

**Zeitschrift:** Bulletin technique de la Suisse romande  
**Band:** 93 (1967)  
**Heft:** 7: Foire de Bâle, 15-25 avril 1967

**Artikel:** Le tunnel du Donnerbühl, à Berne: construction d'un tunnel ferroviaire par la méthode du bouclier: mesures et observations faites après la construction

**Autor:** Desponds, R. / Ensner, K.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-69069>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 15.10.2024

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les 15 jours

## ORGANE OFFICIEL

de la Société suisse des ingénieurs et des architectes  
de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes (SVIA)  
de la Section genevoise de la SIA  
de l'Association des anciens élèves de l'EPUL (Ecole polytechnique  
de l'Université de Lausanne)  
et des Groupes romands des anciens élèves de l'EPF (Ecole poly-  
technique fédérale de Zurich)

## COMITÉ DE PATRONAGE

Président: E. Martin, arch. à Genève  
Vice-président: E. d'Okolski, arch. à Lausanne  
Secrétaire: S. Rieben, ing. à Genève  
Membres:  
Fribourg: H. Gicot, ing.; M. Waeber, arch.  
Genève: G. Bovet, ing.; Cl. Grosgrin, arch.; J.-C. Ott, ing.  
Neuchâtel: J. Béguin, arch.; R. Guye, ing.  
Valais: G. de Kalbermatten, ing.; D. Burgener, arch.  
Vaud: A. Chevalley, ing.; A. Gardel, ing.;  
M. Renaud, ing.; J.-P. Vouga, arch.

## CONSEIL D'ADMINISTRATION

de la Société anonyme du « Bulletin technique »  
Président: D. Bonnard, ing.  
Membres: Ed. Bourquin, ing.; G. Bovet, ing.; M. Bridel; J. Favre,  
arch.; A. Robert, ing.; J.-P. Stucky, ing.  
Adresse: Avenue de la Gare 10, 1000 Lausanne

## RÉDACTION

D. Bonnard, E. Schnitzler, S. Rieben, ingénieurs; M. Bevilacqua,  
architecte  
Rédaction et Editions de la S.A. du « Bulletin technique »  
Tirés à part, renseignements  
Avenue de Cour 27, 1000 Lausanne

## ABONNEMENTS

1 an . . . . .	Suisse	Fr. 40.—	Etranger	Fr. 44.—
Sociétaires . . . . .	»	» 33.—	»	»
Prix du numéro . . . . .	»	» 2.—	»	» 2.50

Chèques postaux: « Bulletin technique de la Suisse romande »,  
N° 10 - 5775, Lausanne

Adresser toutes communications concernant abonnement, vente au  
numéro, changement d'adresse, expédition, etc., à: Imprimerie  
La Concorde, Terreaux 29, 1000 Lausanne

## ANNONCES

Tarif des annonces:		Fr. 423.—
1/1 page . . . . .	»	» 220.—
1/2 » . . . . .	»	» 112.—
1/4 » . . . . .	»	» 57.—

Adresse: Annonces Suisses S.A.  
Place Bel-Air 2. Tél. (021) 22 33 26, 1000 Lausanne et succursales



## SOMMAIRE

Le tunnel du Donnerbühl, à Berne, par R. Desponds, ingénieur, et K. Ensner, ingénieur.  
Bibliographie. — Les congrès. — Société vaudoise des ingénieurs et des architectes. — Carnet des concours. — Errata.  
Documentation générale. — Documentation du bâtiment. — Informations diverses.

## LE TUNNEL DU DONNERBÜHL, À BERNE

### CONSTRUCTION D'UN TUNNEL FERROVIAIRE PAR LA MÉTHODE DU BOUCLIER

#### MESURES ET OBSERVATIONS FAITES APRÈS LA CONSTRUCTION

par R. DESPOND, ingénieur en chef de la Division des travaux du 1<sup>er</sup> arrondissement  
des Chemins de fer fédéraux suisses, à Lausanne

et

K. ENSNER, ingénieur diplômé, chef de la Section de mesures près la Direction générale  
des Chemins de fer fédéraux suisses, à Berne

#### Introduction

Une description complète du projet et de la construction du tunnel du Donnerbühl, ainsi que des études expérimentales destinées à définir les caractéristiques de la poussée des terres encaissantes, ayant paru dans les numéros 26, du 19 décembre 1959, et 1, du 2 janvier 1960 du *Bulletin technique de la Suisse romande*, nous nous contenterons de rappeler tout d'abord brièvement les éléments du problème.

#### 1. Le tunnel du Donnerbühl

Afin de permettre l'entrée en gare de Berne des lignes privées de Neuchâtel, de Schwarzenburg et de la Gurbe, sans croisements d'aucune sorte avec d'autres voies de

la gare, il a fallu percer la colline du Donnerbühl (fig. 1). Les conditions locales étaient particulièrement difficiles : exécution en pleine ville dans des matériaux morainiques non agglomérés, sous faible couverture allant de trois mètres à une dizaine de mètres d'épaisseur, présence d'immeubles au-dessus du tracé du tunnel, apparition d'eau de la nappe souterraine au niveau des futures voies, ont engagé la Direction des travaux à percer le tunnel par la méthode du bouclier sans air comprimé. Cette méthode offre, en effet, le maximum de sécurité aux tassements dans un sable sans cohésion peu apte à être stabilisé par le gel artificiel ou des injections.

Dans notre cas, le bouclier en construction soudée, de 185 tonnes, était constitué par un cylindre de 10,10 m

de diamètre et de 5,50 m de longueur. Son couteau était renforcé par une couronne intérieure en acier, afin que le bouclier offre une plus grande rigidité.

Cette couronne servait aussi de point d'appui aux 32 vérins hydrauliques répartis sur le pourtour du bouclier et qui pouvaient exercer ensemble une force de 3200 tonnes, la pression fournie par les pompes étant de 400 atmosphères. Vu sa grande section, le bouclier comprenait une triple plate-forme renforcée par trois séparations verticales. Le bouclier était donc subdivisé en douze compartiments de travail. Une partie des plates-formes intermédiaires étaient mobiles : on pouvait les pousser ou les rentrer à l'aide de vérins hydrauliques. Cette disposition facilitait l'abattage des matériaux au front d'attaque lorsque celui-ci devait être boisé du fait du manque de cohésion du terrain. La queue du bouclier ne possédait aucun renforcement ; l'épaisseur de son manteau était suffisante pour lui permettre d'absorber la pression des matériaux qui s'exerçaient dans l'espace situé entre le dernier anneau de raidissement du bouclier et l'extrémité du revêtement du souterrain. C'est là que se trouvait la couronne métallique mobile, transmettant la poussée des vérins sur les voussoirs. A l'arrière du bouclier était disposée une plate-forme sur laquelle était fixé le bras rotatif de montage à commande hydraulique servant à la mise en place des voussoirs en béton armé.

Le revêtement des parois cylindriques du tunnel est constitué par des segments préfabriqués en béton armé, les voussoirs. Chaque anneau a un diamètre intérieur

de 8,85 m et se compose de quatre segments principaux et d'un court segment de fermeture, la clé. Eu égard au poids des divers éléments à manipuler et à l'épaisseur nécessaire de 55 cm, la largeur des voussoirs a été fixée à 50 cm. Le poids total d'un anneau complet est d'environ 20 tonnes. La densité du ferrailage a été fixée compte tenu des pressions des terres sur le tunnel.

