

**Zeitschrift:** Bulletin technique de la Suisse romande  
**Band:** 65 (1939)  
**Heft:** 14

**Artikel:** Le stand de l'Ecole d'ingénieurs de Lausanne à l'Exposition nationale  
**Autor:** Oguey, Pierre  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-50004>

### **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:** 30.03.2025

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

# BULLETIN TECHNIQUE

## DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les 15 jours

### ABONNEMENTS :

Suisse : 1 an, 12 francs

Etranger : 14 francs

Pour sociétaires :

Suisse : 1 an, 10 francs

Etranger : 12 francs

Prix du numéro :

75 centimes.

Pour les abonnements  
s'adresser à la librairie  
F. Rouge & C<sup>ie</sup>, à Lausanne.

Organe de la Société suisse des ingénieurs et des architectes, des Sociétés vaudoise et genevoise des ingénieurs et des architectes, de l'Association des anciens élèves de l'Ecole d'ingénieurs de l'Université de Lausanne et des Groupes romands des anciens élèves de l'Ecole polytechnique fédérale. —

COMITÉ DE PATRONAGE. — Président: R. NEESER, ingénieur, à Genève; Vice-président: M. IMER, à Genève; secrétaire: J. CALAME, ingénieur, à Genève. Membres: *Fribourg*: MM. L. HERTLING, architecte; A. ROSSIER, ingénieur; *Vaud*: MM. F. CHENAUX, ingénieur; E. ELSKES, ingénieur; EPITAUX, architecte; E. JOST, architecte; A. PARIS, ingénieur; CH. THÉVENAZ, architecte; *Genève*: MM. L. ARCHINARD, ingénieur; E. ODIER, architecte; CH. WEIBEL, architecte; *Neuchâtel*: MM. J. BÉGUIN, architecte; R. GUYE, ingénieur; A. MÉAN, ingénieur cantonal; *Valais*: M. J. DUBUIS, ingénieur, à Sion.

REDACTION : D. BONNARD, ingénieur, 80, Avenue de France, LAUSANNE.

### ANNONCES

Le millimètre sur 1 colonne,  
largeur 47 mm :  
20 centimes.

Rabais pour annonces  
répétées.

Tarif spécial  
pour fractions de pages.

Fermage des annonces :  
Annonces Suisses S. A.  
8, Rue Centrale (Pl. Pépinet)  
Lausanne

CONSEIL D'ADMINISTRATION DE LA SOCIÉTÉ ANONYME DU BULLETIN TECHNIQUE  
A. DOMMER, ingénieur, président; G. EPITAUX, architecte; M. IMER; A. STUCKY, ingénieur.

SOMMAIRE : *Le stand de l'Ecole d'ingénieurs de Lausanne à l'Exposition nationale*, par M. PIERRE OGUEY, professeur de machines hydrauliques. — *Les étapes de l'architecture du XIX<sup>e</sup> siècle en Suisse* (suite), par EDMOND VIRIEUX, architecte cantonal, à Lausanne. — *Le cinquantenaire de la division du génie rural de l'Ecole polytechnique fédérale*. — *Congrès suisse de l'Economie des Eaux*. — *Les congrès*. — *Société suisse des ingénieurs et des architectes*. — SERVICE DE PLACEMENT.

## Le stand de l'Ecole d'ingénieurs de Lausanne à l'Exposition nationale,

par M. PIERRE OGUEY,  
professeur de machines hydrauliques.

L'Ecole d'ingénieurs de Lausanne, fondée en 1853 par quelques anciens élèves de l'Ecole Centrale des Arts et Manufactures, a été la première école technique supérieure de Suisse. A ce titre, en raison aussi des nombreux ingénieurs qu'elle a formés et forme encore et du rôle qu'elle joue en Suisse romande, elle se devait de participer à la manifestation nationale de Zurich.

Elle expose dans la halle des Universités, groupe 43/2 de la section de l'enseignement.

