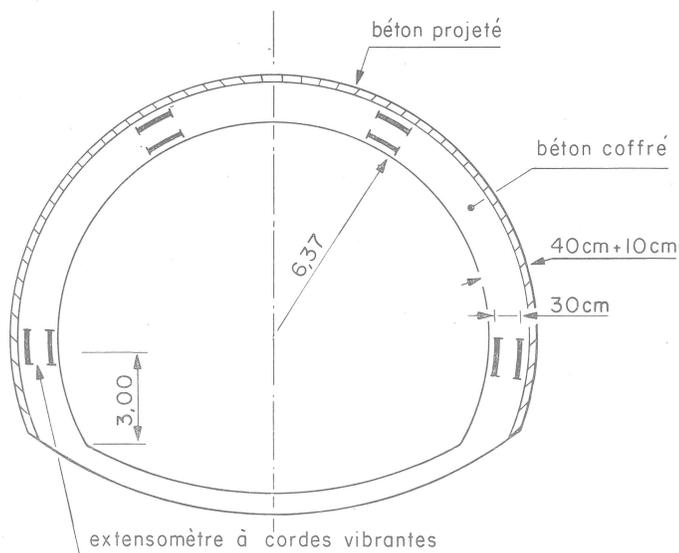


Fig. 12. — Extensomètre dans un revêtement en béton.

sa longueur, il faut recourir aux systèmes plus complexes décrits au paragraphe 2.1. Il semble que les boulons creux constituent de véritables **extensomètres**, car les forces qu'ils développent sont négligeables à l'échelle des efforts mis en jeu et ne modifient pas appréciablement les déformations du massif (s'ils les modifient c'est par un tout autre mécanisme, qui est de s'opposer à la perte de résistance du massif).

## 6. MESURE DES DEPLACEMENTS

Les mesures de déplacement du terrain ou du soutènement sont de loin **les mesures les plus sûres** et les plus utilisées pendant les travaux.

### 6.1. Contrôle topographique

**Contrôle de surface :** Le passage de l'excavation, surtout sous faible couverture, se traduit par des tassements de la surface. Le contrôle de surface se fait en général par les procédés habituels de nivellement optique. Pour apprécier le risque de dommages aux édifices, il faut faire les mesures sur une superficie assez étendue, car ce n'est pas tant le tassement absolu qui importe que ses **variations spatiales**. La courbure de la surface des tassements compte plus que son amplitude. C'est pourquoi d'ailleurs on a pu utiliser avec succès des clinomètres de précision, installés dans les caves des immeubles.

**Contrôle en souterrain :** Les mesures topographiques, par nivellement et triangulation, sont largement employées pour suivre l'évolution des mouvements du terrain ou du revêtement. Par rattachement à des bases extérieures fixes, elles donnent les valeurs absolues des déplacements. Mais, lorsque le tunnel est long, leur précision est vite insuffisante pour détecter à temps le déclenchement d'un mouvement suspect. D'autre part, elles demandent un **temps de calcul et d'interprétation** qui les empêchent d'être des mesures immédiates. Enfin, la mise en station des théodolites dans le chantier de tunnel pose des problèmes sérieux et fait qu'on ne peut pas, pratiquement, exécuter les mesures aussi souvent qu'il serait souhaitable. A titre d'exemple, la figure 13 donne la position des sept plots de mesure installés tous les 30 m dans un tunnel autoroutier. Il faut signaler toutefois que la précision des mesures et leur périodicité ont été insuffisantes pour prévenir un effondrement de voûte, sur une longueur d'environ 20 m, survenu sans signes prémonitoires dans des calcaires marneux.