La fabrication des voussoirs s'effectuait dans des coffrages en acier permettant la coulée d'un anneau entier. Les anneaux accolés ont été assemblés par des boulons parallèles à l'axe du tunnel. Ils conservaient ainsi leur position sous la pression du bouclier et assuraient la rigidité du souterrain dans le sens longitudinal.

Pour empêcher radicalement l'eau et le limon de pénétrer dans le tunnel, on plaça des bandes d'étanchéité dans les rainures transversales des voussoirs. En outre, des plaques de plomb intercalées dans les joints longitudinaux des segments contribuent à transmettre intégralement les efforts de l'anneau.

Lorsque le bouclier avançait, l'espace vide qui se formait à l'arrière du manteau de celui-ci, entre le terrain avoisinant et la partie terminée du revêtement, était immédiatement colmaté à l'aide d'injections. L'avance a eu lieu à l'allure moyenne de 1 m par jour pour une équipe de jour et une de nuit (fig. 1, 2 et 3).

Les joints des raccords des voussoirs d'un anneau sont garnis de plaques de plomb de 4 mm d'épaisseur et mesurent 36 à 47 cm de côté, cela afin de donner à l'appui la possibilité d'absorber l'excentricité des efforts normaux, laquelle peut atteindre 20 cm.

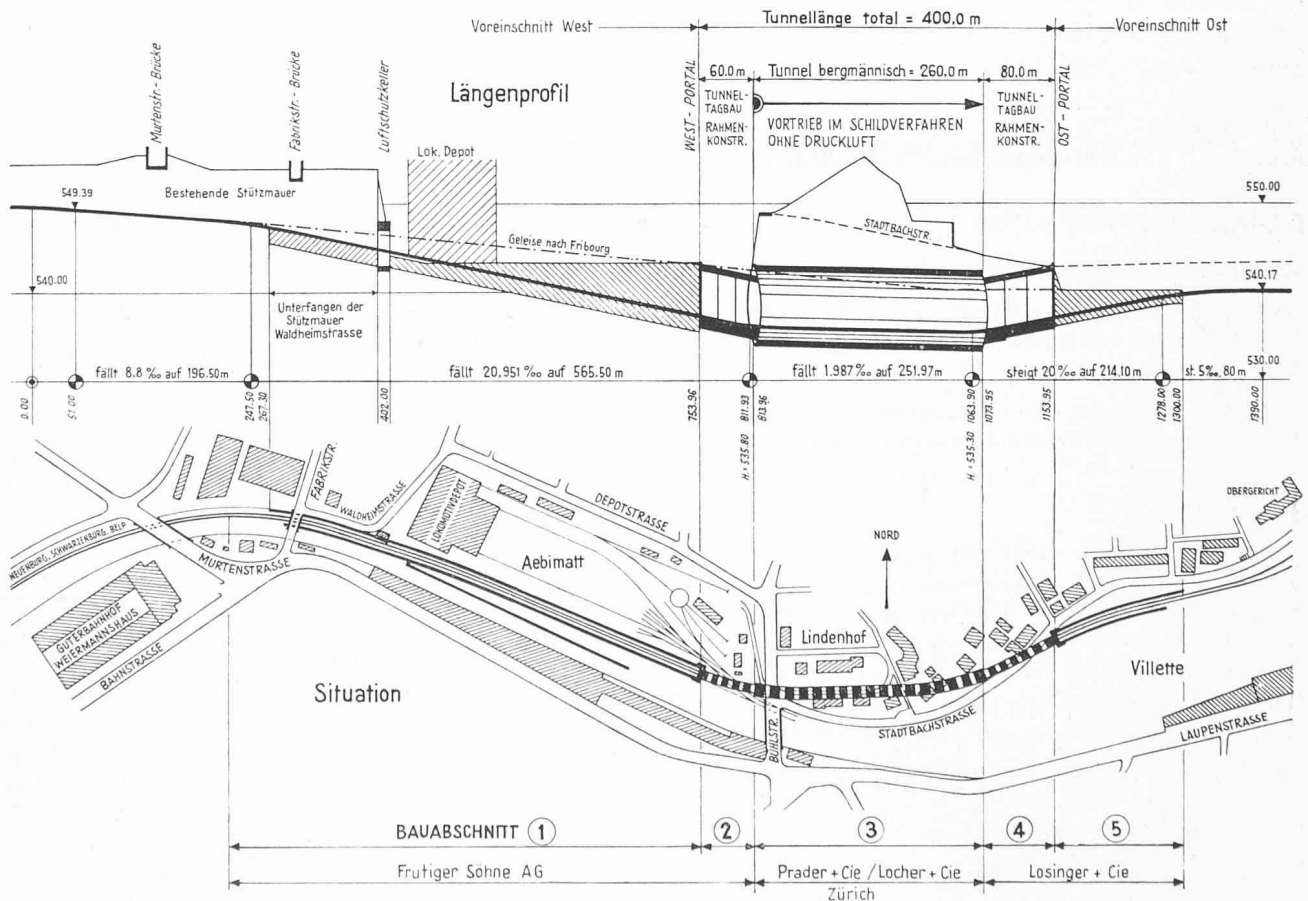


Fig. 1. — Entrée des chemins de fer privés bernois en gare de Berne.

