

**Zeitschrift:** Bulletin technique de la Suisse romande  
**Band:** 90 (1964)  
**Heft:** 10

**Artikel:** Techniques des mesures appliquées aux essais du puits blindé d'Electra-Massa  
**Autor:** Robert, François  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-66981>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 11.01.2026

**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. Groscurin, 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, 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, Lausanne

## ABONNEMENTS

1 an . . . . .	Suisse	Fr. 34.—	Etranger	Fr. 38.—
Sociétaires . . . . .	»	» 28.—	»	» 34.—
Prix du numéro . . . . .	»	» 1.60		

Chèques postaux: « Bulletin technique de la Suisse romande »,  
N° II 57 75, Lausanne

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

## ANNONCES

Tarif des annonces:

1/1 page . . . . .	Fr. 350.—
1/2 » . . . . .	» 180.—
1/4 » . . . . .	» 93.—
1/8 » . . . . .	» 47.—

Adresse: Annonces Suisses S.A.

Place Bel-Air 2. Tél. (021) 22 33 26. Lausanne et succursales



## SOMMAIRE

Techniques des mesures appliquées aux essais du puits blindé d'Electra-Massa, par François Robert, ingénieur-conseil.  
Nécrologie. — Bibliographie. — Divers. — Les congrès. — Carnet des concours.  
Documentation générale. — Nouveautés, informations diverses.

## TECHNIQUES DES MESURES APPLIQUÉES AUX ESSAIS DU PUIT BLINDÉ D'ELECTRA-MASSA

par FRANÇOIS ROBERT, ingénieur-conseil, ancien ingénieur à la Société Générale pour l'Industrie, Genève

### 1. Généralités

Les techniques des mesures appliquées aux problèmes de la mécanique des roches sont complexes. Les résultats sont trop souvent fragmentaires et les conclusions difficiles à tirer, faute d'avoir des moyens d'investigation adéquats et suffisamment complets. Lorsque des ouvrages, même importants, sont construits en béton ou en acier, les analyses exécutées sur des échantillons prélevés à la bétonneuse ou à la poche de coulée sont représentatives en général des caractéristiques technologiques de l'ensemble. Il n'en va pas de même pour les appuis. Tous les ouvrages de génie civil se fondent sur des sols ou des roches, ou les traversent. Or, dès qu'il s'agit d'une construction d'une certaine importance, on ne peut prétendre que la seule analyse des échantillons des sols, ou des roches en particulier, permette de donner les caractéristiques intrinsèques

des appuis ou des fondations à l'échelle de l'ouvrage entier.

Nous avons à faire à un matériau hétérogène, dont le degré d'anisotropie varie suivant l'échelle que nous prenons pour l'observer. Peu nous importe qu'un matériau de construction, par exemple le bois, le béton, soit hétérogène sous le microscope pourvu qu'il se comporte d'une façon isotrope à un état macroscopique. Or, la roche à l'échelle de son utilisation courante en génie civil se comporte d'une façon anisotrope variable. La pile d'un pont peut reposer sur un rocher compact, dont les caractéristiques de résistance sont facilement mesurables. Il n'en sera plus de même pour les fondations d'un barrage reposant sur un ensemble rocheux plus ou moins fissuré, pour la résistance d'un tunnel ou d'une galerie sous pression traversant des roches de qualités différentes également fissurées ou

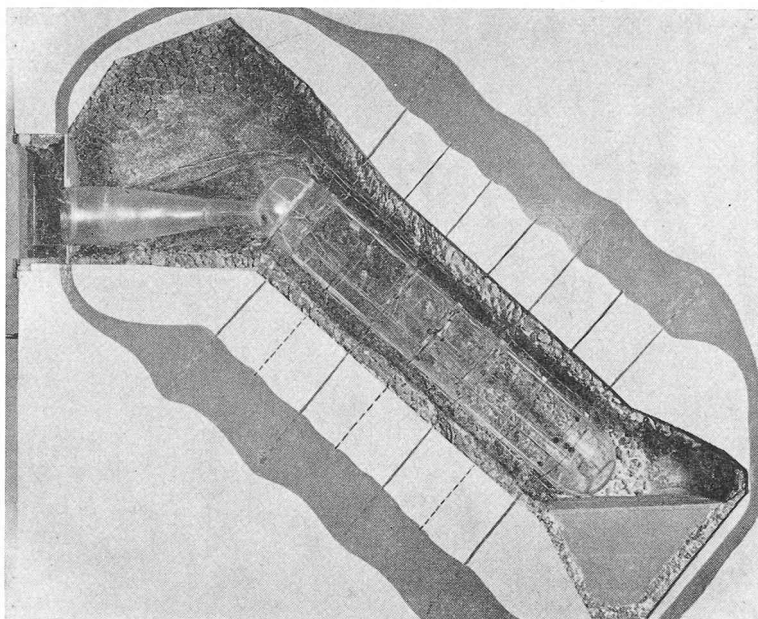


Fig. 1. — Maquette de la chambre d'essai.

diaclasses. De plus, le régime hydrologique souterrain joue un rôle essentiel dans les problèmes de résistance et devrait pouvoir être connu.

Lorsque des mesures sont à effectuer pour la détermination des qualités d'une roche ou d'un ensemble rocheux, la première question est de déterminer le degré d'anisotropie intéressant l'ouvrage. Nous avons vu qu'il n'est pas le même s'il s'agit de déterminer les qualités d'une roche servant à l'appui d'un pont, l'appui d'un barrage, ou au percement d'une galerie sous pression. Ce point acquis, il délimitera les facteurs dont il faut tenir compte et les techniques d'investigation à utiliser. Nous devons reconnaître que, dans l'état actuel de nos connaissances, ces investigations présentent des difficultés considérables pour peu que l'on désire connaître les caractéristiques précises d'ensemble d'un complexe rocheux important.

