

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 86 (1960)
Heft: 1

Artikel: La construction du tunnel de Donnerbühl par la méthode du bouclier
Autor: Ruppanner, H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-64460>

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: 14.03.2025

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

corbeilles (fig. IV/13). Un numérotage précis et l'emploi d'étiquettes de couleur empêchent toute confusion.

Le processus de fabrication proprement dit comprend les phases suivantes :

- a) Mise en place des armatures dans les coffrages nettoyés.
- b) Assemblage et clavetage des coffrages.
- c) Pose des cônes et des vis pour les évidements destinés aux boulons longitudinaux. Chacune de ces vis est fixée à une traverse disposée au-dessus des coffrages (fig. IV/12).
- d) Pose des parois de séparation, composées de deux tôles au droit des joints des voussoirs (fig. IV/14).
- e) Coulée de l'anneau (fig. IV/15).
- f) Enlèvement des moules pour les évidements.
- g) Enlèvement des coffrages extérieurs (fig. IV/16).
- h) Pose de boulons spéciaux dans les évidements coniques en vue de l'opération sous litt. i).
- i) Levage des voussoirs avec le pont-roulant de la halle et transport à la place de dépôt.
- k) Nettoyage et graissage des coffrages.
- l) Traitement ultérieur du béton, arrosage pendant quatorze jours.

m) Chargement sur wagons à l'aide d'une grue sur pneus de 5 t.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) KOMMERELL, O. : *Statische Berechnung von Tunnelmauerwerk*, W. Ernst & Sohn, Berlin, 1940.
- (2) CAQUOT, A. et KERISEL, J. : *Traité de mécanique des sols*, Gauthier-Villars, Paris, 1956.
- (3) TERZAGHI, K. und JELINEK, R. : *Theoretische Bodenmechanik*, Springer, Berlin - Göttingen - Heidelberg, 1954.
- (4) SAHLBERG, O. : *Jordtryck*, dans *Bygg I*, p. 791 ff., Byggmästarens Förlag, Stockholm, 1959.
- (5) LANE, K. S. : *Garrison Dam — Evaluation of Results from Tunnel Tests Section*. Proceedings ASCE, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Paper Nr. 1439, 1957.
- (6) VOELLMY, A. : *Eingebettete Rohre*. Leemann, Zurich, 1937.

LA CONSTRUCTION DU TUNNEL DU DONNERBÜHL PAR LA MÉTHODE DU BOUCLIER

par H. RUPPANNER, ingénieur diplômé, de la maison Prader & Cie AG, à Zurich.

1. Considérations sur la méthode du bouclier

Le percement d'un tunnel à l'aide d'un bouclier est une méthode connue depuis plus d'un siècle. Elle est surtout appliquée lors de la construction de tunnels sous des cours d'eau, en terrain sablonneux et dans des sols graveleux, caillouteux ou imprégnés d'eau. Dans l'immense majorité des cas, l'emploi d'un bouclier est lié à l'application du principe des fondations à l'air comprimé (bouclier avec atmosphère comprimée dans la zone de travail). Le bouclier retient la masse et la surpression empêche l'eau d'arriver dans la zone de travail. Lorsqu'il n'est pas nécessaire de mettre les ouvriers à l'abri de l'eau au moyen d'une surpression, on utilise un bouclier sans recourir à l'air comprimé (bouclier sans atmosphère comprimée dans la zone de travail).

Le premier tunnel exécuté avec la méthode du bouclier est celui sous la Tamise, entre Wapping et Rotherhithe, près de Londres, de 1825-1842 (bouclier sans air comprimé). Dès lors, dans divers pays, plus de cent tunnels, grands et petits, ont été percés en appliquant ce procédé, en particulier aux U.S.A., en Angleterre, en Allemagne et en France. Les exemples d'exécution les plus récents sont les deux tunnels du Métropolitain de Hambourg, construits en 1958-1959, dont le diamètre extérieur est de 6,40 m et la longueur cumulée d'environ 550 m (bouclier sans air comprimé).