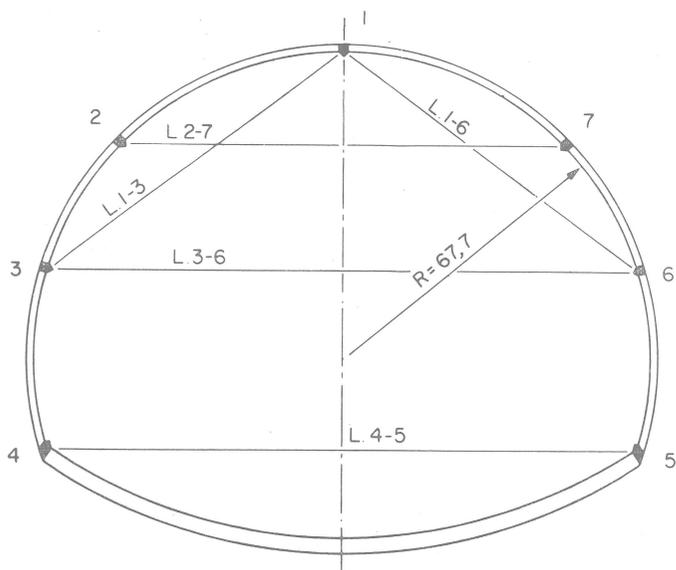


Fig. 13. — Mesures topographiques en tunnel. Sept repères en section pour triangulation et nivellement.

### 6.2. Mesure directe de la convergence relative

Dans beaucoup de cas, il suffit d'utiliser des **mesures au fil tendu**, comme celle décrite au paragraphe 2.1., qui ont l'avantage de ne pas encombrer le chantier, et qui donnent une mesure **directe et immédiate**. Mais il n'est pas facile de prendre des repères en voûte. Des systèmes utilisant **des ondes cohérentes réfléchies** (radar ou laser) sont en développement actuellement. Ils donneront peut-être une solution commode à la mesure des mouvements de la clé de voûte. On verra au paragraphe 8 l'utilisation de la stéréophotographie.

### 6.3. Mesure des déplacements absolus

On peut utiliser les méthodes décrites au paragraphe 2.1. Ce sont les fils ou les barres **en forage**, les repères magnétiques, les appareils à circuit oscillant, ou même les boulons creux scellés comme celui décrit au paragraphe 2.1.

Une amélioration pratique considérable de l'extensomètre à circuit oscillant consiste à réaliser la mesure à distance, **par radio**. Un tel appareil existe à l'heure actuelle sous forme de prototype opérationnel. La lecture et l'interprétation sont immédiates sans perturbation dans la marche des travaux.

Un autre appareil qu'il convient de citer permet de mesurer les déformations du massif le long d'un forage, à partir de la surface (fig. 14). Le procédé extensométrique est encore basé sur les variations de fréquence de circuits oscillants. La sonde de mesure appelée « Extensofor » (Télémac) (fig. 15) de longueur parfaitement invariable est introduite dans le forage, où sont fixés un certain nombre d'anneaux équidistants qui matérialisent les points de mesure. On est libéré des imprécisions dues au câble puisque la mesure est faite, au 1/100 mm près, directement au niveau intéressé.