La géologie nous renseigne sur les qualités générales des roches en cause, sur le pendage des couches, sur les fissurations probables. Les sondages permettent de contrôler ou de compléter ces points, et permettent aussi par carottage les analyses sur échantillons. Les essais de pression dans les forages déterminent localement le degré de fissuration ou de perméabilité et donnent quelques renseignements sur les régimes de circulation d'eau souterraine. Les galeries permettent une reconnaissance beaucoup plus complète, mais ont l'inconvénient de modifier complètement le régime hydrologique local, inconvénient que l'on rencontre également lors de l'exécution de certains sondages. Les mesures géophysiques, méthodes résistives et sismiques complètent l'étude des caractéristiques de qualité, de fissuration et d'hydrologie. Toutes ces méthodes préliminaires d'investigation sont indispensables, et donnent, grâce à l'expérience acquise dans ces domaines, des renseignements qualitatifs très précieux. Ils permettent de supputer l'ordre de grandeur des valeurs quantitatives.

La résistance d'une roche se caractérise principalement par la détermination de son module en mesurant

les déformations en fonction des contraintes extérieures, et ceci, si possible, selon trois axes principaux, de façon à pouvoir définir les courbes intrinsèques et les surfaces caractéristiques de la roche en place.

Si la mesure localisée de ce module est relativement simple à l'aide de vérins, il n'en est plus de même lorsque l'on désire connaître sa valeur moyenne concernant une surface ou un volume de roche en place important. La mesure sur échantillon donne la valeur la plus élevée de ce module, qui est souvent un multiple de la valeur réelle intéressant l'ensemble de la roche en place considérée.

Pour connaître le module moyen d'un important complexe rocheux, plusieurs méthodes sont possibles :

- a) L'essai de déformation se fait à une échelle telle qu'il intéresse une masse rocheuse suffisamment représentative de l'ensemble, c'est-à-dire qu'il tient compte de son degré d'anisotropie moyen, à l'échelle de l'ouvrage considéré.
- b) Si un tel essai n'est pas réalisable, il sera répété en plusieurs endroits, en admettant un degré d'anisotropie local moyen. Les résultats seront comparés et, s'il y a lieu, affectés d'un coefficient pour tenir compte de l'hétérogénéité de l'ensemble de ces essais.
- c) La connaissance de l'anisotropie du milieu : diaclasses, fissure, influence de l'eau interstitielle, etc. permet par expérience d'affecter les mesures exécutées sur échantillons d'un coefficient suffisamment sûr pour qu'elles soient représentatives de l'ensemble.

Nous ne pouvons pas, dans le cadre de cet exposé, définir toutes les méthodes de mesures actuelles et nous nous bornerons à décrire celles que nous avons utilisées pour la détermination de la résistance du rocher dans le cas de la construction du puits blindé d'Electra-Massa, près de Brigue (Valais) (fig. 1).

## 2. Dispositions générales

Il a été décidé de faire un essai grandeur nature sur un tronçon de puits blindé assez long pour que, d'une part, les effets de bouts soient aussi petits que possible, et, d'autre part, pour que le volume de rocher intéressé soit suffisamment important pour tenir compte de son hétérogénéité locale moyenne. Ce tronçon a été soumis à des essais de pression intérieure jusqu'à 200 kg/cm<sup>2</sup> et à des pressions extérieures jusqu'à écrasement.

Ce tronçon de puits, appelé chambre d'essai, a été aménagé au fond d'une galerie de reconnaissance de 200 m de longueur, sous une couverture de 200 m également. Cette chambre avait un diamètre de 2,70 m, une longueur de 14 m, une pente de 80 % et un volume de 80 m<sup>3</sup>. Elle était construite en tôle d'acier de 8 mm d'épaisseur, ses extrémités étaient hémisphériques. Elle a été bloquée à ses deux extrémités par des massifs d'ancrage en béton et a été enrobée entre tôle et rocher par une épaisseur moyenne de 30 à 40 cm de béton. On y pénétrait par un cône d'accès aménagé dans le massif d'ancrage supérieur et un trou d'homme de 50 cm de diamètre, obturé par une porte autoclave de 15 cm d'épaisseur.

Dans la roche, au large de la chambre, sur toute sa longueur et perpendiculairement à son axe, étaient disposées des couronnes de drains et des couronnes d'injection d'eau. Chaque couronne était reliée par des tuyauteries aux installations d'essais situées dans la galerie d'accès. Plus au large encore, un voile d'injection de ciment assurait l'étanchéité de la roche, lors de la mise en pression extérieure.

Dans la galerie d'accès étaient disposés, d'une part, sur une plate-forme les pompes de mise en pression, les réservoirs et tuyauteries; d'autre part, dans une baraque climatisée les appareils de mesure (fig. 2).

Deux tuyauteries traversant le massif d'ancrage supérieur et le blindage assuraient le remplissage de la chambre, sa mise en pression et sa vidange. Une de ces tuyauteries aboutissait au point le plus haut de la chambre, l'autre à son point le plus bas.

Une pompe haute pression située dans la galerie d'accès et reprenant les eaux d'infiltration assurait l'alimentation en eau et permettait le remplissage de la chambre par la tuyauterie arrivant à son point bas.

Un compresseur permettait, par injection d'air comprimé dans la tuyauterie arrivant au haut de la chambre, une vidange complète par le tuyau du bas.