En Suisse, le procédé du bouclier a été utilisé une seule fois. Il s'agit de la galerie de Sulgenbach, longue de 1040 m, appartenant au réseau de canalisations de la ville de Berne. Elle est établie en partie dans de la molasse compacte et en partie dans une moraine où le niveau de la nappe d'eau souterraine était élevé. C'est dans cette dernière section, longue de 240 m, qu'on s'est servi d'un bouclier de 4,05 m de diamètre avec air comprimé (époque de construction : 1922-1926).

En 1894, lors de la construction du tunnel à voie unique de l'Emmersberg, près de Schaffhouse, long de 760 m, on rencontra une zone sablonneuse avec venues d'eau. Les difficultés purent être surmontées en recourant à l'air comprimé. Dans la zone de travail, on utilisa une espèce de bouclier, mais l'exécution était sans rapport avec la méthode classique.

Les ouvrages les plus connus percés de cette manière sont le Holland-Tunnel (1920-27), le Lincoln-Tunnel (première et deuxième galerie en 1934-45, troisième galerie en 1952-57), le Queens Midtown-Tunnel (1936-40), le Brooklyn-Battery-Tunnel (1940-50), tous à New York, ainsi que le tunnel sous la Mersey, à Liverpool (1925-34) et le tunnel sous l'Escaut à Anvers, construit de 1930 à 1933.

Lorsqu'il s'agit de construire un tunnel en terrain non compact, graveleux, sablonneux ou argileux, la question de savoir s'il est nécessaire de recourir à un bouclier dépend de nombreux facteurs, qu'il faudra examiner minutieusement dans chaque cas particulier. Les avantages fondamentaux caractérisant le procédé du bouclier expliquent sans doute pourquoi, dans de nombreux cas, son application est envisagée.

Lorsque la masse est meuble et la couverture faible, la méthode du bouclier offre le maximum de sécurité si la stabilisation artificielle du terrain n'entre pas en considération. A l'inverse d'autres méthodes de forage, l'emploi du bouclier élimine une série de facteurs susceptibles de provoquer des tassements de la voûte et des affaissements. Ces derniers sont réduits au minimum. Le revêtement définitif du tunnel peut être appliqué immédiatement derrière le front d'attaque, ce qui permet de satisfaire une des exigences essentielles du forage d'un souterrain en terrain pulvérulent. De plus, il ne subsiste aucun boisage derrière le revêtement.

Pour le tunnel du Donnerbühl, la nature des terrains encaissants présente les caractéristiques ci-après :

- les sables, sables fins à faible proportion de gravier et limons qui les forment n'offrent normalement que peu de cohésion interne ;
- leur faible perméabilité les rend impropres à l'application de la stabilisation artificielle ou d'injections ;
- ces terrains ne supportent que des pressions admissibles minimales, ce qui a son importance pour la détermination des étapes intermédiaires de construction ;
- les sondages effectués ont montré que la nappe d'eau souterraine devait se trouver assez bas et que, dans le cas le plus défavorable, son niveau ne devait guère dépasser la cote inférieure du radier. Il fallait donc s'attendre seulement à des venues d'eau localisées à proximité du radier.

Après une étude minutieuse du problème, le consortium Prader & Co AG et Locher & Co AG, à Zurich, acquit la conviction que dans le cas du tunnel du Donnerbühl la méthode du bouclier offrait le maximum de sécurité et devait être proposée aux C.F.F.

2. Travaux préparatoires

Les travaux d'installation et de construction furent mis en chantier le 1^{er} décembre 1958. La situation du tunnel, ainsi que d'autres facteurs, engagèrent l'entreprise à commencer les travaux au portail ouest (fig. V/1).