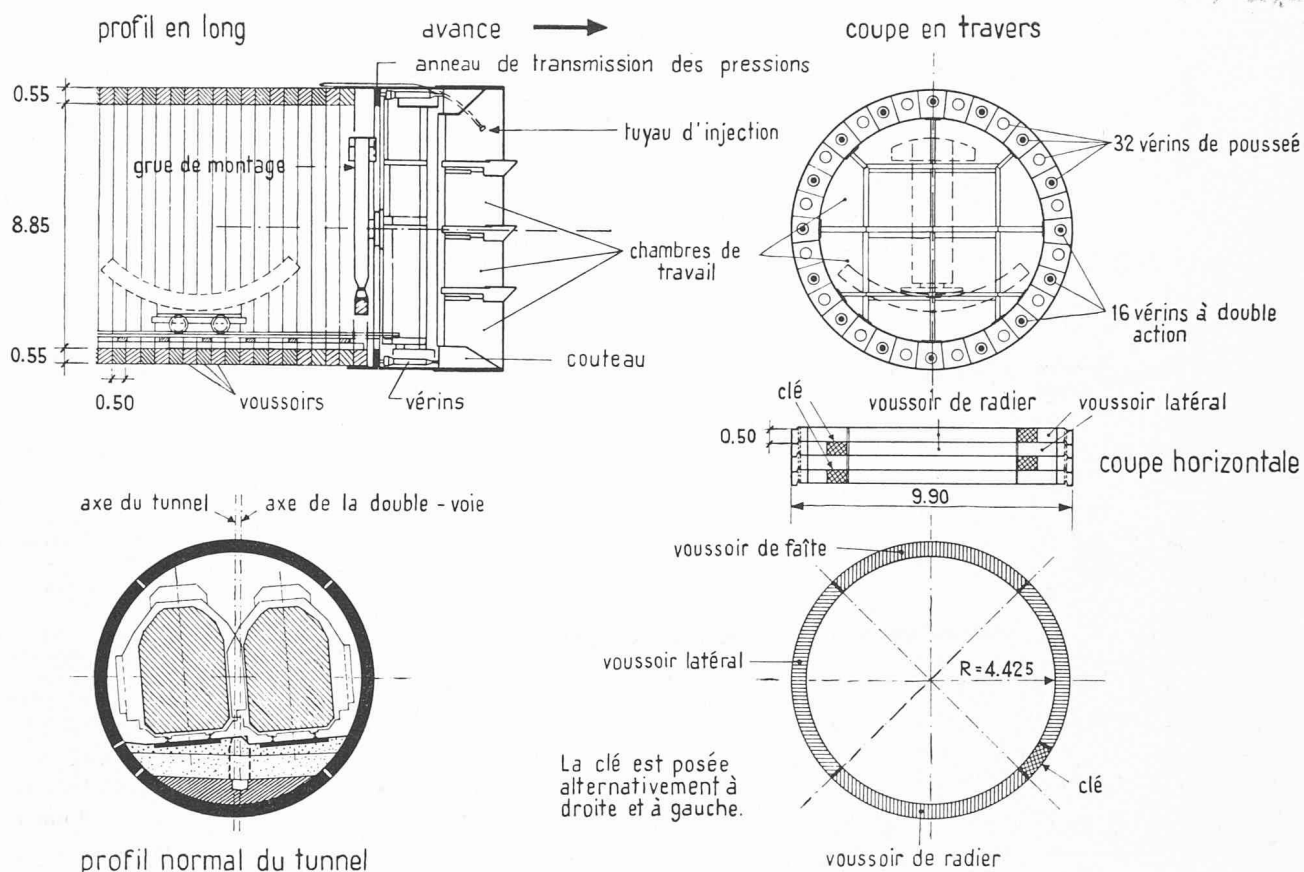


Fig. 2. — Avance au bouclier, coupes du bouclier et des voussoirs préfabriqués.

L'anneau est ainsi moins sensible aux sollicitations asymétriques. Pour centrer les joints radiaux des voussoirs et pour absorber les forces tangentielles, chaque joint est muni d'un goujon de 40 mm de diamètre qui pénètre dans les deux segments. Aux joints articulés, les cales n'ont que 15 cm de large, de manière à réaliser effectivement les articulations admises par le calcul (fig. 1, 2 et 3).

## 2. Terrains encaissants, géologie, étude expérimentale de la poussée des terres

Le tunnel du Donnerbühl traverse la moraine frontale de l'ancien glacier de l'Aar, formée plus particulièrement de moraine de fond, glaise sableuse de qualité variable, ainsi que de dépôts diluviaux de gravier et de sable plus ou moins délavés (fig. 4). De grandes variations apparaissent aussi bien dans le sens vertical qu'horizontal.

Le matériau, passablement graveleux dans les couches supérieures, a tendance à devenir toujours plus fin avec la profondeur. Au niveau de la calotte du tunnel, on rencontre du sable légèrement glaiseux, tandis qu'à celui du radier c'est une glaise sableuse ou limoneuse. Le sable a une grande compacité, avec des densités apparentes de  $21 \text{ kg/dm}^3$ , mais il n'est pas aggloméré. La perméabilité du sol est très grande dans les couches supérieures et a tendance à devenir toujours plus faible avec la profondeur. Une nappe phréatique a été décelée par des sondages approximativement au niveau des voies à établir.

Lorsqu'il s'est agi de calculer les anneaux circulaires en béton armé formant le revêtement du tunnel du Donnerbühl, il apparut tout de suite que les diverses méthodes de calcul des pressions des terres, proposées dans la littérature, étaient essentiellement contradictoires. Ainsi, par exemple, la méthode Caquot, décrite dans le *Traité de mécanique des sols* de Caquot et Kerisel,



Fig. 3. — Vue du tunnel en construction.

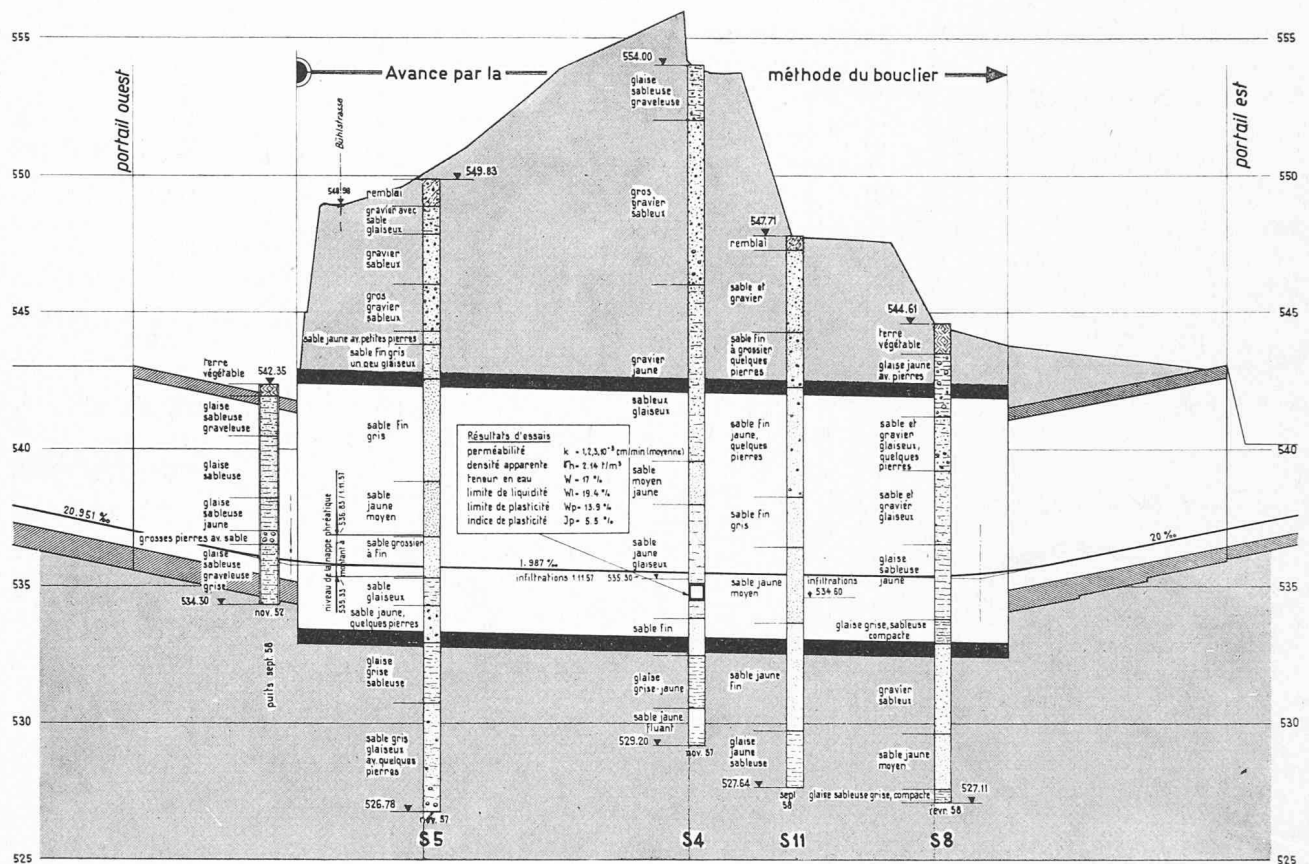


Fig. 4. — Tunnel de Donnerbühl: profil en long géotechnique.

