

**APPAREILS DE CONCEPTION RECENTE  
UTILISES ACTUELLEMENT AU CONTROLE  
DES MOUVEMENTS DE TERRAINS  
TELEMESURE ASSOCIEE**

Les contrôles de mouvements de terrains doivent, en fonction des grands dangers qu'ils peuvent présenter, être suivis et contrôlés autant que possible par des mesures dont le délai de réponse sera d'autant plus court qu'elles seront précises. Il y a donc compromis entre coût et grande précision.

Il a paru intéressant de faire connaître aux experts les possibilités offertes par des appareils existants mis au point pour, précisément, contrôler les perturbations apportées aux terrains par des excavations qui sont de plus en plus fréquemment volumineuses et rapides.

Cet exposé a pour but d'en présenter les principaux, de juger éventuellement de leurs capacités à être utilisés tels quels, ou après adaptation, aux contrôles de phénomènes naturels ; autre avantage précieux de cette présentation : permettre un choix rapide d'une instrumentation adéquate, étant donné l'urgence qui caractérise généralement l'intervention de l'expert et, in fine, le court délai pour déposer ses conclusions.

Enregistrement, télémesure et alarme peuvent compléter très efficacement les dispositifs précédents, mais ils se révèlent généralement coûteux.

**NEW INSTRUMENTS IN CURRENT  
USE FOR MONITORING GROUND MOVEMENTS  
TELEMETERING EQUIPMENT**

Ground movements can be the warning signs of potentially highly dangerous events. They must be continuously followed by measurements which can be more quickly interpreted if they are precise. The engineer must strike a compromise between precision and cost.

A review of the apparatus now available to monitor disturbances caused by increasingly large underground openings excavated more and more rapidly, seems opportune at this time.

The main types are described and their utility (sometimes after modification) is assessed. This will incidentally enable the engineer to make a rapid choice of the most suitable type, as is usually necessary in view of the urgency with which he is often called in to report.

Telemetering automatic data recording and alarms can beneficially be associated with the measuring instruments, but such systems are generally costly.

# A. Appareils de conception récente utilisés actuellement au contrôle des mouvements de terrains. - Télémessure associée

par J. BERNÈDE

## 1. INTRODUCTION

C'est dans le cadre ZERMOS (\*) et sous le thème : « Méthodes de détection, mesure et alerte des mouvements du sol et du sous-sol » que se place l'exposé qui suit. Il va traiter plus spécialement des appareils utilisés à l'heure actuelle pour les contrôles des mouvements de terrains à l'occasion des chantiers.

La nécessité de tels contrôles s'impose davantage au fur et à mesure que croissent les dimensions des ouvrages ainsi que les vitesses de travail et, partant, l'importance des perturbations qu'ils entraînent.

Le but de cet exposé est donc de présenter ces appareils et de voir dans quelle mesure ils sont susceptibles d'être utilisés, tels quels ou après adaptation, aux contrôles qui font aujourd'hui l'objet de nos préoccupations et que nous appellerons, pour simplifier, « contrôles ZERMOS ».

Ayant eu l'occasion d'assister, il y a quelques mois, à un exposé sur les accidents naturels de terrains, les moyens de les détecter et d'en contrôler les effets, nous avons cru percevoir une certaine désaffection pour les mesures précises.

Certes, l'expert chargé de l'étude du phénomène naturel est presque toujours obligé de prendre celui-ci de vitesse et procéder à un choix rapide des moyens de contrôle qui, de plus, sont généralement à repenser dans chaque cas. Il doit en outre respecter les critères économiques contraignants imposés, dans la plupart des cas, par les collectivités locales qui constituent la majorité des demandeurs.

La solution optimale serait donc de pouvoir disposer de méthodes à la fois précises, susceptibles d'installations simples et rapides, présentant des qualités de rusticité et de pérennité, et qui seraient de surcroît économiques (\*).

Les appareils que nous allons présenter ont tous été étudiés en cherchant à leur conférer les qualités précédemment citées.

Ainsi pourrait-on, à partir de ceux-ci, envisager de recourir plus souvent à la mesure plutôt qu'à la pose de simples repères ou de témoins, lesquels sont imprécis et répondent en tout ou rien. La mesure précise permet en effet de gagner beaucoup de temps en réduisant la durée de réponse proportionnellement à cette précision.

Bien sûr, l'enregistrement est encore préférable, mais le critère de l'économie doit être revu en fonction de l'importance du danger ; et on retrouve encore, exagérés, les mêmes problèmes d'investissements coûteux en passant aux dispositifs de télémessure et d'alarme, indispensables toutefois dans le cadre de la Protection Civile, face à des dangers importants.

Nous allons donc décrire des appareils utilisés actuellement pour le contrôle des perturbations dans les terrains en place et terminerons par quelques brèves indications sur des dispositifs précisément conçus pour être directement utilisés à des contrôles du type ZERMOS.

## 2. DISPOSITIFS UTILISÉS ACTUELLEMENT AU CONTRÔLE DES PERTURBATIONS GEOTECHNIQUES DANS LES TERRAINS EN PLACE

Nous nous en tiendrons à l'examen de ceux qui sont plutôt destinés au contrôle des perturbations engendrées par des terrassements importants et plus particulièrement au contrôle des perturbations consécutives au creusement des excavations souterraines.