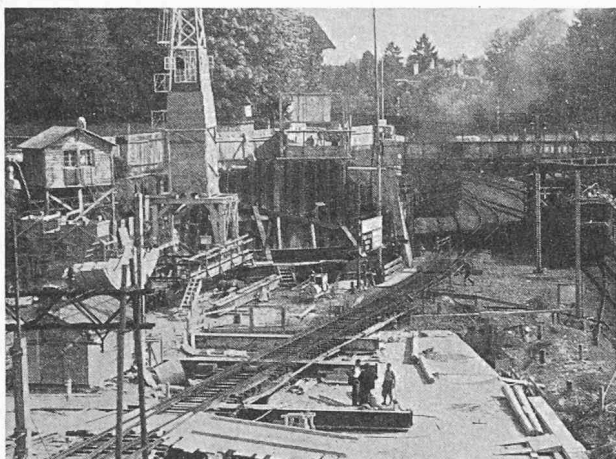


Fig. V/1. — Chantier, au portail ouest. Au premier plan, la partie de raccordement du tunnel exécutée à ciel ouvert, à l'arrière-plan le puits de montage du bouclier.

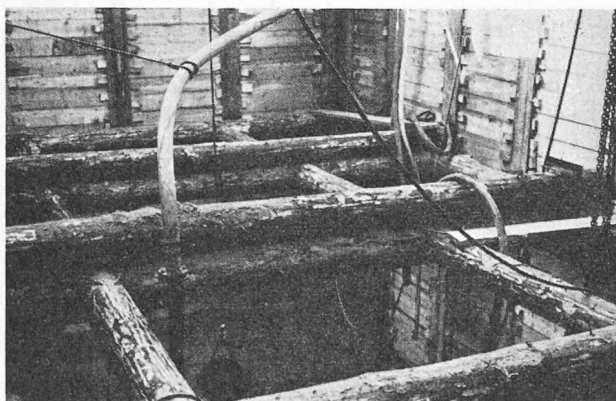


Fig. V/2. — L'étayage de la partie inférieure du puits avant le bétonnage de la semelle.

La rampe d'accès ouest n'étant toutefois pas encore établie à cette époque, on creusa, par conséquent, dans l'axe du futur tunnel, en bordure de la Bühlstrasse, un puits de $7 \times 11,6$ m, dont le fond se trouve à 12 m au-dessous du niveau du sol (fig. V/2). Les dimensions de ce puits résultent d'une part du profil en long du tunnel et d'autre part des dimensions du bouclier, vu la nécessité de disposer, pour le montage de ce dernier, d'un espace suffisant. Jusqu'à une certaine profondeur, le forage du puits en terrain sablonneux s'effectua sans difficultés, à l'abri d'un rideau de planches renforcé par des pieux métalliques (« Rammträger »). L'achèvement de l'excavation fut ensuite fortement entravé par l'arrivée inattendue d'une forte quantité d'eau provenant d'une zone graveleuse. Durant une période assez longue, le débit de l'eau atteignit 20 à 25 l/sec. La poussée des terres, qui commençait à se manifester, engagea l'entreprise à poser très rapidement la dalle en béton armé spécialement prévue pour le montage du bouclier. A fin mars 1959, le puits était prêt pour



Fig. V/3. — Mise en place d'un élément du bouclier dans le puits à l'aide d'une grue C.F.F. de 25 t.

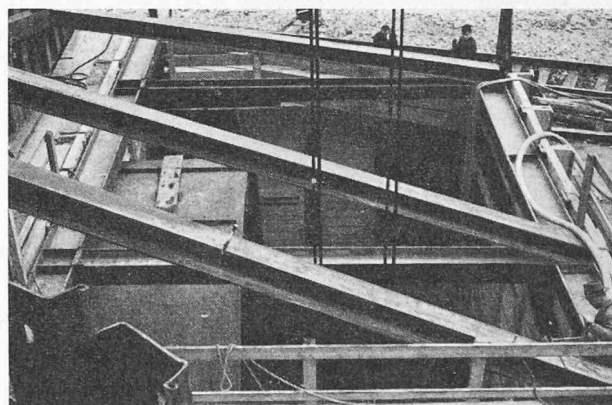


Fig. V/4. — Etayage de la partie supérieure du puits en profilés métalliques. La partie antérieure du bouclier est déjà montée.