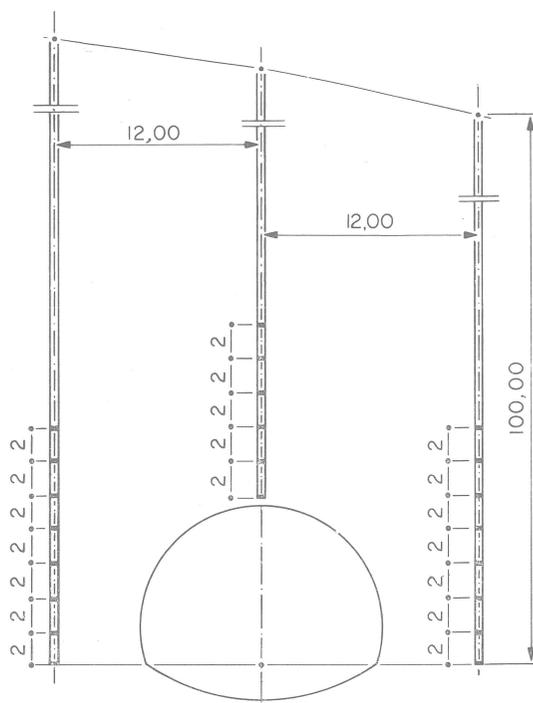
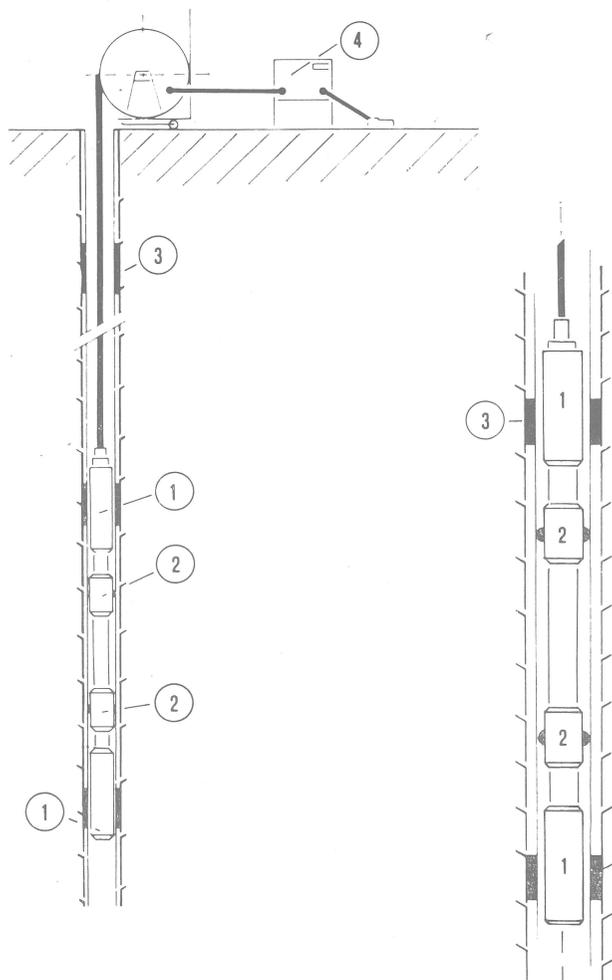


Fig. 14. — Mesures de déformation en profondeur.



## 6.4. Clinomètres

Les clinomètres mobiles en forage, descendus depuis la surface du terrain naturel, sont des appareils de précision généralement insuffisante pour les massifs rocheux, à cause des imperfections du guidage. Tout au plus peuvent-ils détecter une surface de rupture caractérisée. Seuls les **clinomètres fixes**, dont on a signalé une application au paragraphe 6.1., ont la précision requise. Ils ne sont justifiés, dans le souterrain, que pour suivre l'évolution du terrain au voisinage d'accidents géologiques spécifiques, ou d'ouvrages particuliers (une jonction avec une galerie de service ou un autre tunnel par exemple).

Fig. 15. — Extensomètre mobile en forage.

- 1 - Capteur de déplacement
- 2 - Guidage
- 3 - Bagues métalliques
- 4 - Poste de lecture

## MESURES PENDANT L'EXPLOITATION

### 7. LE BUT DES MESURES SUR LE TUNNEL EN SERVICE

S'assurer de la **sécurité des ouvrages** est le but principal des mesures effectuées en service. On peut distinguer deux types de mesure ou de contrôle :

- les mesures **périodiques**, semblables aux mesures faites pendant l'exécution, mais qui s'étendent à la durée de vie entière de l'ouvrage. Elles peuvent s'étendre à des mesures spéciales destinées éven-

tuellement à analyser dans le détail un comportement anormal pouvant conduire à des travaux de réparation ;

- les systèmes d'**alarme automatique** permettant une décision immédiate (arrêt du trafic par exemple) en cas de rupture ou de comportement anormal.