Le principe « thématique » admis par l'Exposition nationale pouvait être avantageusement adopté pour la conception et la présentation de son stand. Il s'agissait moins de faire figurer à Zurich sous une forme ou l'autre toutes les matières enseignées à l'Ecole d'ingénieurs de Lausanne dans ses quatre sections du génie civil, de la mécanique, de l'électrotechnique et de la chimie industrielle que de montrer, tant aux ingénieurs qu'au public non averti, quels sont les éléments essentiels, les moyens et les buts des études techniques du degré universitaire.

### Plan d'études.

Le principe de l'enseignement de l'Ecole d'ingénieurs est illustré par un plan schématique de ses programmes.

L'ingénieur diplômé doit avoir acquis à l'Université la *préparation mathématique et physique* indispensable à ses études et à sa carrière, la *culture technique générale* sans laquelle il n'est pas d'ingénieur complet et la *formation professionnelle* correspondant à sa spécialité. Les cours sont soulignés de couleurs différentes selon qu'ils appartiennent à l'une ou l'autre de ces catégories, montrant comment sont poursuivis, dans les différentes sections et durant les quatre ans d'études, les trois buts essentiels de l'Ecole.

### Etudiants.

Le travail des étudiants devait figurer, par un exemple au moins, dans le stand de l'Ecole. Deux planches exposées tour à tour résument deux travaux de diplôme en *construction de ponts* (professeur M. Hubner) choisis parmi les plus originaux.

Le premier étudie l'élargissement et le renforcement du pont-route de Chandelard sur Lausanne. La solution proposée conserve les anciens arcs, libérés du poids mort, et les anciens appuis; deux arcs auxiliaires nouveaux, inclinés, reposent sur les anciens par l'intermédiaire d'entretroises d'extrémité. La transformation peut s'effectuer sans interrompre le trafic.

Le second travail est un projet de pont pour le funiculaire de Diavolezza, dans les Grisons. Les conditions locales — haute altitude, paysage rocheux — demandaient un ouvrage léger, aux fondations réduites, de montage simple et rapide avec le moins d'échafaudages possible, ce qui a conduit le candidat à proposer un système d'arcs semblables à poutre raidissante et à un montage en porte-à-faux.

### Statique graphique.

Dans les cours donnés à l'École pendant plus de trente ans, le regretté professeur *Benjamin Mayor* († 1936) a développé une méthode de calcul des systèmes articulés de l'espace aussi originale qu'élégante.

Cette méthode fait correspondre à tout système de l'espace un système plan tel que le calcul du second entraîne le calcul immédiat du premier. Aux barres du système à trois dimensions correspondent des barres du système plan, mais aux nœuds et articulations de l'espace correspondent en plan des plaques nodales et non plus de simples articulations comme dans les épures du type ordinaire. Il suffit d'exprimer l'équilibre des plaques nodales pour en déduire les tensions dans les barres du système plan et par suite dans les barres de l'espace.

En étendant la méthode de Williot à de tels systèmes plans, on peut encore utiliser la correspondance entre les deux systèmes pour en déduire les déplacements des nœuds du système de l'espace.

Grâce à ce nouveau mode de représentation, les méthodes graphiques qui ont rendu de si grands services dans l'étude des systèmes plans s'étendent de la façon la plus simple aux systèmes articulés de l'espace.

A titre d'illustration de la méthode B. Mayor, une coupole est exposée avec un modèle métallique du système plan correspondant, visible à droite sur la figure 1.

Les branches théoriques figurent à l'Exposition par cet unique exemple, hommage justifié à un professeur éminent qui contribua grandement au renom de l'École de Lausanne.

Les laboratoires par contre y sont largement représentés, non par toutes leurs activités, l'exiguïté de la place disponible s'y opposait, mais par quelques objets exposés à titre d'exemples, montrant par quels moyens l'étudiant, sa culture générale acquise, est mis en présence des problèmes posés par la pratique et préparé à les résoudre. Par l'observation directe des phénomènes, l'apprentissage de la technique des mesures, la vérification des résultats obtenus par calcul, le contrôle des méthodes théoriques, l'entraînement aux recherches judicieusement conduites, on lui donne conscience de son rôle de futur ingénieur.