La mise en pression intérieure était assurée par une pompe à piston haute pression.

Une attention toute particulière a été portée à la parfaite étanchéité de toute l'installation. Toutes les tuyauteries haute pression ont été, préalablement aux essais, testées à une pression de 250 kg/cm<sup>2</sup>.

La mise en pression intérieure était assurée par une pompe moyenne pression qui reprenait l'eau de la pompe d'alimentation, l'injectait dans le réseau de tuyauterie placé à cet effet autour de la chambre dans le rocher. En cas de besoin, l'eau pouvait également être injectée dans le réseau de drainage.

Un système complexe de vannes permettait toutes les manœuvres nécessaires. Les vannes de mise en charge et de décharge du type à tiroir à retour sans pression aux bacs d'alimentation ont été munies de servomoteurs à air comprimé pour faciliter une commande centralisée et automatique (fig. 3).

### 3. Programme d'essai et procédés de mesure

Nous avons décidé de suivre un programme d'essai aussi complet que possible, pour pouvoir recouper nos mesures au mieux et définir le comportement du rocher jusqu'à des valeurs élevées. Le programme de mise en pression intérieure prévoyait une montée en pression de 5 en 5 kg/cm<sup>2</sup> avec retour intermédiaire à 0 kg/cm<sup>2</sup> jusqu'à 80 kg/cm<sup>2</sup>, avec montée de 10 en 10 kg/cm<sup>2</sup> avec retour intermédiaire à 0 kg/cm<sup>2</sup> jusqu'à 140 kg/cm<sup>2</sup>, une montée de 20 en 20 kg/cm<sup>2</sup>, avec retour intermédiaire à 0 jusqu'à 200 kg/cm<sup>2</sup>. Au terme de chaque cycle, une essai de fluage était exécuté.

Les méthodes de mesure devaient être suffisamment précises et les points de mesure suffisamment nombreux



Fig. 2. — Au premier plan, pompes et tuyauteries. Au second plan, le local de mesure.

pour pouvoir tenir compte non seulement de l'étude des phénomènes d'ensemble, mais aussi des phénomènes locaux dus à l'hétérogénéité du milieu rocheux. D'autre part, il nous a paru prudent d'utiliser différents procédés, de façon à pouvoir recouper nos mesures et pallier ainsi d'éventuelles défaillances du matériel.

Le programme de mise en pression extérieure, plus simple, a consisté à monter progressivement la pression derrière le blindage, jusqu'à ce que nous obtenions l'écrasement de la chambre. Ne pouvant prévoir à l'avance avec exactitude en quel point s'amorcerait le phénomène d'écrasement, il nous était impossible de mettre en place des instruments de mesure susceptibles de donner satisfaction. Aussi nous sommes-nous contentés de contrôler les pressions sur le blindage en de nombreux points et de suivre photographiquement et cinématographiquement le phénomène.

#### a) Mesures volumétriques

Le procédé de mesure le plus simple consistait à mesurer les volumes d'eau injectés dans la chambre lors de la mise en charge, et de même à mesurer les volumes restitués lors de la décharge.

Nous avons disposé à cet effet des bacs gradués sur l'alimentation de la pompe haute pression. Les niveaux étaient relevés avant et après chaque essai. Il y a lieu, bien entendu, de tenir compte de la compressibilité de l'eau lors de la mise en valeur des résultats.

Nous obtenions ainsi la déformation volumétrique de la chambre, et partant de là, les déformations diamétrales moyennes. La moyenne de toutes les autres mesures ponctuelles que nous avons exécutées devait normalement coïncider avec ces mesures volumétriques.