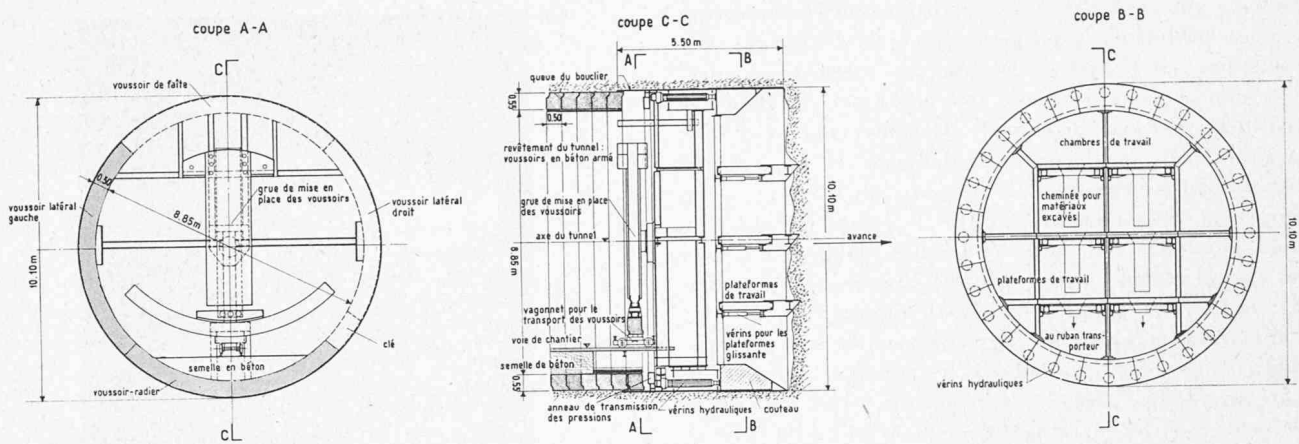


Fig. V/5. — Coupe en long et en travers du bouclier.

entreprendre cette dernière opération. C'est la section du tunnel qui détermine les dimensions du bouclier, lequel dut être amené sur place en pièces détachées. Les divers éléments furent descendus dans le puits au moyen de la grue roulante C.F.F. de 25 t et le montage suivit (fig. V/3). Après l'achèvement du montage du bouclier, on passa à l'opération extrêmement délicate de l'enlèvement de l'écran au portail pour permettre de pousser le bouclier en position initiale d'attaque (fig. V/4). Ces travaux préparatoires furent achevés à fin juin 1959.

3. Le bouclier

Le bouclier est une construction soudée, exécutée d'après les plans et calculs de la « Baugesellschaft Haltinger K. G. », à Gelsenkirchen. Pour des raisons de statique, il est constitué par un cylindre circulaire, dont le diamètre extérieur est de 10,40 m et la longueur de 5,50 m (fig. V/5).

Le couteau est renforcé par une couronne intérieure en acier, afin que le bouclier offre une plus grande rigidité. Elle sert aussi de point d'appui aux 32 vérens hydrauliques répartis sur le pourtour du bouclier. Vu sa grande section, ce dernier comprend une triple plateforme, renforcée par trois séparations verticales : le bouclier est donc subdivisé en douze compartiments de travail. Une partie des plates-formes intermédiaires est mobile ; on peut les pousser ou les rentrer à l'aide de vérens hydrauliques. Cette disposition facilite la creuse des matériaux au front d'attaque, lorsque celui-ci doit être boisé du fait de la résistance insuffisante du terrain.

La queue du bouclier ne possède aucun renforcement ; l'épaisseur de son manteau est suffisante pour lui permettre d'absorber la pression des matériaux qui s'exerce dans l'espace situé entre le dernier anneau de raidissement du bouclier et l'extrémité du revêtement du souterrain. C'est là que se trouve la couronne métallique mobile, transmettant la poussée des vérens sur les voussoirs. A l'arrière du bouclier est disposée la plateforme de montage, sur laquelle est monté le bras rotatif de montage à commande hydraulique, servant à la mise en place des voussoirs en béton armé.