### 2.1 Qualités requises pour les appareils

Certains seront mieux adaptés au contrôle en phase de creusement, d'autres à celui du tunnel en service, mais on a recherché à ce que chacun présente au maximum chacune des qualités suivantes : rusticité, simplicité de conception, grande précision, installation aisée et rapide, coût modéré enfin.

a) **Rusticité** : elle est rendue absolument nécessaire par les conditions à la fois difficiles et extrêmement polluantes, sinon agressives, qui résultent le plus souvent de l'activité, simultanée à la pose des appareils, des Entreprises sur le chantier.

b) **Pérennité** : elle va de pair avec la qualité précédente, compte tenu du caractère plus ou moins agressif des sols et des eaux souterraines. En général, on l'améliore déjà beaucoup en assurant au dispositif une protection mécanique parfaite et, autant que possible, une bonne étanchéité.

c) **Simplicité de conception** : la mesure directe a été recherchée, ou du moins l'emploi d'un capteur de

(\*) Zones Exposées aux Risques naturels liés aux MOuvements du Sol et du sous-sol.

(\*) «Field measurements in tunnels», P. Londe, Zürich (1977).

type simple et dont les données soient aisément tractables, ce qui permet à un personnel local, non spécialisé, de procéder aux lectures.

- d) **Grande précision** : la simplicité n'exclut pas la précision. Presque toujours elle résulte de l'emploi de dispositifs sans frottement et exempts d'inertie.
- e) **Rapidité et aisance de pose** : ces qualités sont indispensables pour réduire au maximum la gêne susceptible d'être apportée à la bonne marche des travaux de chantier. On y arrive par une préparation très poussée en atelier.
- f) **Coût modéré** : cette modération découle de l'effort apporté à la simplification du matériel ; elle résulte surtout de la rapidité de mise en place par suite d'une réduction importante des prestations de personnel.

## 2.2. Présentation des appareils les plus couramment employés

Il s'agit uniquement de dispositifs qui ont déjà fait leurs preuves.

Bien évidemment, tous ont pour point commun de mesurer des déformations avec, éventuellement, une traduction en efforts à l'aide de jauges comme ce sera le cas, par exemple, pour le boulon d'ancrage extensométrique.

On notera que les mesures de pression hydraulique y ont une place car, dans nombre de cas, le régime des eaux souterraines constitue un important facteur d'instabilité, sinon la cause majeure des désordres.

Les appareils actuellement disponibles sont nombreux mais notre présentation se réduira aux principaux types, à ceux qui sont les plus courants. Ils sont regroupés dans le tableau ci-après qui donne des idées générales sur leur vocation, leurs performances et signale quelques particularités concernant la mise en place.

Nous nous limiterons donc, dans la suite de cet exposé, à compléter pour chacun les indications contenues dans le tableau par quelques détails descriptifs,

des exemples caractéristiques d'utilisation, et des enseignements qu'on a pu retirer de tels exemples. On s'efforcera de conserver l'optique d'une conversion de ces outils aux contrôles du type ZERMOS, en formulant un avis sur les possibilités d'adaptation de chacun d'eux.

### 2.2.1. Distomatic

Il s'agit d'un extensomètre dont la base peut dépasser 50 m.

Il est constitué d'un dynamomètre de grande précision ( $< 0.05 \text{ N}$ ) qui tend sous 150 N un fil en invar géodésique stabilisé mécaniquement. Les fixations aux plots, qui sont scellés très soigneusement dans les parois, sont étudiées en vue de mesures fidèles, précises et à la fois simples et rapides. La précision, variable avec la longueur de la base et les conditions de mesure, est comprise entre 20 et 100 microns.

Le champ d'application est vaste mais sa destination première consiste à suivre la convergence des cavités souterraines. Etant amovible, cet appareil est particulièrement adapté au contrôle des tunnels en service. Nous tenons à signaler que les figures relatives à cet appareil sont communiquées ici avec l'aimable autorisation de la SNCF.

Les figures 1, 2 et 3 présentent l'appareil en cours de mesures dans un tunnel de chemin de fer en service. La figure 4 montre la différence entre le rapprochement des piédroits dans une section de référence, *a priori* saine, et celui qui fut suivi dans une section à contrôler.

La figure 5 prouve l'intérêt de mesures fines qui ont permis, dans ce même tunnel, de préciser en quelques semaines une dérive dont l'estimation par des moyens courants plus rustiques et manquant de précision, avait nécessité de très nombreuses années.

### 2.2.2. Distofof

Un tube continu est enfilé dans un forage droit, suffisamment léger pour qu'on puisse atteindre des longueurs de 20 m, et même 40 m en forage descendant.