Cette méthode n'est valable que si toute l'installa-

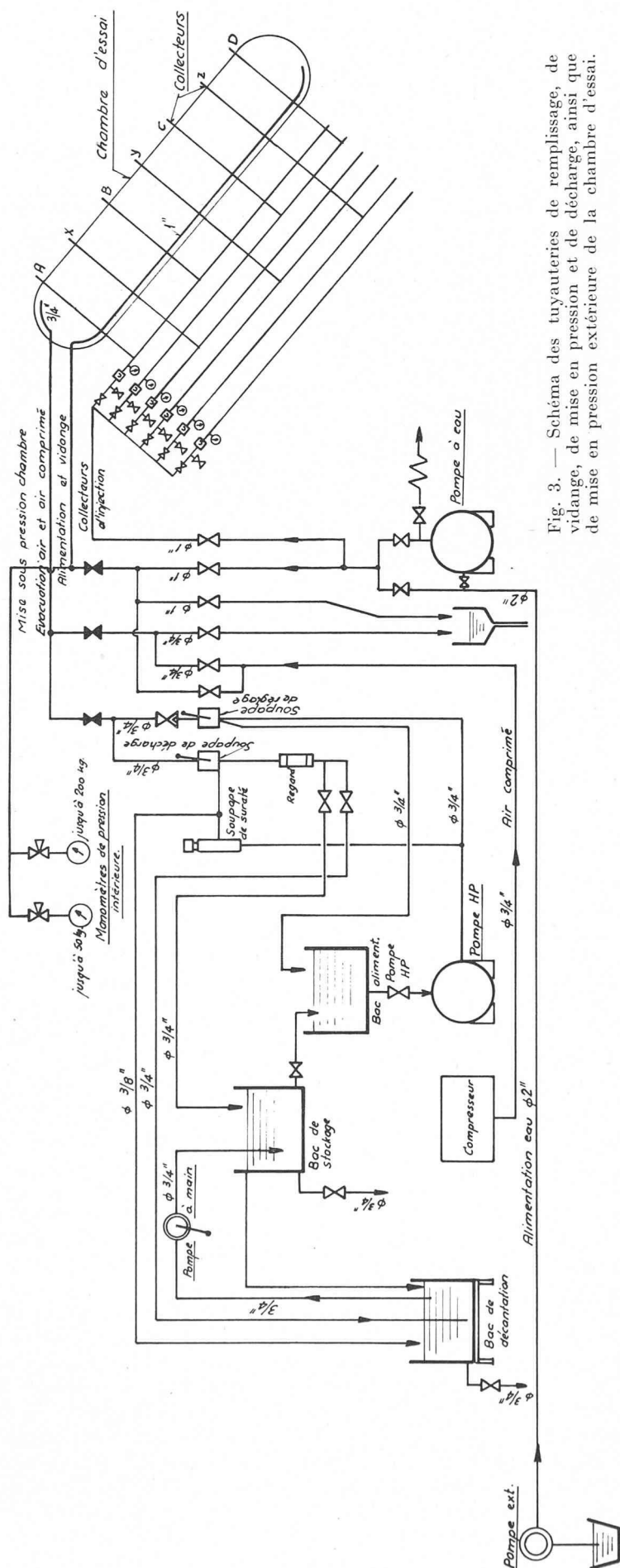


Fig. 3. — Schéma des tuyauteries de remplissage, de vidange, de mise en pression et de décharge, ainsi que de mise en pression extérieure de la chambre d'essai.

tion, ainsi que la chambre elle-même, sont rigoureusement étanches. Si le contrôle de l'étanchéité des systèmes de tuyauterie a été facile à réaliser, il était impossible de contrôler par un essai préliminaire l'étanchéité de la chambre elle-même. Cela serait revenu à avoir exécuté un premier essai qui aurait modifié les caractéristiques initiales du complexe tôle, béton, rocher. Nous avons dû nous contenter de prendre des précautions particulières lors du montage de la chambre et de contrôler les soudures.

Lors des mesures de fluage de longue durée, à pression constante, la moindre fuite d'eau aurait pu être assimilée à tort à un fluage, et ce n'est qu'en comparant les résultats obtenus par méthode volumétrique avec ceux obtenus par un autre procédé de mesure que nous avons pu avoir la certitude que l'ensemble de notre installation était étanche.

#### b) Mesures diamétrales et longitudinales

Nous avons disposé dans la chambre des paires d'extensomètres diamétraux dans trois sections différentes, ainsi que deux extensomètres longitudinaux, devant mesurer les allongements de la chambre.

Ces extensomètres, du type « Huggenberger », étaient constitués de tubes télescopiques dont les extrémités étaient vissées sur des plaques de base elles-mêmes soudées au blindage (fig. 4).

Une tête de lecture composée d'un comparateur potentiométrique mesurait le mouvement des deux tubes couissant l'un dans l'autre, et déterminait donc les variations de diamètres, ou les variations de longueur de la chambre. La transmission des mesures s'opérait par voie électrique et la lecture était faite à l'aide d'un pont de Wheatstone. Malheureusement, ces appareils nous ont occasionné certaines difficultés. En effet, ces appareils très précis, puisqu'ils permettent de mesurer le centième de mm, se sont grippés lorsque la pression intérieure a atteint une certaine valeur. Les impuretés contenues dans l'eau n'étaient pas étrangères à cet incident. De toute façon, la course de ces appareils, qui est de l'ordre de 10 mm, était insuffisante. Les déformations maxima que nous avons obtenues étaient nettement supérieures à ce que nous avions estimé lors du choix des appareils de mesure. D'autre part, le système nécessaire au tarage préalable et le dispositif de transmission à distance ne permettaient pas l'enregistrement des déformations, et toutes les mesures étaient à effectuer par lecture à vue. Il est regrettable que nous n'ayons pas pu adapter à temps ce type d'appareils à nos conditions de travail, car nous avons constaté par la suite que les mesures diamétrales, si elles sont effectuées en suffisamment de points, sont sûres et intéressantes lors de l'interprétation des résultats.



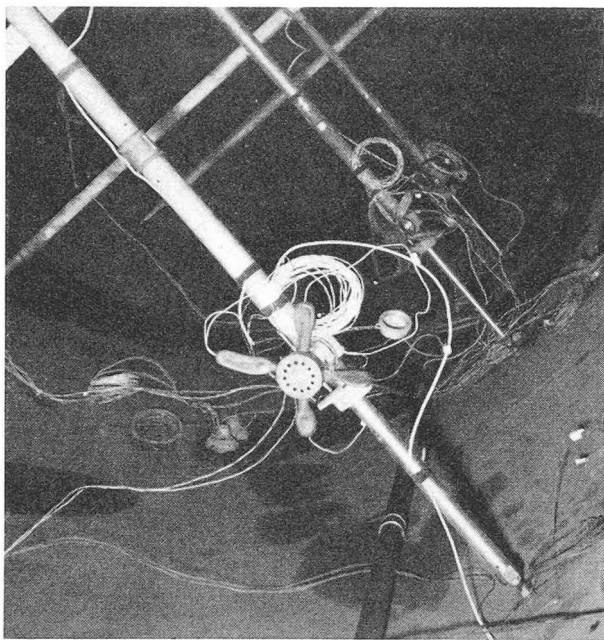


Fig. 4. — Extensomètres télescopiques.