Mais les laboratoires universitaires ont aussi un autre but, celui de contribuer au progrès de la technique dans tous les domaines. Qu'il s'agisse de contrôler ou d'établir les qualités d'un béton de chantier important, de déterminer les propriétés d'un métal et les contraintes dans une pièce de machine, de calculer à coup sûr les dimensions d'un ouvrage hydraulique, de construire des machines électriques de caractéristiques anormales ou des machines hydrauliques sous des conditions de marche de plus en plus poussées, le laboratoire, instrument de recherches scientifiques, est l'auxiliaire indispensable de l'ingénieur praticien.

C'est ce que l'École a voulu montrer par des appareils ou machines, non d'exposition, mais de travail, dont la



Fig. 1. — Appareils et échantillons du Laboratoire d'essai des matériaux pierreux. A droite, le modèle de statique graphique illustrant la méthode B. Mayor.

plupart fonctionnent et font l'objet de démonstrations au public.

### Laboratoire d'essai des matériaux, division des matériaux pierreux.

*M. le professeur J. Bolomey.*

Le laboratoire expose quelques appareils intéressant la technique de chantier et des résultats d'essais caractéristiques (fig. 1).

*Détermination de la densité du béton frais.* On sait que la résistance d'un béton est fonction du rapport C/E. Le dosage en ciment C, en kgs par m<sup>3</sup> de béton, se détermine au moyen d'un essai de rendement; la quantité d'eau de gâchage E, en kgs par m<sup>3</sup> de béton, peut se déduire de la densité de celui-ci à condition que les pesées et mesures de volumes se fassent avec précision.

Les appareils exposés, balance très sensible et récipients de mesure, permettent de déterminer avec exactitude la densité du béton frais. Deux graphiques donnent, l'un la relation entre la densité et l'eau de gâchage, l'autre la relation entre la densité et la résistance probable du béton.

*Appareils de chantier pour déterminer la résistance du béton.* Il est désirable que le contrôle de la qualité du béton se fasse d'une manière régulière et continue sur les chantiers. Il faut pour cela que les essais soient rapides, peu coûteux et puissent être effectués par le personnel du chantier sans avoir recours à un laboratoire.

La méthode mise au point par le Laboratoire de Lausanne est la suivante: la résistance du béton dépendant du rapport C/E précité, la résistance du mortier extrait du béton est égale à celle du béton lui-même (sous réserve des tensions intérieures provoquées par les grains de gravier et de l'influence de la grandeur des échantillons prélevés). D'autre part, la résistance à la compression est fonction de celle à la flexion. Il suffira donc de déterminer la résistance à la flexion de petites éprouvettes de mortier extrait pour pouvoir calculer avec une approximation

suffisante la résistance à la compression du béton. Comme matériel, il suffit de disposer d'un tamis à mailles de 4 mm pour extraire le mortier du béton, d'un moule pour fabriquer des éprouvettes de mortier de  $2 \times 2 \times 12$  cm et d'un appareil pour les essayer à la flexion.

Un graphique indique les rapports habituels entre les résistances à la flexion et à la compression.

Un *appareil de mesure du retrait sur les chantiers* est constitué par un moule permettant de fabriquer un anneau de mortier autour d'un noyau cylindrique en acier inoxydable, donc apte aux essais sous l'eau comme à l'air. Sous l'effet du retrait, l'anneau de mortier tend à se raccourcir, le noyau métallique s'y oppose et une fissure se produit; grâce à un jeu de jauges du type utilisé en mécanique, la mesure du retrait se fait au dixième de millimètre par mètre courant, précision en général suffisante pour des essais comparatifs de chantier.