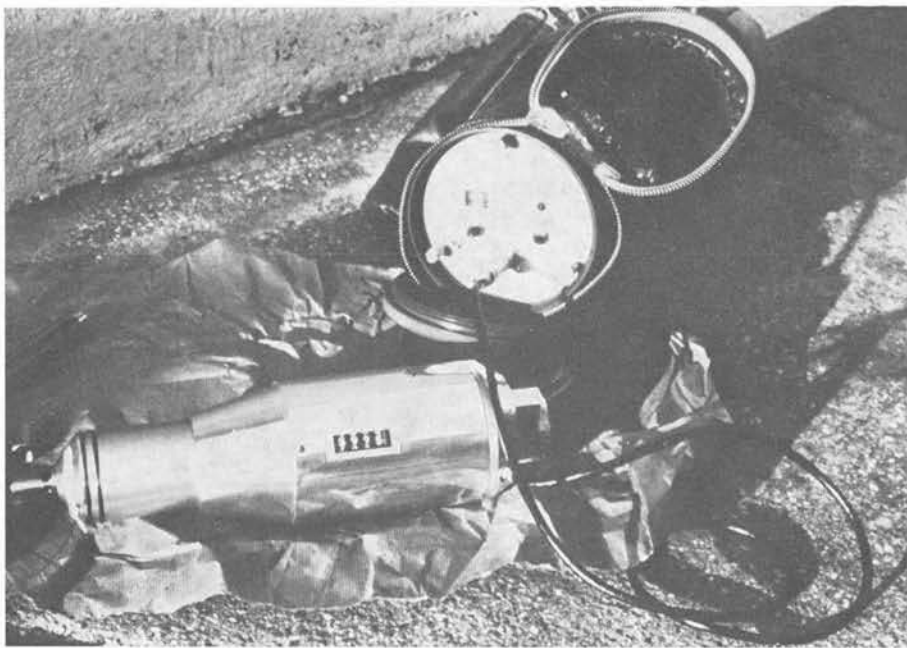


Fig. 1. — Appareillage Distomatic.

PRINCIPAUX APPAREILS EXISTANTS — PERFORMANCES

DENOMINATION	DESTINATION PRIVILEGIEE	DIMENSIONS DES BASES	INCERTITUDE (ordre grandeur)	CONDITIONS D'INSTALLATION	PARTICULARITES
DISTOMATIC	- convergence relative - contrôle des tunnels en service	- maxi. actuel 24 m (possible 50 m)	- 20 à 100 $\mu$ (selon base)	- pose simple et rapide plots scellés par paires (opposés)	- lecteur mobile à dynamomètre de haute précision + fil invar géodésique
DISTOFOR	- convergence absolue - contrôle des cavités : • en creusement • en service	- ancrages répartis - long. max. actu. 20 m (possible 40 à 50 m)	20 $\mu$	- forage percussion suffit - pose rapide - encombrement final nul	- convient si accès impossible - isolement et protection parfaits - centralisation facile des lectures
BOULON EXTENSOMETRIQUE	- décompression d'une paroi	- long. maxi. actuelle ~ 5 m	- 5 % (sur les efforts)	- aisées 40 < $\varnothing$ < 60 mm	- jauges collées dans l'âme creuse
TELENIVEAU	- affaissement des ciels de souterrains - tassement des fondations	- maxi. actuel entre 2 points 200 m	100 $\mu$	- délicates	- $\varepsilon$ vertical seulement - alarme presque toujours associée - mécaniquement vulnérable
SONDE SONORE	- tassements des terrains	- peut atteindre 100 m	1 mm	- forages vertical équipé d'anneaux couplés	- nombre d'anneaux non limité
DETECTOFOR	- piézométrie installée	- prof. maxi. actu. 30 m	- résolution du capteur ~ 10 g	- forage ascendant long exclu - $\varnothing$ 75 mm	- télémessure souvent associée

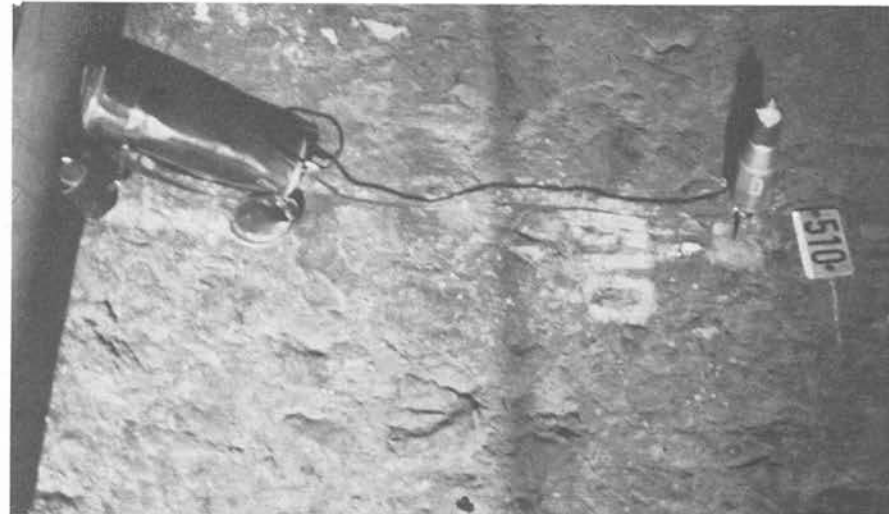


Fig. 2. — Distomatic en position de mesure.

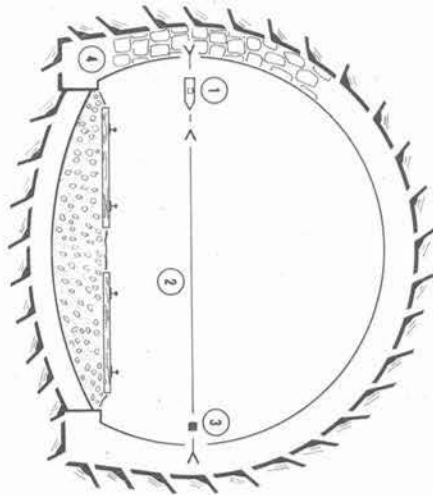


Fig. 3.