### c) Mesures circonférentielles

Nous avons porté notre effort principal sur les mesures circonférentielles, exécutées à l'aide de jauges de contrainte. Il n'y avait guère que ce procédé qui nous permettait de mesurer les déformations de la chambre simultanément en un grand nombre de points (fig. 5).

La jauge de contrainte et, par ailleurs, un capteur bon marché et son emploi dans des conditions normales est simple.

Nous rappelons brièvement qu'une jauge de contrainte est composée d'un filament de constantan disposé en forme de dents de peigne et collé entre deux feuilles minces de papier. Les dimensions des jauges que nous avons utilisées étaient d'environ  $30 \times 15$  mm. La résistance électrique de ce filament a la propriété de varier avec l'effort mécanique de traction ou de compression auquel il est soumis, dans la proportion de

$$\frac{\Delta R}{R} = 2 \frac{\Delta L}{L}$$

( $R$  étant la résistance du filament,  $L$  sa longueur).

Les jauges sont collées soigneusement sur l'objet soumis à une contrainte, de telle façon que la déformation de la jauge suive rigoureusement la déformation de l'objet. Les variations de résistance électrique, fonction de la déformation, sont mesurées à l'aide d'un pont de Wheatstone.

Nous disposions d'un appareil enregistreur et sélectif de 30 canaux, aussi avons-nous utilisé 30 points de mesure :

- 18 jauges pour mesure des déformations circonférentielles ;
- 8 jauges pour contrôle des déformations longitudinales ;
- 3 jauges pour contrôle des déformations autour du trou d'homme ;
- 1 jauge montée sur un manomètre spécial et permettant ainsi la mesure simultanée de la pression.



Fig. 5. — Mise en place des jauges de contrainte.

Nous avons préalablement étudié le problème de l'utilisation de ces jauges en laboratoire. Bien nous en a pris, car nous nous sommes heurtés à trois difficultés importantes : le passage des fils électriques à travers l'enceinte de la chambre, l'isolation des jauges, la compensation thermique des jauges.

Le passage des fils électriques à travers l'enceinte de la chambre a été résolu à l'aide d'un presse-étoupe jouant en même temps le rôle de boîte de connexion. Le presse-étoupe, situé dans la chambre, a été construit en deux parties. L'une assurait l'étanchéité vis-à-vis de l'extérieur de la chambre en noyant les 120 conducteurs raccordés aux appareils de mesure dans une masse de résine synthétique ; seules dépassaient de cette masse des bornes de raccordements. L'autre partie assurait l'isolation des 120 connexions des conducteurs reliés aux capteurs de mesure, vis-à-vis de l'eau baignant le presse-étoupe. Cette isolation a été réalisée à l'aide d'un manchon souple entourant le presse-étoupe et rempli d'huile sous pression. Cette construction nous a donné entière satisfaction et nous n'avons enregistré aucune fuite, ni aucun défaut électrique, même sous des pressions alternées allant jusqu'à  $200 \text{ kg/cm}^2$  et lors d'un essai de fluage à  $160 \text{ kg/cm}^2$  pendant trois semaines consécutives (fig. 6).

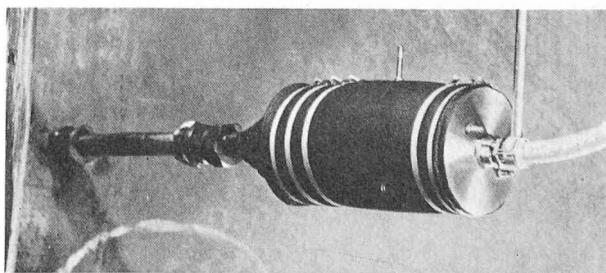


Fig. 6. — Presse-étoupe pour passage de 120 conducteurs.

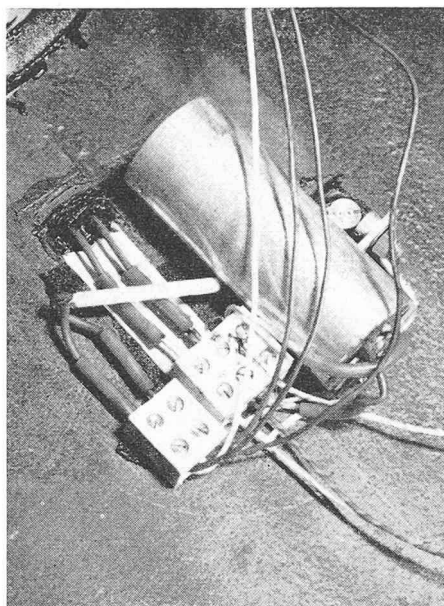


Fig. 7. — Un point de mesure par jauge de contrainte.

- A gauche, jauge active.
- A droite, jauge passive et son étui.
- En travers de la jauge active, une résistance pour mesure des températures.

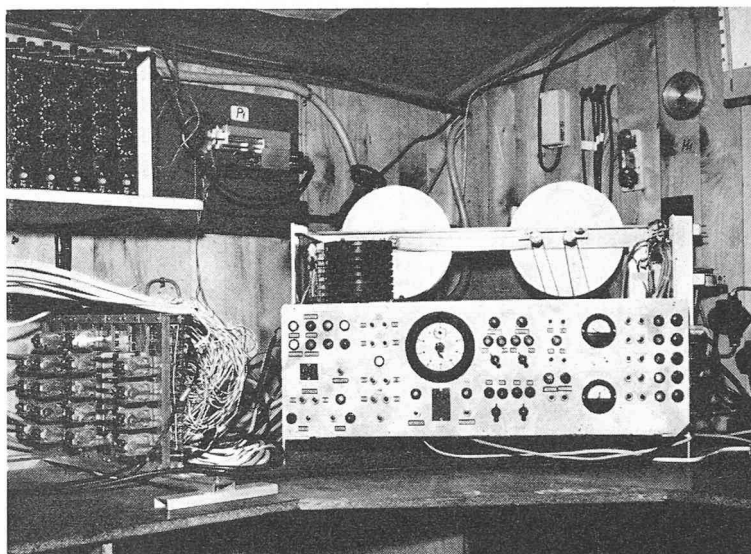


Fig. 8. — Dans le local de mesure.