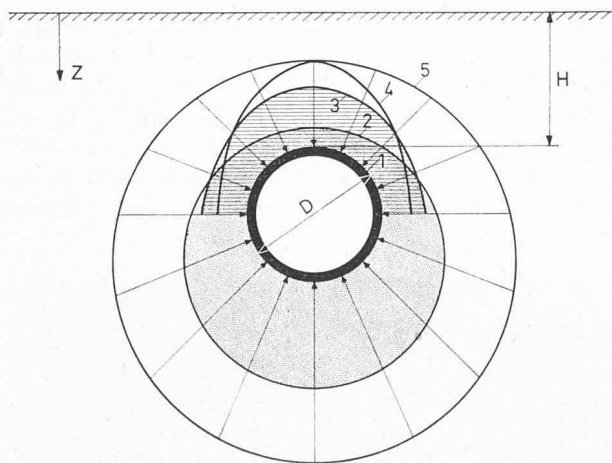


Fig. 5. — Schéma de répartition des poussées de terres sur l'extrados d'un tunnel de section circulaire (1) selon Caquot (2), Terzaghi (3) et Kommerel-Culmann (4); poussée de référence hydrostatique à la densité du terrain (5).

qui permet de calculer les pressions radiales et tangentielles dans un massif de sol entourant un tunnel de section circulaire, correspond bien à la forme géométrique du tunnel du Donnerbühl (fig. 5).

La méthode de Kommerel-Culmann est en partie graphique. Elle permet de calculer les valeurs relatives et la répartition des pressions sur la voûte du tunnel, mais seulement lorsqu'on choisit arbitrairement l'in-

fluence de l'effet de voûte, ce qui diminue fortement son intérêt.

La méthode de Terzaghi, donnée dans la *Mécanique théorique des sols*, a été établie pour une section rectangulaire, mais elle peut être adaptée à une section circulaire.

Ces trois méthodes, appliquées au même cas, donnent des résultats si divergents qu'il a paru intéressant d'essayer des vérifications par le moyen d'essais sur modèles, en laboratoire et « in situ ». Cette étude, entreprise par le *Laboratoire de géotechnique de l'École polytechnique de l'Université de Lausanne*, avait pour but de déterminer expérimentalement les valeurs de la pression des terres sur le tunnel d'essai, afin de choisir la méthode de calcul la mieux adaptée au cas du tunnel du Donnerbühl.

Les coefficients qui interviennent dans le calcul des pressions sont l'angle de frottement interne, la cohésion et le poids spécifique des terres, ainsi que le coefficient dont la valeur dépend des déformations qui se produisent dans le sol au-dessus du tunnel pendant l'exécution. Si les déformations sont importantes, un effet de voûte apparaît, en effet, dans le sol et les pressions diminuent. Si la méthode adoptée, au contraire, empêche les déformations, les efforts du frottement dans le sol ne sont pas mobilisés et les pressions restent grandes sur le tunnel.

Il convient dans l'étude sur modèle non seulement de bien connaître les caractéristiques du sol employé, mais encore de reproduire le plus exactement possible le procédé de construction du tunnel. Il n'existe pas

de rapport de similitude simple entre les pressions des terres mesurées sur les modèles et celles qui se manifestent sur le tunnel en vraie grandeur.

L'intérêt de tels essais réside principalement dans le fait que l'on peut calculer, dans un cas de charge d'un modèle donné, les pressions qui devront s'exercer sur l'anneau et comparer les résultats de ces calculs aux pressions effectivement mesurées.

Comme les sols dans lesquels le tunnel du Donnerbühl fut construit sont, dans l'ensemble, sans cohésion dans la partie supérieure (calotte) et cohérents dans sa partie inférieure (radier), il n'est pas possible d'exécuter un modèle de tunnel avec une similitude parfaite des sols.

Cela nous a conduits à proposer l'étude de la pression des terrains par deux méthodes différentes :

- La première méthode consistait à exécuter des essais en laboratoire, en fonçant un cuvelage de 30 cm de diamètre dans le massif du sol constitué de sable sec, pulvérulent, parfaitement homogène (fig. 6).
- La seconde méthode consistait à exécuter des essais « in situ », en fonçant un cuvelage de 1,50 m de diamètre dans le sol en place, sable limoneux, dont la cohésion varie entre 1 et 2 t/m<sup>2</sup> environ, sol découvert dans la partie inférieure du puits de départ exécuté pour la construction du tunnel lui-même (fig. 7).

Nous avons cherché, dans les deux cas, à vérifier si l'une des méthodes de calcul que l'on trouve dans la littérature conduisait à des valeurs de pression égales à celles mesurées lors des essais. Les deux tunnels d'essai ayant des dimensions très différentes, la méthode de calcul choisie en définitive devrait être utilisable pour le tunnel en vraie grandeur.

Les essais entrepris nous ont amenés à choisir la méthode de calcul de Terzaghi. Dans notre cas, où la couverture ne dépasse guère une épaisseur égale au diamètre du tunnel et où le type de fonçage est semblable à celui utilisé lors des essais, la méthode en question permet de calculer avec une bonne exactitude et directement les pressions verticales s'exerçant sur le tunnel, alors que pour déterminer les pressions laté-

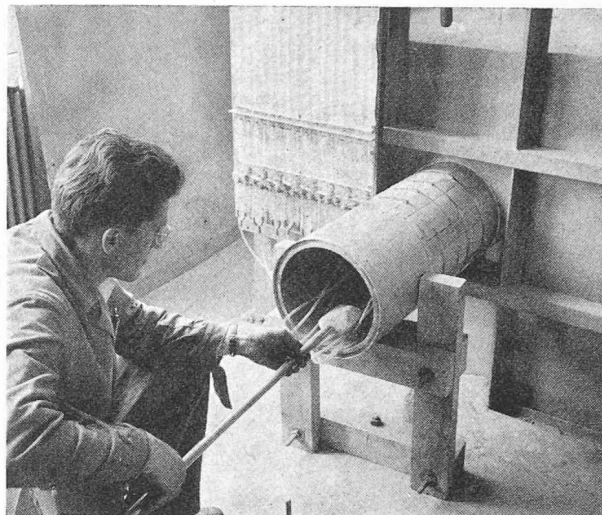


Fig. 6. — Essais sur modèle en laboratoire : extraction du sable.

rales, il y a lieu de majorer de 65 % environ les valeurs obtenues, selon la formule de Terzaghi, afin de tenir compte de la méthode de fonçage et de la mobilisation des frottements. Pour le calcul des pressions verticales s'exerçant sur le radier du tunnel, il n'a pas été possible de proposer sûrement une méthode. Les essais ont montré que ces pressions sont légèrement supérieures à celles s'exerçant verticalement sur la calotte, c'est pourquoi on a admis de majorer ces dernières du poids propre du tunnel lui-même.

### 3. Observations faites en cours d'exécution

Le tunnel est achevé depuis 1959 et en service depuis plusieurs années. Nous avons la certitude que la méthode du bouclier était bien la plus appropriée à ce cas.

Cependant, malgré le soin apporté à l'exécution du travail, quelques affaissements et modifications de la couche supérieure du terrain n'ont pas pu être évités.

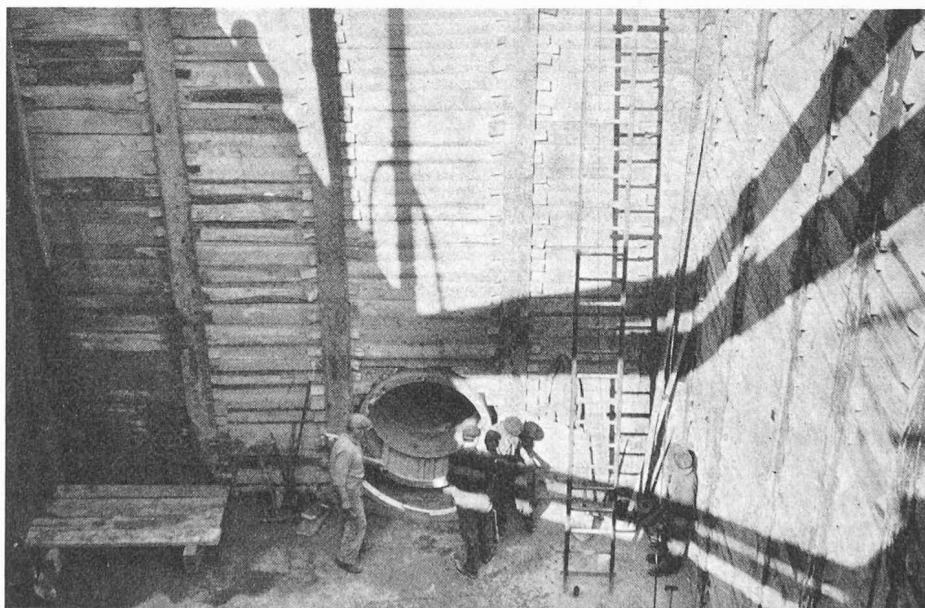


Fig. 7. — Essais sur modèle « in situ » : un cylindre de 1,5 m de diamètre, simulant le bouclier, a été enfoncé dans le sol encaissant, au fond du puits de départ du tunnel.