1. Appareil de lecture mobile.
2. Fil invar géodésique mobile (base : 9 m environ).
3. Plot scellé.
4. Maçonnerie.

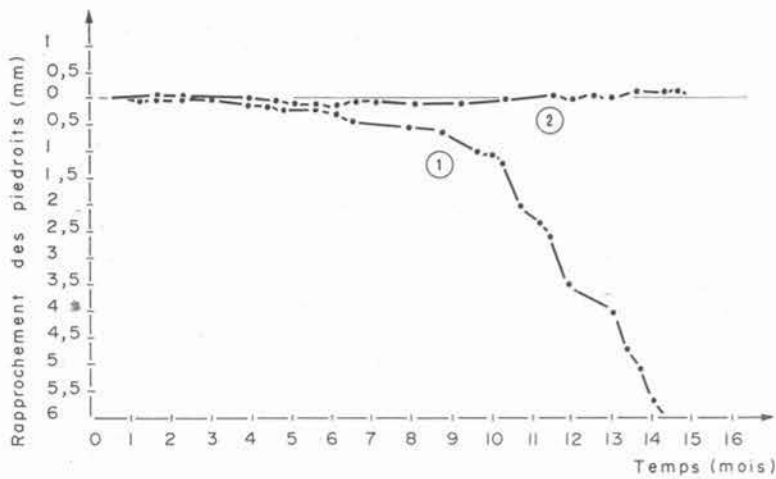
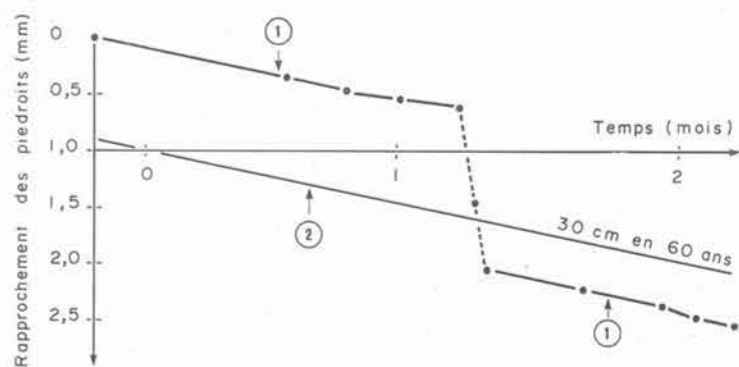


Fig. 4.

1. Déformation de la section à contrôler.
2. Mesures comparées en section stable.

Fig. 5.

1. Contrôle à court terme au Distomatic ( $\pm 0,01$  mm).
2. Dérive obtenue par topométrie à très long terme ( $\pm 10$  mm).



Il est équipé de capteurs à induction, répartis à préalable, et tels qu'un ancrage lie une partie de chacun d'eux au terrain, donnant ainsi le déplacement relatif de chaque point.

En général, le tube est scellé au massif rocheux à l'orifice du forage. Les lectures sont aisées et à la portée d'un personnel non spécialisé.

Equipant une série de forages radiaux, cet appareil est principalement utilisé au contrôle de la convergence absolue des cavités. La précision est excellente (de l'ordre du 1/100 de mm) et conservée du fait d'une protection parfaite. Toutes ces raisons en font un appareil tout à fait adapté aussi au contrôle des ouvrages en service.

Les photos 6, 7, 8 et 9 en illustrent l'installation et le fonctionnement.

Une mention particulière doit être faite de la photo 8 qui se rapporte à l'équipement de forages pénétrant de 16 m dans une falaise rocheuse qu'il s'agit de contrôler à la demande des Services de l'Équipement de Saverne.

La figure 10 schématise une installation de contrôle d'une section de tunnel routier en construction, et la figure 11 les déformations ou déplacements enregistrés à cette occasion ; il s'agit de terrains peu profonds, excavés par des moyens traditionnels. Par contre, les figures 12 et 13 sont relatives à une conduite forcée en versant et sous un très fort recouvrement. Il y a lieu de préciser que, dans le cas présent, les appareils ont été installés dans des sondages de 6 m forés en auréole dans le plan même du front d'attaque, et que tout a été mis en place avant un tir de 250 kg d'explosif. Les mesures réalisées ainsi ont donné de précieux renseignements à l'instant du tir, immédiatement après,