### 8. LES MESURES PERIODIQUES

Les conditions métrologiques dans un tunnel en **exploitation** sont différentes de celles d'un chantier. Si les appareils doivent posséder certaines des qualités requises évoquées au paragraphe 4.1. — en particulier la sensibilité — deux conditions complémentaires s'y ajoutent : l'appareil doit être fiable à long terme — la mesure ne doit pas perturber (ou perturber le moins possible) l'exploitation.

L'automatisme complet, de lecture et de dépouillement, constitue la réponse idéale à cette dernière condition, mais ne doit cependant pas pour autant dispenser de faire des visites de l'ouvrage, car l'examen

visuel peut révéler des désordres qu'aucun appareil ne détecterait à temps.

Les mesures de **contraintes** et les mesures de **déplacement** décrites plus haut sont souvent poursuivies pendant l'exploitation de l'ouvrage. On réalise également des mesures de contrainte au **vérin plat** (paragraphe 2.1.) pour s'assurer de l'état d'un revêtement ancien, comme les maçonneries des tunnels ferroviaires, âgés maintenant de plus de cent ans.

Parmi les méthodes **topographiques** de contrôle, il faut citer le procédé photogrammétrique mis au point par M. Rochet. La section auscultée est photographiée

à partir de deux stations suivant deux axes convergents. L'exploitation des couples stéréoscopiques obtenus à différentes périodes fournit les déplacements d'un certain nombre de points de la section, matérialisés par des repères. La précision atteinte est de

## 9. LES SYSTEMES D'ALARME AUTOMATIQUE

Malgré l'importance pratique des dispositifs d'alarme, les réalisations en ce domaine sont peu nombreuses et des progrès considérables restent à faire.

### 9.1. Le « filet » de protection

Il s'agit d'un système utilisé couramment par la SNCF dans les sections de tunnel devant faire l'objet de travaux de confortement. Il s'agit donc d'un système provisoire. Des fils parcourus par un courant électrique sont tendus en voûte de tunnel. Un signal d'alarme est déclenché par la rupture d'un fil provoqué par la chute éventuelle de blocs (fig. 16).

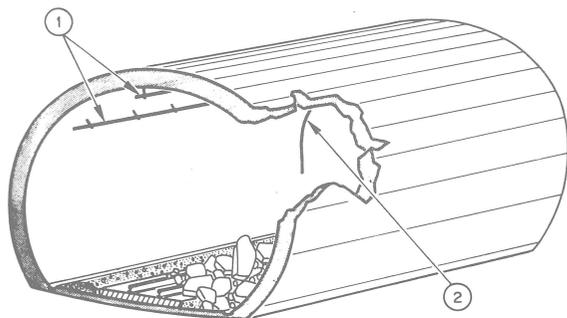


Fig. 16. — Filet de protection.

- 1 - Fils parcourus par un courant électrique.
- 2 - Fil cassé.

### 9.2. Capteurs de déplacement équipés en alarme

Tous les capteurs de déplacement à lecture automatique peuvent être adaptés en système d'alarme. C'est le cas des téléniveaux à liquide qui détectent des déplacements différentiels sur une grande longueur. Un tel système a été réalisé dans l'excavation souterraine de May-sur-Orne, en utilisant des capteurs de déplacement à circuits oscillants. Le principe de la

l'ordre de 0.5 mm pour un tunnel de dimensions courantes. Les points de mise en station des appareils photographiques n'ont pas besoin d'être connus ni fixés pour exploiter les clichés.