Il a fallu déplorer des fissurations et autres dommages aux revêtements de chaussées, aux canalisations et conduites situés au-dessus du cylindre formé par le tunnel. Au début des opérations de forage, sur les premiers mètres et par manque d'expérience, les affaissements dépassaient 10 à 15 cm. Au cours des travaux, l'importance des tassements a rapidement diminué et vers la fin du chantier ils n'étaient plus que de quelques centimètres. De nombreux facteurs ont provoqué l'apparition de ces tassements et, s'il est difficile aujourd'hui de préciser avec certitude leur origine, il est possible toutefois d'en donner ci-dessous les causes probables.

Lors de la poussée, il est difficile d'étayer parfaitement le front d'attaque. Malgré des injections soignées, on ne remplit pas tous les vides laissés par le manteau du bouclier dans sa progression. La poussée mécanique du bouclier provoque des ébranlements, lesquels déclenchent des tassements dans les masses de sable. Le bouclier, comme un piston, exerce une pression très forte sur une grande étendue du front de travail, suivie d'une dépression après son passage. Vu sa forme rigide, le bouclier ne se meut pas toujours en droite ligne, il serpente, pressant ici, provoquant un relâchement là. De petits mouvements intérieurs sur le front du travail sont difficiles à éviter, spécialement lorsque le sable est sec.

De légères déformations sont également imputables au système de revêtement par voussoirs en béton. Ceux-ci sont, en effet, montés à l'intérieur du manteau du bouclier. Après avance du bouclier et malgré les injections faites à ce moment-là, il n'est pas possible de remplir parfaitement le vide qui se crée derrière le bouclier, sur l'épaisseur du manteau, d'où une cause de tassement particulière. Puis les voussoirs doivent prendre leur assise sur articulation de plomb. Ils subissent de plus une déformation élastique lorsque la poussée des terres s'exerce sur eux, d'où résulte une autre cause de tassement dans les masses terrassées qu'il est absolument impossible d'éviter complètement.

Au vu des facteurs susmentionnés et de leurs effets propres, il n'est pas étonnant que de petits affaissements de 1 à 4 cm se soient produits en surface. De toute façon, les frais occasionnés par la remise en état des objets endommagés ne représentent qu'à peine les 2 à 3 % du total de ceux de construction, ce qui, dans le cas présent, était supportable.

Quant à l'étanchéité, on peut dire que le système choisi a répondu à ce qu'on en attendait dans l'ensemble, soit sur près des trois quarts de la longueur du tunnel.

Des suintements sont cependant apparus aux endroits où le tunnel comporte une faible couverture et traverse les zones perméables. Les zones humides du revêtement ont été rapidement étanchées par colmatage des joints au mortier spécial.

#### **4. Mesures exécutées après coup dans le tunnel du Donnerbühl et sur son tracé**

Au cours de la phase d'étude, il est apparu qu'une vérification à posteriori des poussées effectives des terres, s'exerçant sur le tunnel terminé, de même que des contraintes réelles supportées par les voussoirs, ne

manquerait pas d'être du plus haut intérêt. C'est, en effet, la seule méthode permettant de confirmer ou d'infirmer la valeur des hypothèses faites lors du calcul et de l'élaboration du projet. C'est la raison pour laquelle quelques appareils de mesures ont été disposés à certains emplacements du tunnel, choisis dès avant le début des travaux. Ils devaient livrer après coup une image des contraintes que supporte l'ouvrage et permettre de déterminer les poussées exercées par le sol encaissant sur celui-ci. Par ailleurs, les mouvements du terrain de surface ont été contrôlés à répétition reprises par l'exécution d'un nivellement de précision, portant sur de nombreux repères répartis sur toute la longueur du tunnel. Ce nivellement a été repris plusieurs fois au cours de la période de construction de l'ouvrage. Il a permis de suivre les mouvements affectant les constructions qui se trouvaient au-dessus de lui.

#### **5. Choix et mise en œuvre des instruments de mesures**

Les poussées exercées par le sol encaissant ont été relevées au moyen de capteurs hydrauliques du type « Glötlz » (fig. 8).

Ces éléments fonctionnent de la manière suivante : de l'huile est pompée dans les conduites sous pression au moyen d'une pompe (en haut de la figure). Entre les capteurs de pression et la conduite d'huile sous pression se trouve une membrane. Celle-ci fonctionne comme soupape. Quand la pression de l'huile dans les capteurs, mesurée au moyen de manomètres, est équilibrée par la poussée à mesurer, la soupape s'ouvre et l'huile pompée en excédent s'écoule hors du système. Ce capteur de pression convient très bien pour mesurer celle des terres. En revanche, elle ne convient pas pour les mesures dans le béton. En effet, l'augmentation de la température pendant la prise du béton provoque une dilatation de l'huile, dont le volume est limité par le béton durci. Lors de ce durcissement, les coefficients de dilatation du béton et de l'huile sont différents et les lectures ultérieures après refroidissement du béton sont faussées : l'huile se contracte plus fortement et les lectures enregistrées sont alors systématiquement trop faibles. Il convient de remarquer qu'entre-temps le système a été perfectionné et permet des mesures plus exactes.

L'efficacité de ces capteurs a été mise à l'épreuve lors des essais préalables qui ont établi que ces appareils convenaient aux essais prévus pour la mesure des poussées des terres, l'influence des variations de température étant alors sans effet. Ces capteurs de pression ont été fixés à l'armature des voussoirs au moment de sa pose dans les moules, puis embétonnés de manière que la face extérieure, qui viendrait en contact avec les terres, reste entièrement dégagée et visible (fig. 9).

Pour la mesure des déformations des armatures et du béton, on employa des jauges électriques « Philips », collées directement sur les armatures par exemple, ou noyées simplement dans le béton (fig. 10).

Les variations d'allongement mesurées électriquement sont proportionnelles aux déformations. Dans certaines conditions, ces déformations donnent des indications directes concernant les contraintes. Selon le calcul du module d'élasticité,  $E =$  environ 450 000 kg/cm<sup>2</sup>.

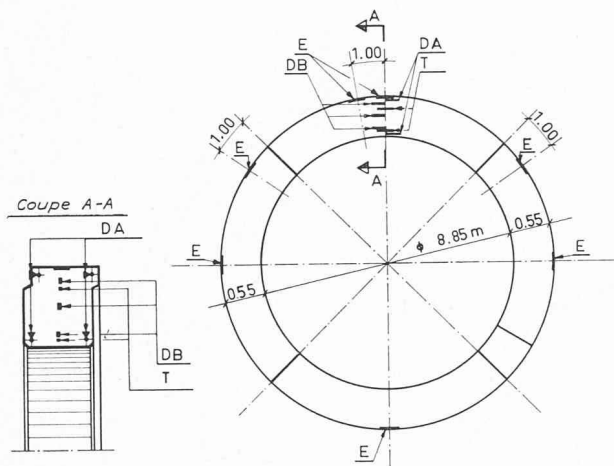


Fig. 8. — Emplacement des instruments de mesures sur les voussoirs.