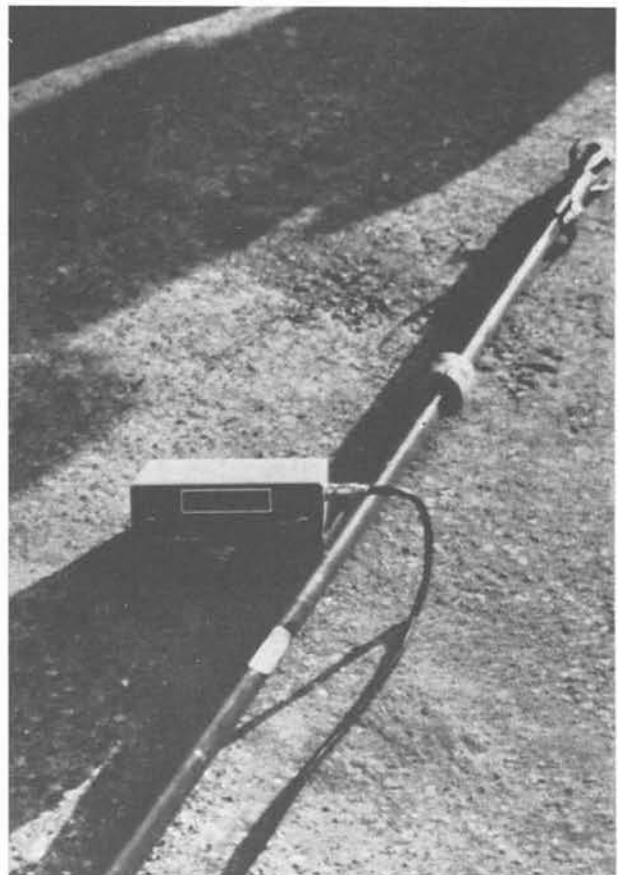


Fig. 6. — Distofor - Tige, un ancrage, tête et lecteur.



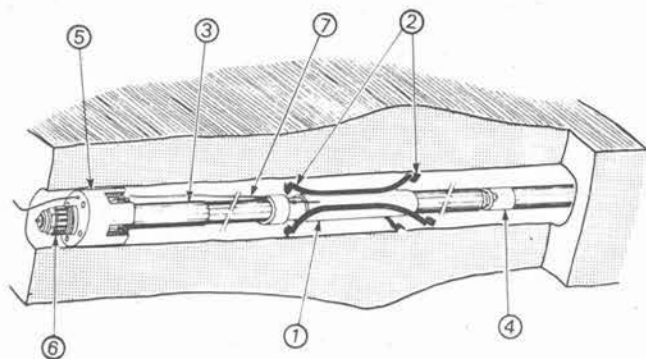


Fig. 7.

1. Bague de couplage du capteur inductif.
2. Ressorts d'ancrage.
3. Corps de la tige.
4. Raccord étanche.
5. Tête à encastrer.
6. Connection étanche ou sortie par presse-étoupe.
7. Fil de dégouillage.

Fig. 8. — Distofor - Enfilage dans un forage horizontal.

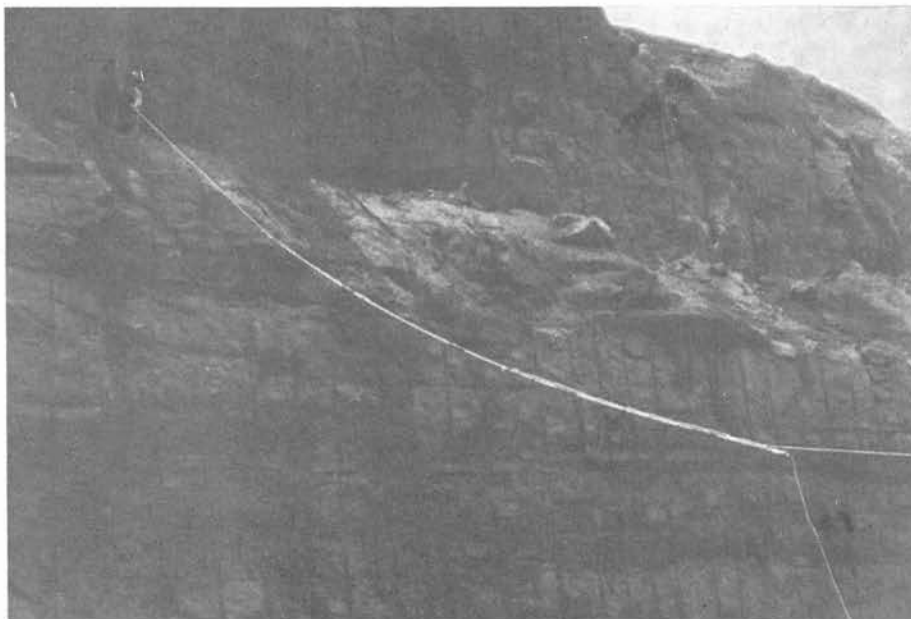


Fig. 9. — Distofor - Lecture accessible.

puis au cours de l'éloignement du front. Elle se poursuit encore, et se poursuivront aussi longtemps qu'on le désirera, fournissant alors des indications sur l'adaptation du massif autour de l'excavation (\*).

Précisons que les forages à équiper peuvent être exécutés en percussion ce qui est très favorable à l'économie.

Signalons pour terminer cette présentation, que de nombreux appareils équipent actuellement des talus rocheux ou des terrains autour de tunnels, dont un tunnel lyonnais avec un forage de 20 m, et, à titre documentaire, qu'il est question de suivre les déformations au cœur de barrages en béton présentant des cas caractérisés de gonflement.

(\*) «Convergence measurements in a deep tunnel» par MM. Comès et Debreuille, Symposium de mécanique, Zürich (1977).

Fig. 10.