Le calcul statique d'un bouclier est très compliqué, car ce dernier n'est pas seulement soumis à la poussée des terres, mais encore aux pressions énormes engendrées

par les vérens, qui exercent sur lui les efforts les plus variés. Les éléments du bouclier doivent donc être dimensionnés avant tout sur la base des expériences acquises au cours de travaux similaires. Les 32 vérens hydrauliques installés à l'intérieur du bouclier du souterrain du Donnerbühl exercent ensemble une pression d'environ 3200 tonnes, la pression fournie par les pompes étant de 400 atmosphères. Le bouclier a un poids total approximatif de 185 tonnes.

4. Le revêtement du tunnel

Le revêtement des parois circulaires du tunnel est constitué par des segments préfabriqués en béton armé appelés 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 (fig. V/6). Eu égard au poids des divers éléments à



Fig. V/6. — Transport des voussoirs, par anneau complet sur wagon de chemin de fer.

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 fabrication des voussoirs, dont la résistance à la compression doit atteindre 450 kg/cm² au bout de 28 jours, s'effectue dans des coffrages en acier permettant la coulée d'un anneau entier. Les armatures sont en acier « Ultrabox ». La densité du ferrailage varie suivant les sections de

tunnel ; elle est fonction de l'épaisseur de la couverture et des bâtiments superposés. Le calcul statique des voussoirs fait l'objet de la communication précédente. Les anneaux accolés sont assemblés par des boulons parallèles à l'axe du tunnel. Ils conservent ainsi leur position sous la pression du bouclier et assurent la rigidité du souterrain dans le sens longitudinal. Pour empêcher radicalement l'eau et le limon de pénétrer dans le tunnel, on place des bandes d'étanchéité dans les rainures transversales et longitudinales des voussoirs. En outre, des plaques de plomb intercalées dans les joints longitudinaux des segments contribuent à transmettre clairement les efforts à l'anneau. Lorsque le bouclier avance, l'espace vide qui se forme à l'arrière de celui-ci entre le terrain avoisinant et la partie terminée du revêtement doit immédiatement être rempli avec un matériau approprié, pour parer à une désagrégation du terrain et aux tassements qui s'ensuivraient.

5. Phases de l'avancement

Après l'achèvement des travaux préliminaires et pour faire avancer le bouclier depuis la fosse de départ, on procède aux diverses opérations suivantes, qui parfois se chevauchent :

5.1 Excavation et préparation du front d'attaque

Au front d'attaque, les matériaux sablonneux, le gravier ou l'argile sont enlevés à la main. La nécessité d'un étayage éventuel dépend de la solidité et de la densité du matériau encaissant (fig. V/7). Les déblais tombent par des goulottes verticales dans le compartiment inférieur du bouclier et sont chargés, par l'intermédiaire de tapis roulants, sur des wagonnets, qui les amènent dans le puits (fig. V/8). Là, une grue les transborde dans des silos avant leur évacuation par camions. C'est de cette manière que le front d'attaque est avancé d'une longueur équivalente à celle d'un anneau.

5.2 Avancement du bouclier

Les 32 vérins qui s'appuient sur la couronne transmettent la pression au dernier anneau de béton mis en



Fig. V/7. — Etayage du front d'attaque, sous le faite.

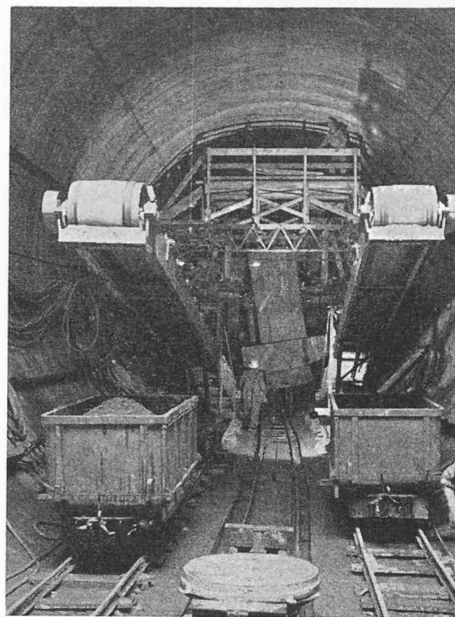


Fig. V/8. — Evacuation des matériaux excavés par rubans transporteurs et wagonnets.

place — et, par lui, à la partie du tunnel déjà munie de son revêtement — poussent le bouclier d'environ 50 cm dans la masse en avant du couteau. L'étayage du front d'attaque s'appuie sur les plates-formes mobiles, qui se trouvent d'abord en position avancée, puis en position rentrée à la fin de la poussée. Dans la position avancée du bouclier, la queue de l'engin recouvre encore à peu près la moitié du dernier anneau posé.