E = mesure de poussée des terres.  
 T = mesure de température.  
 DA = jauges de mesures de déformation collées sur les armatures.  
 DB = jauges de mesures de déformation placées dans le béton.

## 6. Analyse et résultats des mesures

### Poussées des terres

Les poussées des terres enregistrées immédiatement après la mise en place des voussoirs, en un endroit où la couverture au-dessus de la calotte du tunnel était de 9,7 m, accusent des valeurs particulièrement irrégulières. Elles restent alors, d'une façon générale, nettement inférieures aux poussées prévues par le calcul, pour tous les différents points mesurés et cela même après le remplissage par injections des cavités laissées, après le passage du bouclier, entre les voussoirs et les terres encaissantes. A ce moment, ces poussées se situent donc très en dessous de celles théoriques déterminées selon la méthode Terzaghi. A titre d'exemple, les poussées enregistrées à la calotte du tunnel par des instruments distants de 1 m donnent des valeurs extrêmement différentes, de 1,1 à 1,9 kg/cm<sup>2</sup>, toujours immédiatement après montage des voussoirs. On peut en déduire que la compacité du sol a été perturbée dans une certaine mesure lors des travaux d'avancement et que le sol s'en est trouvé localement détendu.

A ce moment toujours, les voussoirs sont soumis, par conséquent, à des sollicitations inférieures aux prévisions et réparties très irrégulièrement.

Poursuivies régulièrement à intervalles de quelques jours, les mesures ont révélé, en revanche, que la poussée des terres sur la voûte augmentait graduellement, s'égalisant et se répartissant plus uniformément sur toute la longueur de l'ouvrage. Cette évolution, illustrée par la figure 11, était pratiquement achevée après une période d'environ 60 jours. Les valeurs maximales relevées à ce moment ne furent plus dépassées.

Il y a lieu de noter que ces dernières correspondent alors très remarquablement aux poussées théoriques calculées selon la méthode de Terzaghi adoptée. Cette conclusion à elle seule montre tout l'intérêt de l'étude théorique et pratique des poussées, entreprise. Elle est de nature à faciliter le choix d'une méthode de calcul dans des cas semblables.

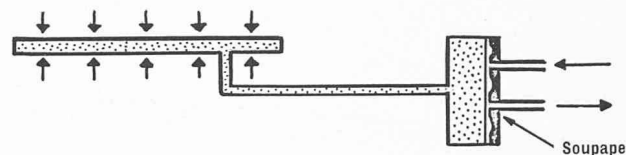


Fig. 9. — Capteur de pression hydraulique, système «Glötzl».

La répartition des poussées mesurées sur le profil du tunnel est représentée graphiquement par la figure 12. Ce graphique montre tant les poussées mesurées immédiatement après la mise en place des voussoirs et les injections de remplissage que celles obtenues 60 jours plus tard.

### Tassements

Les mouvements verticaux de la surface du sol, au-dessus du tunnel, ont été définis, nous l'avons dit, par l'exécution de nivellements de précision. L'évolution des tassements en fonction du temps est donnée par la figure 13.

On peut y observer que le niveau du sol s'est élevé de quelques millimètres peu avant le passage du bouclier et que les tassements les plus considérables sont intervenus droit après le passage de celui-ci. Ils se sont atténués ensuite progressivement pour s'achever pratiquement après une période de 60 jours, soit une

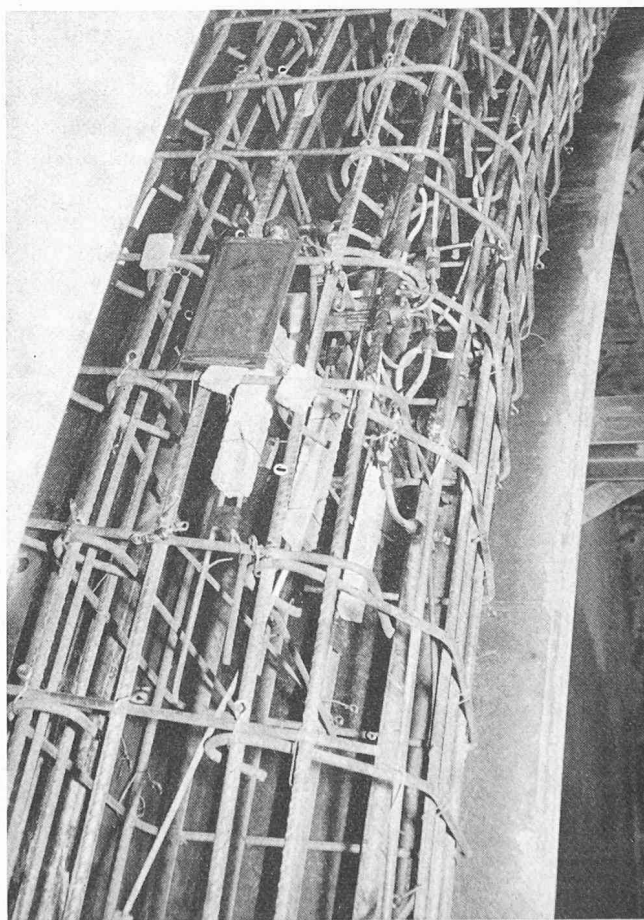


Fig. 10. — Jauges électriques « Philips » collées directement sur les armatures ou noyées dans le béton.



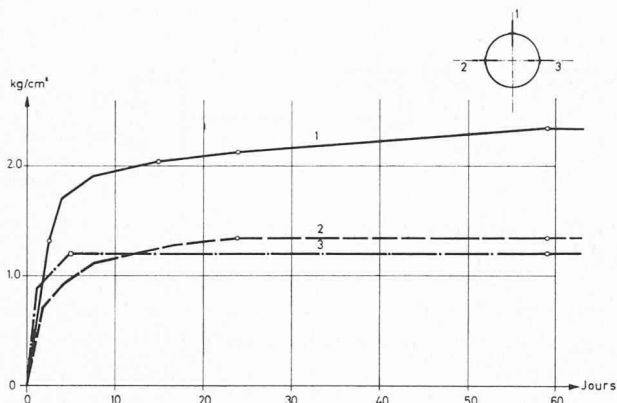


Fig. 11. — Evolution de la valeur de la poussée des terres en fonction du temps, mesurée sur le voussoir n° 336A.

période identique à celle marquée par l'évolution des poussées.

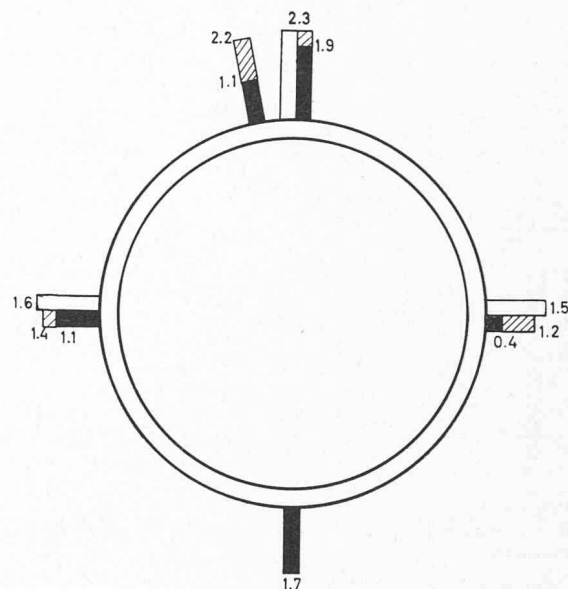
L'examen des relevés a confirmé aussi, comme on pouvait s'y attendre, que l'importance des tassements en surface est inversement proportionnelle à l'épaisseur de la couche de terre recouvrant le tunnel.