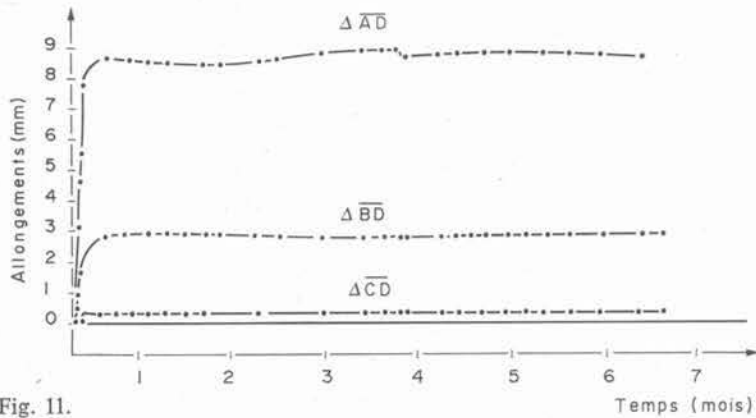
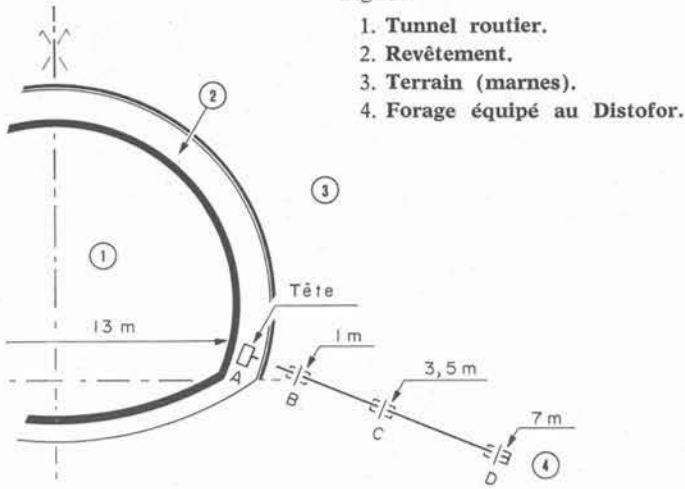


Fig. 11.

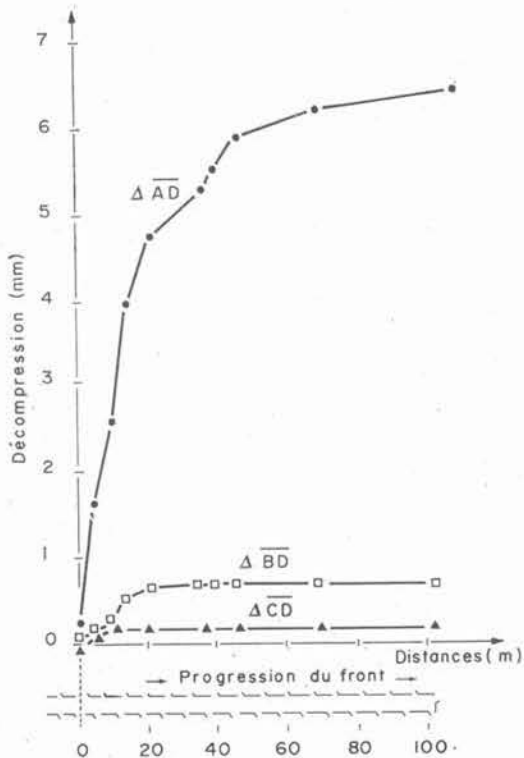


Fig. 13.

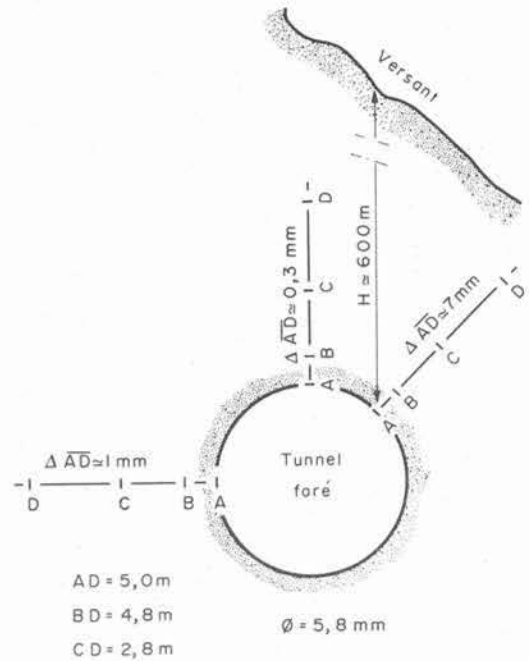


Fig. 12.

### 2.23. Boulon extensométrique

Des capteurs à self avec vis de réglage sont répartis dans l'âme creuse du boulon. Celui-ci est en acier et son inertie équivalente à celle d'un boulon de type courant, tout en lui conservant un diamètre convenable, puisque celui du diamètre du forage à équiper reste inférieur à 60 mm. Le boulon y est scellé au ciment sur toute sa longueur (\*\*).

La figure 14 schématise la disposition de deux boulons expérimentaux installés dans la même section d'un tunnel routier en construction; figure 15, apparaissent les indications fournies par les capteurs sur l'accroissement des efforts dans le temps et leur répartition le long de l'appareil.

La longueur possible n'est évidemment pas limitée aux 5 m de l'exemple choisi. En outre, et comme le Distofor, il présente l'avantage de situer un plan éventuel de rupture, ou une zone de faiblesse, ainsi qu'on peut s'en rendre compte en examinant la figure 15.

### 2.24. Téléniveau

Il s'agit de simples vases communicants munis chacun d'un flotteur dans lequel on incorpore un capteur précis (définition de l'ordre de 0.1 mm). Le temps de réponse est logiquement fonction de la dis-

(\*\*) «Three new instruments for measurements in tunnels», par J. Bellier, P. Debreuille, Symposium de mécanique des roches, Zürich (1977).