- En haut à gauche, un bloc d'étalonnage ; à côté, le manomètre électrique.
- En bas à gauche, les chaînes de relais.
- En bas à droite, le programmeur double.

Un problème d'isolation analogue s'est posé pour les jauges de contrainte. Il est connu que les jauges doivent être rigoureusement isolées par rapport à la masse. Ceci suppose donc un collage très soigneux sur la tôle de blindage et une parfaite absence d'humidité, ce qui n'est pas facile à obtenir lorsque le milieu est de l'eau sous haute pression. Nous avons réalisé cette isolation en collant sur le blindage par-dessus la jauge un couvercle souple en caoutchouc synthétique moulé. L'espace libre entre la tôle et le couvercle était rempli d'huile sous pression par une soupape appropriée. Les fils électriques traversaient simplement la paroi du couvercle, la striction du caoutchouc assurant une étanchéité suffisante. La pression de l'huile dans l'enceinte ainsi formée étant toujours supérieure à la pression de l'eau dans la chambre, il n'y avait pas possibilité de pénétration d'humidité jusqu'à la jauge ou à ses connexions. Nous avons pu ainsi garantir une isolation de tous nos capteurs supérieure à 1000 M $\Omega$  pendant tous nos essais.

Les jauges étant sensibles aux variations de température, il est d'usage de les compenser thermiquement, en les faisant travailler par paires. Une jauge dite active est donc collée sur le matériau à tester, l'autre, dite passive, est collée sur un support inerte mais dans les mêmes conditions de température. Une seule jauge passive peut servir pour un ensemble de plusieurs jauges actives. Etant donné les conditions délicates dans lesquelles nous nous trouvons, nous avons préféré adjoindre à chaque jauge active une jauge passive, de façon à ce que si une défaillance se produisait sur une jauge passive, elle n'entraînant la perte que d'un seul point de mesure. Outre le problème d'isolation, il s'est posé pour la jauge passive celui de son support qui, lui, ne doit être soumis à aucune contrainte. Or, comme nous nous trouvons dans une enceinte à pression hydrostatique, le support de la jauge se trou-

vait inmanquablement soumis à un état de compression dans trois dimensions. Si l'erreur qui en résultait était sans importance pour les basses pressions, il n'en était plus de même pour des pressions voisines de 200 kg/cm<sup>2</sup>. Nous avons pensé étalonner la déformation des supports, constitués par des petites plaquettes de tôle, mais avons dû remarquer que la loi de Hooke et la constance du coefficient de Poisson n'étaient plus guère valables à ces petites dimensions, autrement dit que l'acier ne se comportait pas d'une façon isotrope. Il aurait fallu étalonner chaque plaquette pour elle-même, ce qui aurait été fort long. Nous avons alors préféré placer la jauge de comparaison et son support dans un étui métallique étanche, l'isolant ainsi de la pression ambiante. La mise au point de ces étuis fut laborieuse, car il se produisait dans certaines circonstances des phénomènes capacitifs parasites troublant les mesures (fig. 7).

D'une façon générale, les jauges de contrainte nous ont donné satisfaction, et malgré les difficultés rencontrées et mentionnées ci-dessus, elles restent des capteurs économiques et sûrs si l'on prend les précautions voulues. Toutefois, dans notre cas, elles ne représentaient pas le capteur idéal pour deux raisons. Premièrement, les déformations que nous avons obtenues étaient très importantes pour les hautes pressions, et dépassaient les capacités d'enregistrement des jauges. En effet, celles-ci ont un comportement élastique jusqu'à des déformations de 1,5 à 2 ‰. Elles peuvent encore donner satisfaction jusqu'à 3, éventuellement 4 ‰ ; toutefois plusieurs se sont rompues avant d'arriver à ces valeurs.

Deuxièmement, nous avons eu pour les hautes pressions des déformations locales très importantes, ce que nous n'avions pas prévu. Dans plusieurs cas, lorsque la jauge se trouvait précisément dans une de ces zones localement très déformée, telles des mar-

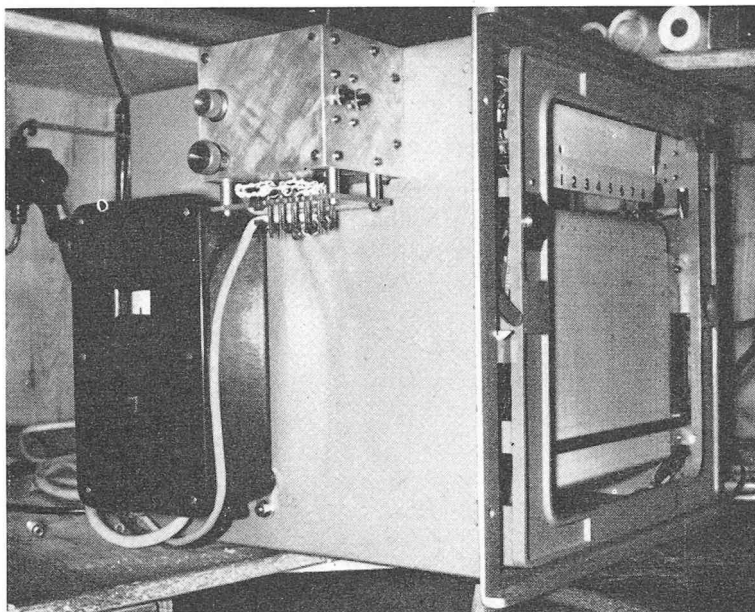


Fig. 9. — Le pont électronique à équilibrage automatique. Sur le côté, dispositif de correction de la dérive du zéro.

mites, les résultats, quoique fidèlement enregistrés, se sont trouvés ininterprétables, car ils ne donnaient plus aucune indication sur la déformation circonférentielle recherchée.