Un point délicat est celui de la conduite correcte du bouclier. Pour y arriver, on fait travailler les vérins sous des pressions différentes, en fonction des résistances opposées par les parois et le couteau, ainsi que de la direction à imposer au bouclier. Cette direction peut

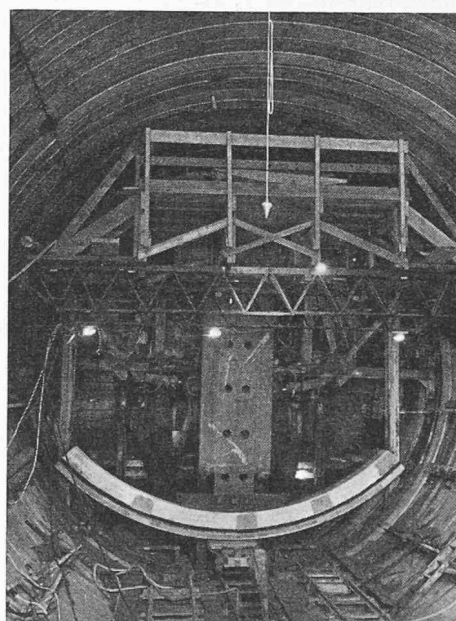


Fig. V/9. — Vue du bouclier avec les plates-formes de travail et la machine à commande hydraulique pour la mise en place des voussoirs.

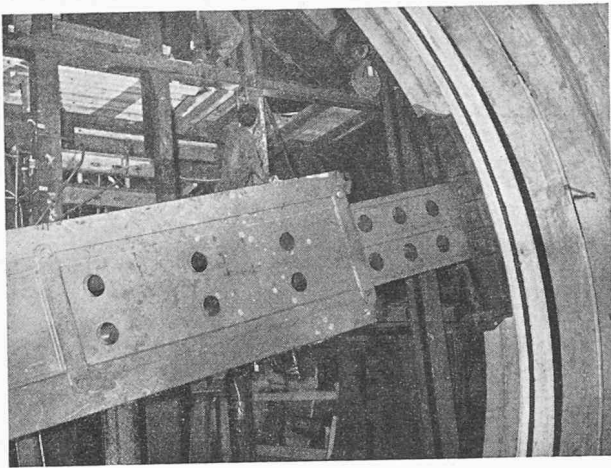


Fig. V/10. — Mise en place d'un voussoir latéral.

être corrigée en avançant ou reculant la queue du bouclier par rapport à la partie frontale de ce dernier. Le profil choisi pour le tunnel est légèrement supérieur au gabarit strictement nécessaire à un souterrain en double voie, ce qui permet de tolérer des inexactitudes dans la conduite du bouclier.

Le pupitre de commande, les soupapes de réglage et l'appareillage accessoire sont installés à l'intérieur même du bouclier ; les pompes se trouvent, en revanche, devant le portail, à l'extérieur.

5.3 Pose des voussoirs

A l'aide des vérins, on retire la couronne de transmission de charge encore accolée au dernier anneau mis

en place. On crée ainsi en queue du bouclier un espace suffisant pour la pose de l'anneau suivant. Les voussoirs, pesant environ 5 tonnes chacun, sont pris un à un sur wagon et descendus dans le puits à l'aide de la grue ; déposés sur un wagonnet spécial, ils sont amenés vers le bouclier et mis en place au moyen d'un engin spécial à bras rotatif réglable (fig. V/9 et V/10). On pose d'abord l'élément du radier, puis, successivement un élément latéral et le voussoir de faite, en maintenant ce dernier par un appui provisoire spécial. Le bras est ainsi disponible pour la pose du second voussoir latéral et la mise en place de la clé.