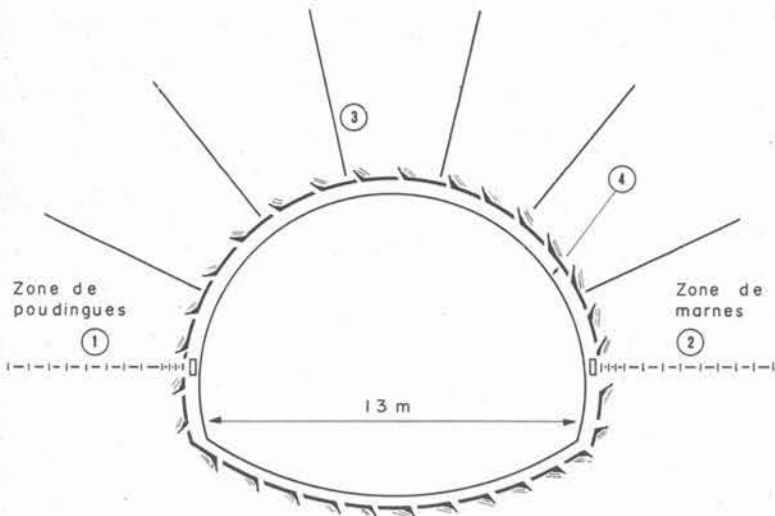


Fig. 14.

1. Boulon extensométrique A } Long. 5 m (8 capteurs
2. Boulon extensométrique B } espacés de 0,2 à 0,5 m
3. Boulons d'ancrage courants.
4. Revêtement béton projeté.

tance entre vases, étant entendu que le diamètre du tube de liaison est toujours petit (de l'ordre de 5 mm).

Le dispositif (fig. 16) peut comporter plusieurs relais ; ainsi fonctionne une installation en galerie minière sur plus de 400 m, en deux fois 200 m.

La précision de la mesure de la composante verticale du déplacement est en général largement suffisante pour le contrôle en génie civil. Elle n'est plus toutefois surabondante si le dispositif est associé à une alarme et conditionne donc la sécurité des personnes. C'est le cas, par exemple, d'une installation dont on vient d'équiper, à la demande du Service des Mines et de la Municipalité de Caen, les fondations de bâtiments partiellement sus-jacents à d'anciennes carrières abandonnées.

### 2.25. Sonde sonore

Des anneaux métalliques sont répartis le long d'un forage vertical qu'on balaie ensuite avec une sonde

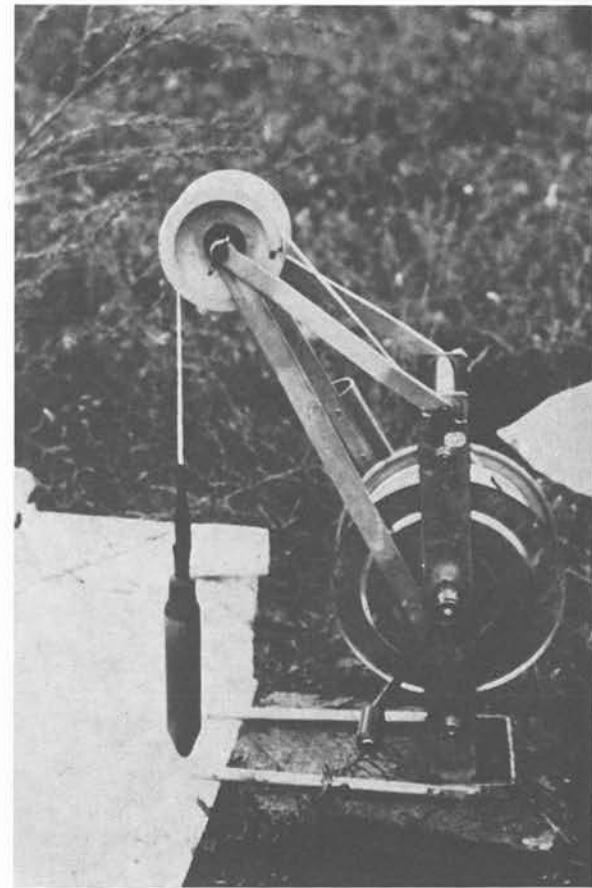
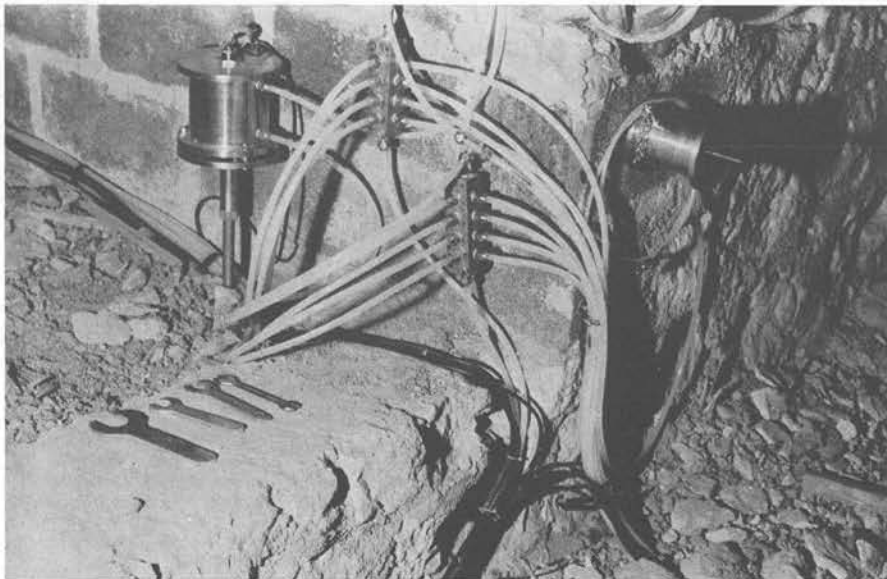


Fig. 17. — Sonde de profondeur (ou inclinométrique).