#### Sollicitations des voussoirs

La valeur des sollicitations intérieures d'éléments de construction est obtenue, dans de nombreux cas, par des mesures de déformation. On peut rappeler, à ce propos, que les tensions intéressées ne peuvent alors être calculées qu'à partir du module d'élasticité. Ce fait complique le calcul, puisque aux déformations dues aux tensions peuvent s'en ajouter d'autres, provoquées par exemple par le retrait du béton, les variations de température, etc.

L'expérience a montré que les mesures effectuées dans un tunnel sont rendues difficiles, étant soumises souvent à des influences accessoires difficilement mesurables.

Comme le résultat des mesures enregistrées dans le béton ne donne pas une image claire des divers cas de



Poussée des terres en  $\text{kg/cm}^2$

- calculée selon Terzaghi
- mesurée après montage et injections
- ▨ mesurée 60 jours après montage

Fig. 12. — Poussée des terres mesurée après montage des voussoirs et injections de remplissage, ainsi que les résultats des mesures répétées après 60 jours.

sollicitations, nous avons choisi de définir ces dernières, pour quelques cas particuliers, en utilisant les résultats des mesures de déformation effectuées sur des fers d'armature. En effet, ces dernières déformations peuvent être interprétées d'une manière beaucoup plus sûre, car le module d'élasticité de l'acier varie peu et l'influence de la température peut y être définie avec une sûreté suffisante. La figure 14 donne les déforma-



Fig. 13. — Tassements mesurés en fonction du temps, du terrain naturel au-dessus du voussoir ausculté.

tions de l'armature principale de la calotte peu après la mise en place des voussoirs et l'exécution des injections de remplissage, alors que la figure 15 donne le résumé des déformations calculées, d'une part, selon les normes et, d'autre part, en section homogène, les valeurs mesurées se trouvant entre deux.

A première vue, l'examen de ces diagrammes surprend, par le fait qu'ils ne concordent en aucune manière avec les contraintes auxquelles on pouvait s'attendre par le calcul. Toutefois, la figure 16, par des efforts dus à la seule poussée des vérins sur les voussoirs, fait clairement ressortir que des moments horizontaux considérables sont engendrés dans les voussoirs, au moment de la progression du bouclier prenant appui, par l'intermédiaire des vérins, sur ces mêmes voussoirs déjà posés. Les déformations qui en résultent, variables selon les conditions d'appui, ne se résorbent pas complètement après l'opération d'avancement et il subsiste, dans les divers éléments de construction, des tensions « parasites ».

Lorsque les anneaux de béton quittent l'enceinte du bouclier, ils subissent alors la charge due à la poussée des terres, dont l'influence se superpose aux efforts engendrés horizontalement par la pression des vérins. Ainsi s'explique l'allure quelque peu inattendue des diagrammes de déformation de la figure 14.

Les contraintes supportées par les armatures peuvent aisément se calculer à partir des déformations mesurées. Elles atteignent la valeur de  $1060 \text{ kg/cm}^2$  aux points les plus sollicités. En admettant des déformations équivalentes pour l'acier et le béton, on obtient pour ce dernier une sollicitation maximale à la compression de  $228 \text{ kg/cm}^2$ . Il est probable que ces contraintes de compression ont été quelque peu réduites dans notre cas par l'effet de fluage ou de retrait du béton, sans toutefois que ce phénomène puisse être démontré de façon claire. Dans les zones tendues, les contraintes de traction dépassent la limite de fissuration.

De l'analyse des diagrammes, on peut conclure encore que les contraintes de traction principales ne s'exercent pas parallèlement à l'axe des voussoirs. Ces derniers sont donc soumis aussi, par endroits, à certains efforts de torsion, confirmés du reste par l'apparition bien visible, sur certains voussoirs, de fissurations en diagonale.

Afin de mieux connaître l'influence, sur les voussoirs, de la poussée exercée par le bouclier lors de sa progression, quelques jauges « Philips » ont été à cet effet collées directement sur l'un des anneaux auscultés.

La figure 17 donne un exemple des déformations observées au cours de l'opération de progression du bouclier sur les 50 cm nécessaires à l'incorporation d'un anneau. Alors que les mesures enregistrées aux points 1, 2 et 3 reflètent clairement la montée de l'effet de pression exercée par les vérins, celles obtenues au point 18, du côté droit du tunnel, donnent d'intéressants renseignements sur le mode de progression par à-coups du bouclier poussé dans le sol encaissant. Cette avance, rythmée par intervalle de 1 à 2", provoque subsidiairement de modestes sollicitations dynamiques des voussoirs. Celles-ci sont du reste de peu d'importance, puisque l'allongement mesuré de  $8 \cdot 10^{-6}$  doit correspondre à

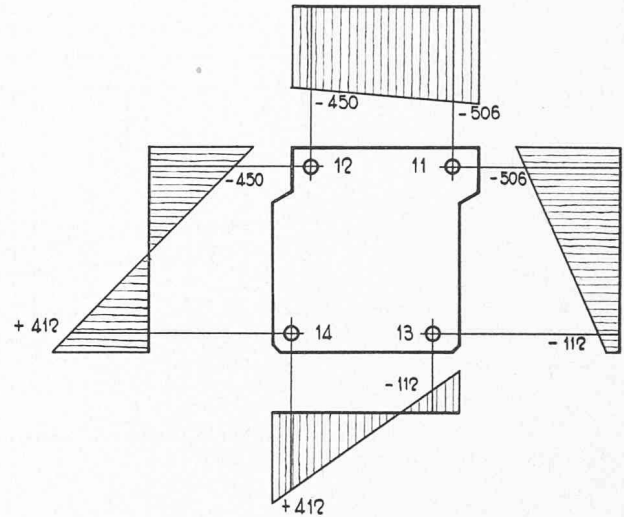


Fig. 14. — Déformation d'un voussoir mesurée à la calotte sur les armatures après montage des voussoirs et injections de remplissage.