Un *appareil* permet de déterminer les *déformations lentes d'un béton* sur un prisme de  $12 \times 12 \times 36$  cm sous une charge permanente de  $100 \text{ kg/cm}^2$ . Les expériences de Freyssinet ont en effet montré les avantages de l'emploi du béton précontraint, mais il s'agit de voir dans quelle mesure ces avantages s'atténuent au bout de quelques mois ou quelques années par les déformations plastiques. La connaissance de ces déformations intéresse également l'ingénieur du béton armé, car elle lui permettra d'évaluer à leur juste valeur les effets du retrait, des variations de température, des charges fixes ou mobiles, et d'autres encore.

La *coupe d'un prisme de béton* (macrographie) montre la fissuration interne due au retrait auquel s'opposent les gros grains de gravier; c'est d'ailleurs la constatation de ces fissures qui a suggéré l'idée de l'appareil de mesure du retrait cité plus haut. La fissuration, nettement apparente pour peu que l'on mouille la surface, est la cause de la différence entre le retrait apparent d'un béton et le retrait de la pâte liante qu'on en a extraite; c'est grâce à elle aussi qu'un béton sec est toujours plus perméable que le même béton humide.

Une *vitrine* contient le squelette d'un *béton exactement gradué* suivant la formule

$$P = 10 + 90 \sqrt{d : 30}$$

où  $P$  est le poids, en % du poids total du ciment et du ballast, des grains de diamètre inférieur à  $d$  mm.

À côté de la vitrine se trouvent des coupes de béton ayant exactement cette granulation théorique.

L'*effet de la remontée de l'eau dans un béton* est visible sur un prisme fabriqué en position verticale et rompu à la flexion selon un plan horizontal. Les bétons contenant toujours de l'eau en excès, une partie de cette eau tend à se libérer et à remonter à la surface; son mouvement ascensionnel est gêné par les graviers, et d'autant plus que ceux-là sont plus gros. La prise survient avant que l'évacuation de l'excès d'eau soit complète, en particulier à la partie inférieure des grains de gravier, où de ce fait la résistance de la pâte liante est relative-

ment plus faible. Lors de la cassure selon un plan horizontal, les graviers restent attachés à la face supérieure de la section rompue, la face inférieure ne gardant que les alvéoles. On conçoit alors que le module d'élasticité et la résistance soient différents suivant les plans considérés. Il est à noter aussi que ces pellicules d'eau accentuent la gélivité du béton et favorisent son cisaillement suivant les plans horizontaux.

Enfin, un graphique indique l'*influence des dimensions des échantillons de béton* sur leur résistance, appréciable sur la résistance à la compression, mais faible sur celle à la flexion. Un autre montre l'*influence du gel* qui, au contraire, agit fortement sur le module d'élasticité et la résistance à la flexion, mais relativement peu sur la résistance à la compression. L'état de « santé » d'un béton peut être évalué au moyen du rapport des résistances à la flexion et à la compression, ou encore des variations de son module d'élasticité.

#### Laboratoire d'essai des matériaux, division des métaux.

M. le professeur A. Dumas.

Les essais d'élasticité, à condition d'être conduits et interprétés avec discernement, fournissent des renseignements précieux dans des cas où le calcul exact serait inextricable et permettent de contrôler la légitimité des hypothèses simplificatrices faites pour rendre le problème abordable à l'analyse mathématique.

Le Laboratoire en donne un exemple sur un *tuyau de dérivation* de 750/450/450 mm de diamètre renforcé par une bride circulaire ceinturant le plus gros cylindre et une bride elliptique passant entre les deux départs de 450 mm, soumis à une pression intérieure. Ce tuyau est visible à droite sur la figure 8.

L'épaisseur étant relativement faible, l'enveloppe, c'est-à-dire le tube, peut être assimilée à une « membrane » qui ne transmet aux brides que des forces normales, les moments fléchissants auxquels elle donne lieu étant négligeables. Dans une membrane, les tensions  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$  dans deux coupes normales principales sont liées par l'équation :

$$\frac{\sigma_1}{r_1} + \frac{\sigma_2}{r_2} = \frac{p}{e}$$

où  $r_1$  et  $r_2$  sont les rayons de courbure de l'enveloppe,  $p$  la pression intérieure et  $e$  l'épaisseur de la membrane au point considéré.