#### *Mesure des pressions*

Nous avons mesuré les pressions de trois manières différentes. Un manomètre électrique, de notre conception, basé sur le principe des jauges de contrainte, nous permettait l'enregistrement continu de la pression sur un des canaux réservé à cet effet. Ce manomètre était monté dans le local de mesure et relié à la chambre par des tuyauteries adéquates. Un manomètre de Bourdon, soigneusement étalonné, nous servait de contrôle et

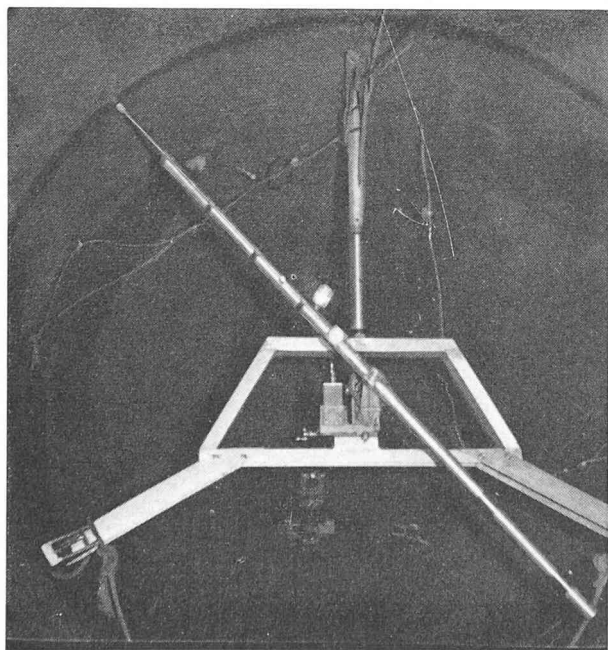


Fig. 10. — Appareil pour mesure des profils. En bas au fond, le théodolite servant au centrage.

était monté en parallèle avec le précédent. De plus, régulièrement, et en particulier lorsque nous atteignons la valeur maximum d'un cycle de mesure, nous effectuons un contrôle précis au manomètre à poids. Ceci nous permettait de corriger et de préciser éventuellement les valeurs données par le manomètre électrique et le manomètre de Bourdon.

#### **4. Appareils de mesure**

L'appareillage de mesure le plus important se rapportait aux jauges de contrainte. Nous disposions de 30 canaux de mesure, correspondant chacun à une paire de jauges actives et passives. Chacun de ces canaux était équipé d'un bloc d'étalonnage permettant au début de la mesure l'équilibrage des lignes en résistance et en capacité ainsi que le réglage individuel du zéro initial. Un bloc de commutation automatique permettait de faire défiler cycliquement chaque canal sur l'appareil enregistreur au rythme d'un canal toutes les trois secondes.

L'appareil enregistreur était constitué d'un pont électronique à équilibrage automatique. L'enregistrement se faisait sur bande de papier de 25 cm de largeur, à vitesse de déroulement variable. Un commutateur permettait l'enclenchement de 5 gammes de mesures différentes suivant l'importance des déformations. Les plus petites déformations mesurables étaient de l'ordre de  $0,005 \text{ ‰}$  (fig. 8).

L'importance du programme prévu, comportant quelque 450 paliers et 30.000 mesures, nous a amené à prévoir une programmation automatique, de façon à accélérer nos essais, diminuer les temps morts, les risques d'erreur et le personnel nécessaire. Ce dispositif nous a permis de conduire à bien nos essais sans arrêt jour et nuit, en un peu plus de deux semaines.

Nous avons réalisé à cet effet une programmation double. D'une part, un système à bande perforée fixait le programme de mise en pression, les paliers de fluage, les décharges ; d'autre part, un système cyclique commutait successivement les différents canaux de mesure sur l'enregistreur. Les mesures étaient toujours répétées deux fois de suite. Tout le dispositif se contrôlait lui-même en fonction de la pression dans la chambre. Par exemple, lorsque le programme prévoyait une mesure de fluage, la pression était automatiquement maintenue constante dans la chambre, et les cycles de mesure répétés à intervalles réguliers jusqu'à ce que la pente de la courbe de fluage ait atteint une valeur minimum fixée d'avance ; alors seulement le programmeur donnait l'ordre de passer au palier de mesure suivant. Des dispositifs accessoires assuraient la commutation des gammes de mesure adéquates pour les mesures de pression et de déformation.

Un problème délicat à résoudre a été celui de la dérive du zéro absolu. En effet, du fait des variations inévitables de température et d'humidité dans les appareils, il s'ensuivait au cours du temps une dérive du zéro de l'ensemble des canaux. Aussi pour pallier cet inconvénient, le programmeur cyclique contrôlait



au début de chaque série de mesure la dérive du zéro et enclenchait un dispositif potentiométrique qui le ramenait à sa valeur initiale avant que soit autorisé l'enregistrement des mesures (fig. 9).