Une fois les voussoirs en place, la couronne de transmission des vérins est pressée contre l'anneau de béton, on serre à fond les boulons longitudinaux et on injecte du mortier pour remplir l'espace vide entre le revêtement en béton et la queue du bouclier.

On a ainsi accompli un cycle complet et il est possible d'opérer une nouvelle poussée de 50 cm en pratiquant de la manière qui vient d'être décrite. Les voies de roulement servant à effectuer les transports sont posées sur une semelle en béton complétée une fois par semaine. Après l'achèvement de la galerie, on recouvrira la semelle d'une couche de gravier supportant le lit de ballast de la voie.

Au vu du travail accompli et des expériences faites, il n'est actuellement pas encore possible de tirer des conclusions pertinentes, le percement proprement dit n'ayant commencé qu'au mois d'août. Le programme d'exécution prévoit en moyenne la pose de deux anneaux par vingt-quatre heures, en disposant d'une équipe de jour et d'une équipe de nuit.

DIVERS

Association suisse pour l'Automatique (ASSPA)

Sixièmes journées d'information

Grâce aux efforts conjugués de l'Association suisse des chimistes (ASC), de l'Association suisse pour l'Automatique (ASSPA) et de la Foire suisse d'Echantillons (MUBA), s'est tenu à Bâle, du 10 au 15 novembre 1959, le Salon international de la technique de laboratoire, de mesure et d'automatique en chimie (ILMAC).

Ce salon donna l'occasion aux plus éminentes des maisons spécialisées dans la fabrication d'appareils de mesure, de commande, et de réglage, de confronter leur production sur un plan international.

Parallèlement à cette exposition étaient organisées, dans la grande salle des fêtes de la MUBA, cinq journées d'information, dont les deux premières sous les auspices de l'ASC et les trois dernières sous les auspices de l'ASSPA. Ces journées connurent le plus grand succès, puisqu'elles attirèrent plus de 1000 participants répartis sur les cinq jours. Les exposés, présentés en allemand, anglais ou français, bénéficiaient d'une traduction simultanée dans chacune de ces deux autres langues.

La journée du jeudi 12 novembre était présidée par le professeur Dr Ed. Gerecke, EPF, Zurich, président de l'ASSPA, et était consacrée à l'automatique dans les procédés de fabrication, dans l'industrie chimique et dans l'industrie des denrées alimentaires.

Elle fut ouverte par un exposé du professeur Gerecke consacré aux méthodes de calcul pour l'étude des problèmes

de réglage que posent les processus de fabrication. Il montra les différentes étapes du développement de cette nouvelle science appelée « automatique », dont une des tâches est de définir des notions, des représentations symboliques et des lois qui soient communes à ses différents domaines d'application. La clef de voûte de cette science est le « schéma fonctionnel », dit aussi « schéma mathématique », qui permet de mettre en évidence de façon particulièrement claire et commode les relations de cause à effet qui caractérisent une installation automatique. Ce schéma sert de base à l'étude du comportement dynamique de cette installation.

Différents aspects des applications de l'automatique furent illustrés par les orateurs suivants :

- Dr B. Sturm, Bayerwerk, Leverkusen, dans la technique du contrôle de l'énergie.
- M. B. Junker, sous-directeur, Sauter S.A., Bâle, dans l'industrie des conserves.
- M. E. Schär, ing. dipl., CIBA S.A., Bâle, dans l'industrie chimique.
- M. K. Seifert, ing. dipl. EPF, Honeywell S.A., Zurich, passa en revue les instruments modernes à disposition pour résoudre les problèmes de réglage ; il compara les avantages et inconvénients des différents systèmes de réglage qui ont été développés : électriques, pneumatiques et hydrauliques.
- M. M. Haffter, directeur, Remington Rand S.A., Zurich, montra l'aide qu'apportaient les calculateurs électroniques arithmétiques pour résoudre les problèmes scientifiques que pose l'industrie chimique.

La journée du vendredi 13 novembre, présidée par le Dr ing. R. Koller, directeur, Micafil S.A., Zurich, avait pour thème les aspects économiques de l'automatique.