Si par des conditions d'équilibre extérieur l'une des contraintes  $\sigma_1$  ou  $\sigma_2$  peut être calculée, l'autre est immédiatement connue; les contraintes dans des coupes obliques étant d'autre part définies par un cercle de Mohr, le jeu des forces est assez facile à déterminer. Les contraintes dans la demi-bride elliptique ont été calculées tout d'abord dans l'hypothèse que les brides sont *libres*, c'est-à-dire sans liaison rigide au tube, lequel, assimilé à une membrane de même forme, donne lieu à des forces distribuées selon deux triangles symétriques dans le plan médian de la pièce avec charge maximum au point le plus

bas de la soudure (courbe 6, fig. 2). Les résultats du calcul sont reportés sur l'objet lui-même (courbe 2).

Mais en réalité la liaison par les soudures entre bride et tube apporte à la bride elliptique un soulagement sensible se traduisant par une réduction des contraintes (courbe 5) et un déplacement de la fibre neutre (courbe 3), ainsi que le montrent les résultats des mesures effectuées au laboratoire.

Les moments d'inertie effectifs des sections droites de la bride elliptique d'une part supposée libre, d'autre part soudée au tube, sont également reportées sur l'objet, mettant en évidence l'effet de raidissement dû aux liaisons.

Un second calcul, basé sur la fibre neutre expérimentale (courbe 3), a donné pour les contraintes des valeurs très voisines de celles fournies par les essais, comme le montre la comparaison des courbes (4) et (5).

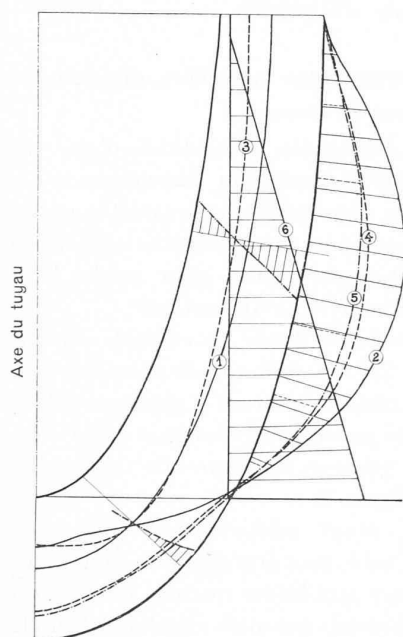


Fig. 2. — Étude des contraintes dans la bride elliptique d'un tuyau de dérivation : 1. Fibre neutre géométrique. — 2. Contraintes calculées dans la bride libre. — 3. Fibre neutre expérimentale. — 4. Contraintes calculées en partant de la fibre neutre expérimentale. — 5. Contraintes mesurées. — 6. Répartition des charges dues à la pression intérieure.

Ainsi, soit par des mesures si l'on dispose d'un laboratoire, soit dans le cas contraire par une estimation du déplacement de la fibre neutre dû à l'influence raidissante du tube, on peut évaluer les contraintes avec une approximation meilleure qu'avec un calcul basé sur des hypothèses simplificatrices du genre de celles rappelées plus haut.

Afin de ne pas compliquer la représentation, le calcul comparatif donné ici à titre d'exemple traite uniquement le problème de l'élasticité et du régime des contraintes dans la bride elliptique.

Les tensions calculées et mesurées se rapportent à une pression de 1 atm. Mais, pour rendre visible les déformations plastiques de l'objet lorsque la limite d'élasticité est dépassée, les essais ont été poussés jusqu'à 60 atm.

#### Laboratoires d'hydraulique et de géotechnique.

MM. Stucky, professeur et Bonnard, ingénieur, chef de travaux.

L'ensemble des objets exposés est donné par la figure 3. A gauche, des dessins d'ouvrages récemment édifiés sur la base d'études expérimentales effectuées au Laboratoire de Lausanne montrent tout l'intérêt que présentent les essais hydrauliques pour le calcul des dimensions des barrages et des évacuateurs de crues.