Fig. 16. — Téléniveau.

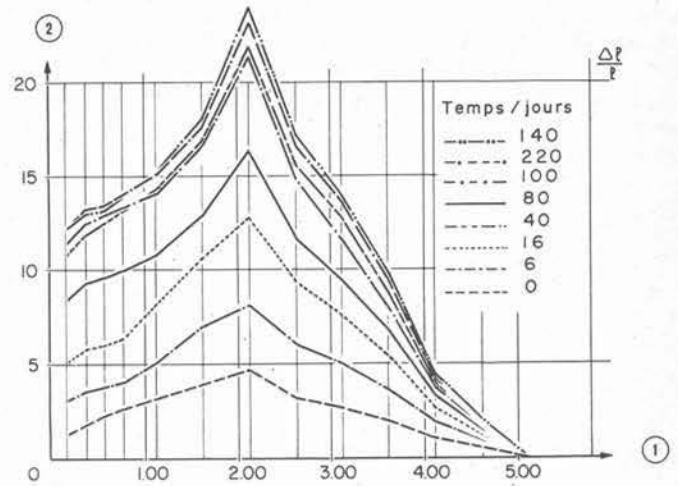


Fig. 15.

1. Distance du capteur à la paroi (m).
2. Effort localisé ( $10^4$  N).





Fig. 18. — Piézofofor. Introduction de la paroi souple et étanche.

dont un élément assure le couplage électrique. Le tassement est observé avec une précision qui, en fonction des qualités du câble sustentateur, est de l'ordre du millimètre.

La photo 17 montre la sonde suspendue au câble gradué au-dessus de l'orifice du forage à ausculter.

Les difficultés d'utilisation du dispositif aux contrôles ZERMOS sont évidentes si on a affaire à des mouvements plus complexes que de simples tassements et qui déforment le sondage, alors inutilisable.

### 2.26. Détecofofor

C'est une simplification d'un dispositif plus élaboré, le Piézofofor, capable de mesures piézométriques successives en tous points d'un même sondage. Ces mesures

se font, particularité précieuse, sans perturbation locale du régime des eaux souterraines.

Le Détecofofor prétend seulement mettre en évidence un accroissement anormal de la pression hydraulique dans une zone délimitée d'un massif rocheux.

L'appareillage comprend principalement une gaine étanche et gonflée à l'eau juste suffisamment pour qu'elle applique partout à la paroi. La pression y est contrôlée par un manomètre en tête de forage. Simultanément, un capteur sensible à une variation de pression de 1 KPa (10 g/cm<sup>2</sup> environ) peut transmettre ses indications par télémesure. Ainsi se trouve assurée, depuis déjà plusieurs années, la surveillance d'une rive rocheuse à proximité d'un barrage.

La photo 18 illustre l'introduction de la membrane étanche dont on équipe préalablement le forage.

## 3. TELEMESURE ET ALARME

Tout est permis en ce qui concerne l'association de systèmes de télémesure ou d'alarme à un dispositif quel qu'ils soit et nous avons signalé le fait au sujet du téléniveau complété par une alarme.

Tous ces systèmes sont en général vulnérables mais surtout fort coûteux. Aussi ne sauraient-ils être adoptés que pour la surveillance de mouvements importants par les dangers qu'ils présentent. Leur description sortirait du cadre de cette étude, seule la partie « mesure » devant faire l'objet des réflexions du géotechnicien. Certes, l'économie pouvant résulter d'une conception astucieuse de cette partie « mesure » peut être considérée comme négligeable par rapport au coût des installations annexes de télémesure ou d'alarme. Toutefois, il faut différencier la détection du contrôle. Dans le premier cas, en effet, le choix dans l'implan-

tation des repères est aléatoire et il en résultera une obligation à les multiplier; c'est alors que le prix de revient de la partie amont de l'ensemble peut être sensible. Dans cet ordre d'idée, des dispositifs simples ont été élaborés dont nous nous bornerons à donner seulement une liste réduite :

- **tube clinométrique** : contrôle unidirectionnel avec mesure angulaire :
  - a) unique sur console,
  - b) en chapelet dans un forage (Clinofor) ;
- **clinomètre sur console bidirectionnel** ;
- **détecteur basculant à mercure** (système tout ou rien) ;
- **détecteur de proximité** (pas d'inertie, extrême fiabilité et très grande finesse).

#### 4. CONCLUSION

Cette confrontation entre experts-utilisateurs et concepteurs-fabricants devrait s'avérer très efficace. Ayant mis au début de cet exposé l'accent sur la rapidité d'intervention qu'on exige des premiers, il est

extrêmement utile qu'ils connaissent parfaitement les toutes dernières possibilités des appareils. Le choix pourra alors se faire au mieux et très vite, compte tenu à la fois des conditions locales et du coût.

---