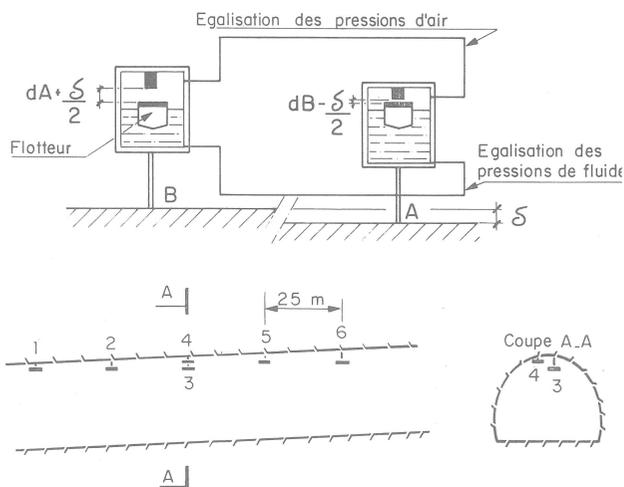


Fig. 17. — Téléniveaux.

mesure, en vases communicants, est explicité par la figure 17. Si le point A, par exemple, s'enfonce par rapport à B d'une valeur  $\delta$  le flotteur du boîtier A se rapproche de  $\frac{\delta}{2}$  du capteur tandis que celui du boîtier B s'en éloigne de la même quantité. A température à peu près constante et homogène, la précision est de l'ordre de 2/100 mm. Un schéma d'installation en voûte de tunnel d'une chaîne de capteurs est indiqué par la figure 17. Ce système est facilement adapté en alarme automatique, un signal étant déclenché lorsqu'un déplacement différentiel atteint une valeur fixée à l'avance. Ce procédé est actuellement en service.

Un autre système actuellement en service, utilise également un capteur de déplacement à circuit oscillant. Cette fois, le capteur est fixé à un **boulon ancré** à l'intérieur du massif et vise une cible métallique scellée au revêtement. L'appareil déclenche un signal lorsque l'écart revêtement-capteur atteint une valeur critique.

## CONCLUSION

On a vu que la technique des mesures est en évolution rapide. Bon nombre d'appareils décrits sont de conception récente. Mais des progrès importants restent à faire.

Un point fondamental est acquis : on se sert maintenant des mesures *in situ* à tous les stades de la

conception, de l'exécution et de l'exploitation des tunnels.

Les mesures *in situ* sont devenues un élément capital de la **sécurité**, aussi bien pour les ouvriers que pour les utilisateurs, et elles conduisent en même temps à des projets plus **économiques**.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] BARTON (N.), LIEN (R.) et LUNDE (J.) (1975). — « Estimation of Support Requirements for Underground Excavations », *16th Symposium on Rock Mechanics*, Minneapolis, University of Minnesota (September 1975).

[2] BERNAIX (J.) (1967). — « Moyen nouveaux d'étude au laboratoire des propriétés mécaniques des roches », *Annales de l'ITBTP*, Paris (juin 1967).

- [3] LANE (K.S.) (1975). — « Field Test Sections Save Cost in Tunnel Support », Report from « *Underground Construction Research Council* », ASCE New York (October 1975).
- [4] SCHNEIDER (B.) (1967). — « Moyens nouveaux de reconnaissance des massifs rocheux ». *Annales de l'ITBTP*, Paris (juillet-août 1967).
- [5] SIMR (Société Internationale de Mécanique des Roches). — « Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength of Rock Materials and the Point Load Strength Index », Final Draft, Lisbonne (October 1972).
- [6] SIMR (Société Internationale de Mécanique des Roches). — « Suggested Methods for Determining swelling and Slake-Durability Index Properties ». Part. 2. Final Draft, Lisbonne (November 1972).
- [7] SIMR (Société Internationale de Mécanique des Roches) (1974). — « Suggested Methods for Rock-bolt Testing ». Final Draft, Libonne (March 1974).
- [8] SIMR (Société Internationale de Mécanique des Roches) (1975). — « Recommendations on Site Investigation Techniques ». Final Report, Lisbonne (July 1975).
- [9] LUTZ (J.). — « Diagraphies instantanées en forage », Société Jean Lutz SA, Jurançon (France), (avril 1975).