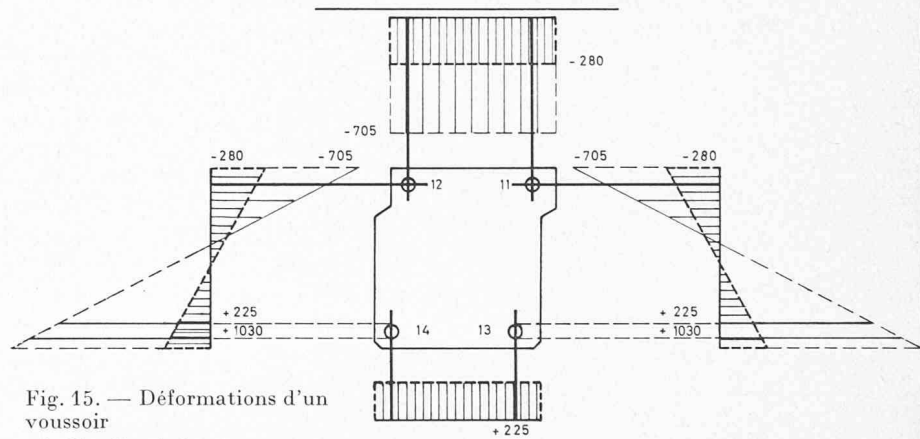


Fig. 15. — Déformations d'un voussoir calculées d'après les normes — en sections homogènes — — — — —

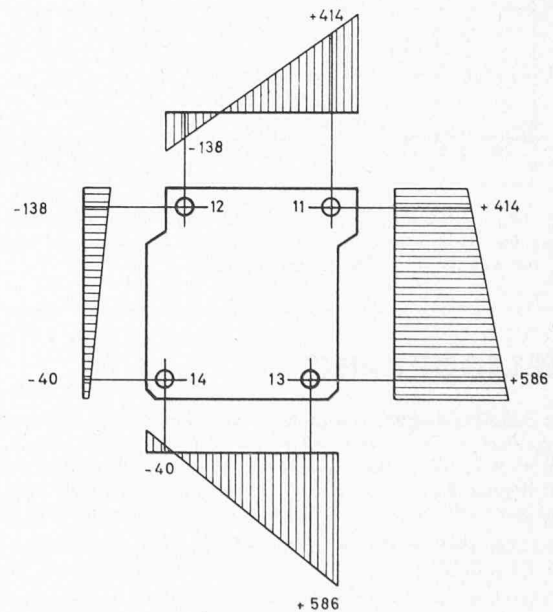


Fig. 16. — Déformation d'un voussoir, mesurée à la calotte sur les armatures, pour les seuls efforts résultant des pressions exercées par les vérins lors de la phase d'avance du bouclier.

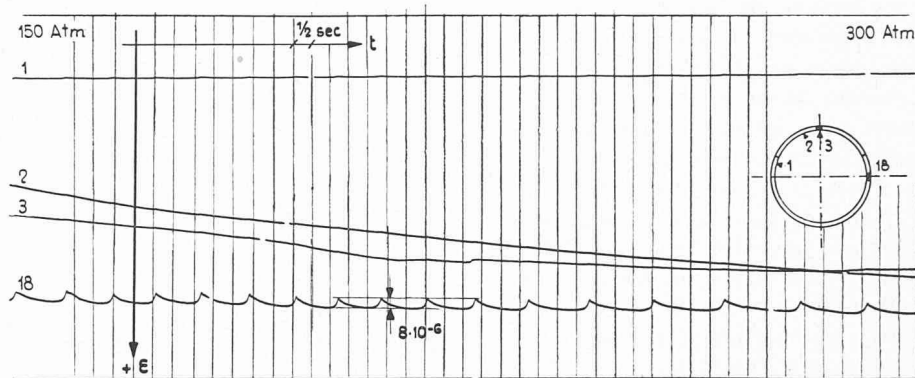


Fig. 17. — Mesure des effets dynamiques effectuée sur un voussoir lors de la phase d'avance du bouclier.

des contraintes de quelque 4 kg/cm<sup>2</sup>. Ces à-coups dans l'avance du bouclier, décelés par les mesures, expliquent à posteriori les heurts scandés qui s'entendaient distinctement dans les bâtiments susjacentes au cours des travaux.

On a reporté sur la figure 18 la valeur des déformations mesurées pour les points 1, 2 et 3, en regard de

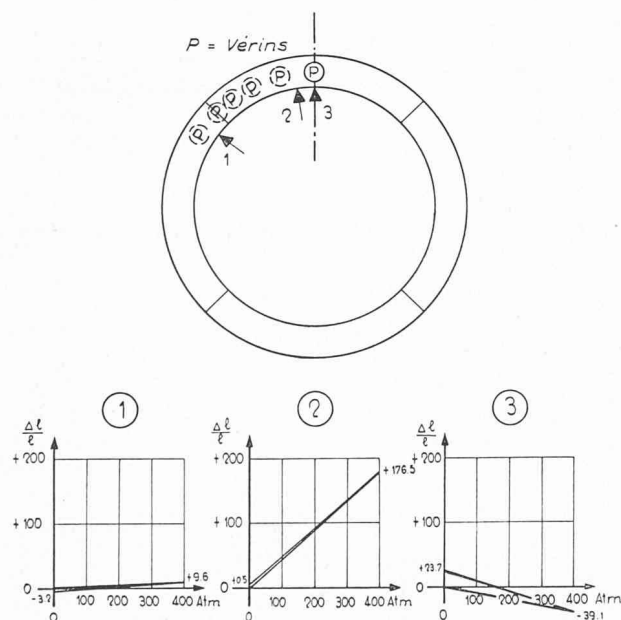


Fig. 18. — Variation des déformations d'un voussoir mesurée en trois points en fonction de la pression exercée par les vérins de poussée du bouclier.

## BIBLIOGRAPHIE

**Les échafaudages. L'outillage de chantier**, par Yves Gasc, architecte ingénieur ECP, et Claude Gasc, ingénieur ENSMA. Troisième édition entièrement refondue. Paris, Editions Eyrolles, 1966. — Un volume 16×25 cm, 376 pages, 329 figures, 26 tableaux. Prix : broché, 64.73 F.

La technique de la construction des immeubles n'a pas bénéficié de progrès aussi rapides que ceux ayant permis à d'autres industries de prendre un essor spectaculaire.

La dispersion des moyens de production sur une multitude de chantiers, la formation insuffisante des exécutants, expliquent cette sorte de sous-développement dans certaines branches de l'industrie de la construction.

celle des poussées exercées par les vérins, forces très irrégulières, ainsi qu'on peut le constater. Ce diagramme montre, en outre, qu'au point 2 par exemple, les déformations enregistrées sont telles que la limite de fissuration du béton est dépassée.

Ces mesures confirment donc les connaissances que nous avons déjà après dépouillement des mesures de déformations effectuées directement sur les armatures des voussoirs. Notons qu'il aurait été possible de supprimer les fortes sollicitations locales mentionnées ci-dessus, en incluant un dispositif répartissant les forces de réaction des poussées des vérins d'une manière systématique et régulière sur les voussoirs.

Si l'on songe aux difficultés de saisir ici correctement, par le calcul, le jeu exact des contraintes, on peut bien dire que les résultats des mesures ont montré que le dimensionnement de la construction s'était fait d'une manière convenable.

## 7. Conclusions

Notre intention était au départ de contrôler, par des mesures, l'exactitude des hypothèses de calcul. Les résultats positifs obtenus justifient amplement les dépenses d'équipement pour les mesures, relativement élevées, et le temps important consacré aux observations, et cela même si les résultats acquis n'ont pas toujours été aussi sûrs qu'on aurait pu le désirer. D'une façon générale, de précieux renseignements ont été obtenus sur le comportement des divers éléments constructifs entrant en jeu dans un chantier de percement de tunnel par la méthode du bouclier.

Or, un tel retard est grave de conséquences, car son incidence économique est très importante. Les prix, comme les délais d'exécution, peuvent être considérablement réduits lorsqu'on sait organiser rationnellement un chantier, et utiliser les procédés modernes de la construction.

Cet ouvrage a précisément pour objet de montrer aux entrepreneurs de bâtiment toutes les possibilités du matériel actuel de chantier. L'auteur a insisté sur les conditions d'utilisation rationnelle des différents appareils et sur les problèmes de la sécurité.

En ce qui concerne les échafaudages, l'accent est mis sur les petits appareils, ou les machines mobiles, qui sont utilisés actuellement pour les travaux de second œuvre ou d'entretien. En effet, les procédés modernes