L'ensemble du système ordonné par le programmeur était piloté par des chaînes logiques de relais qui distribuaient les ordres aux organes intéressés de régulation, en particulier aux servomoteurs commandant les vannes de mise en charge et de décharge de la chambre.

Grâce à ces dispositions, les essais pouvaient être conduits par un seul surveillant et un aide.

Parallèlement au déroulement de ces opérations, une équipe de deux techniciens dépouillait les résultats au fur et à mesure, de façon à pouvoir contrôler toute anomalie éventuelle.

## 5. Mesures accessoires

Outre les mesures principales : volumes, déformations diamétrales et circonférentielles, nous relevions différentes autres grandeurs : mesure électrique des températures dans la chambre à l'aide de résistances étalonnées, mesure de la température et de l'humidité dans la galerie et dans le local de mesure, mesure par comparateur au centième de mm de l'éventuel recul du massif d'ancrage.

Pour compléter nos informations, nous avons réalisé un appareil destiné à mesurer avec précision les profils de la chambre. Ceci nous a permis d'une part de déterminer les ovalisations, et d'autre part les déformations permanentes après les essais de mise en pression intérieure. La construction de cet appareil a posé certains problèmes, du fait que nous devions obligatoirement rattacher les mesures de chaque profil à un axe parfaitement défini. Or, cet axe était impossible à matérialiser, pour des raisons techniques, et aucune des génératrices de la chambre n'était suffisamment rectiligne pour servir de base sûre.

L'appareil était constitué d'un châssis central, supporté par trois pieds écartés de 120°, dont un réglable. Il pouvait ainsi être calé contre les parois, son centre correspondant approximativement à l'axe de la chambre. Sur ce châssis était monté un bras tournant télescopique muni d'un comparateur au centième de mm et d'un rapporteur d'angle à vernier. Un dispositif de chariotage à vis micrométrique permettait de déplacer l'axe du bras tournant dans le plan perpendiculaire à l'axe de la chambre. Un axe fictif a été défini par voie optique en plaçant au milieu de

l'une des extrémités de la chambre un théodolite en station fixe visant une mire placée au centre de l'autre extrémité. L'axe du bras tournant, lui-même creux, était équipé d'un collimateur permettant, par simple visée dans le théodolite, de l'amener à coïncider exactement avec l'axe de la chambre défini arbitrairement.

Les mesures de profils relevées avec cet appareil nous ont permis de définir tous les défauts de forme et d'apprécier les points d'amorce de flambage les plus probables lors des essais de mise en pression extérieure (fig. 10).

## Conclusions

Ces essais, qui ont été concluants dans l'ensemble, nous ont permis de tirer des enseignements très utiles sur les méthodes de mesure à employer et sur les appareils eux-mêmes. Nous pouvons en tout cas dire que, dans les travaux de cette envergure, qui entraînent des frais importants, il est prudent d'employer au minimum deux procédés de mesure différents, assurant des recoupements et donnant une sécurité en cas de défaut de fonctionnement sur l'un des systèmes. Il n'est pas négligeable non plus d'avoir suffisamment de points de mesure et de se fixer un programme d'essai assez étendu, d'une part pour des raisons de sécurité dans l'interprétation des résultats et, d'autre part, pour pouvoir analyser ces résultats d'une manière statistique, la dispersion des valeurs étant souvent assez importante suivant les conditions locales.

Des méthodes nouvelles permettent maintenant l'essai de la roche à l'aide de chambres préfabriquées de petites dimensions, ne nécessitant plus d'excavation à l'explosif, mais simplement un forage. Ces chambres sont réalisées de telle façon que l'enrobage de béton étant éliminé, le rocher est soumis directement à la contrainte appliquée. Des progrès ont aussi été réalisés dans la construction d'extensomètres à mesure numérique, dont la course peut atteindre 100 à 150 mm, avec une précision de lecture continue de l'ordre de 0,01 mm. Ces extensomètres, absolument stables dans le temps, peuvent en outre être télécommandés et ramenés à volonté sur leur valeur initiale, de façon à permettre la répétition des mesures.

Il reste encore beaucoup à faire dans le domaine des techniques de mesure appliquées à l'étude expérimentale de la mécanique des roches et il serait souhaitable que les essais soient multipliés et les résultats comparés. Il s'ensuivrait certainement une simplification et une rationalisation des méthodes d'essai.

## NÉCROLOGIE

### Augustin Genoud

Augustin Genoud était le petit-fils et homonyme d'Augustin Eggis, professeur, organisateur des musiques militaires du canton de Fribourg et maître de chapelle de la collégiale Saint-Nicolas.

Augustin Genoud était né à Fribourg en 1886. Il avait fait ses études au Collège Saint-Michel et à l'abbaye d'Einsiedeln, puis fréquenté, pendant une année, une école d'architecture à Munich, avant d'être

reçu à l'Ecole des Beaux-Arts à Paris, où il travailla dans l'atelier Pascal ; il reçut son diplôme officiel en 1920 ; il était du reste membre d'honneur, depuis cette année-ci, de la Société des architectes diplômés du gouvernement français.

Augustin Genoud rentra en Suisse en 1923 et s'associa successivement aux architectes Frédéric Broillet et Albert Cuony. Homme de goût, soucieux d'accorder sa création avec le paysage où elle devait être implantée, d'une remarquable habileté technique, le défunt construisit de nombreux édifices religieux ou profanes et des ouvrages d'art à Fribourg et ailleurs, soit seul, soit en