Au fond du stand, deux modèles de chambres d'équilibre, en verre, sont soumises à des variations de débit commandées par un appareillage automatique, visible au premier plan, agissant sur deux vannes et réalisant les manœuvres d'ouverture et de fermeture provoquées dans une installation réelle par les régulateurs automatiques de vitesse des turbines.

On sait que la chambre d'équilibre placée entre la galerie d'amenée et les conduites forcées d'une usine hydro-électrique a pour but de protéger la galerie contre les coups de bélier dus aux manœuvres des turbines. Elle est dimensionnée en conséquence.

Mais toute variation du débit à l'usine provoque dans la chambre des oscillations du plan d'eau qu'il importe d'amortir rapidement car elles donnent lieu à des variations de chute périodiques préjudiciables à la stabilité du réglage de la vitesse et de la fréquence. A ce point de vue, deux chambres également efficaces quant à la protection de la galerie d'amenée et à l'amplitude maximum des oscillations peuvent, bien que placées dans des conditions identiques, présenter des différences de fonctionnement considérables.

Les deux modèles exposés à Zurich sont précédés de deux conduites de 40 m de longueur chacune, enroulées sur elles-mêmes et sortant d'un lac, soit un réservoir amont à niveau constant alimenté par une pompe centrifuge, tous organes soustraits à la vue du public par la paroi du fond du stand car leur disposition, pour des raisons de convenance locales, ne présentent évidemment pas l'aspect d'une installation réelle malgré la similitude des phénomènes hydrauliques. Les oscillations des plans d'eau sont visibles et peuvent être enregistrées par un chronographe. Un exemple d'enregistrement est donné par la figure 4.

Le modèle de gauche correspond à une *chambre d'équilibre* du type connu à *épanouissement supérieur*. La variation du plan d'eau est représentée par la courbe 4 qui révèle un amortissement des oscillations beaucoup trop lent.

Le modèle de droite est une *chambre différentielle à amortissement immédiat* d'un type nouveau; un puits à faible section en relation directe avec la galerie d'amenée et surmonté d'un déversoir communique par l'intermédiaire d'une conduite à étranglement avec un réservoir adjacent de plus grande section. Les deux parties de la chambre sont dimensionnées de telle sorte qu'après une oscillation complète du niveau dans le puits et une demi-oscillation dans le réservoir l'énergie cinétique de tout le

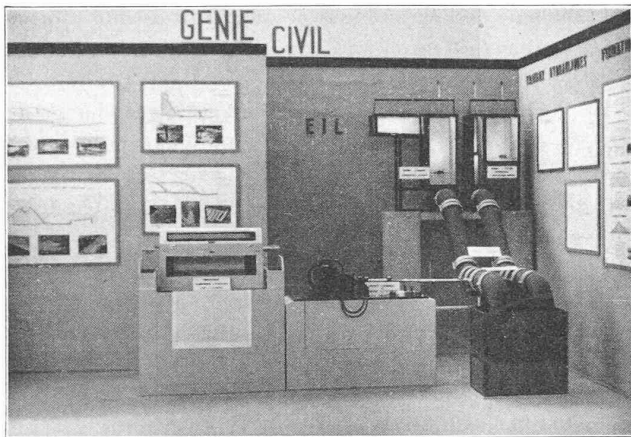


Fig. 3. — Groupe des travaux hydrauliques. Au fond, les deux chambres d'équilibre. Au premier plan, l'appareil de commande des vannes et le chronographe enregistreur.

Le système hydraulique ait disparu et avec elle toute cause d'oscillation. La figure 4 montre nettement que dès la conjonction des courbes 1 du niveau dans le puits et 2 du niveau dans le réservoir avec le niveau statique les plans d'eau restent immobiles (courbe 3) réalisant dès cet instant une stabilité de réglage parfaite.

La comparaison du comportement des deux types de chambre pour des manœuvres diverses, mais toujours identiques pour les deux modèles montrent de façon très suggestive les enseignements que peuvent donner des recherches théoriques étayées par des essais en laboratoire.

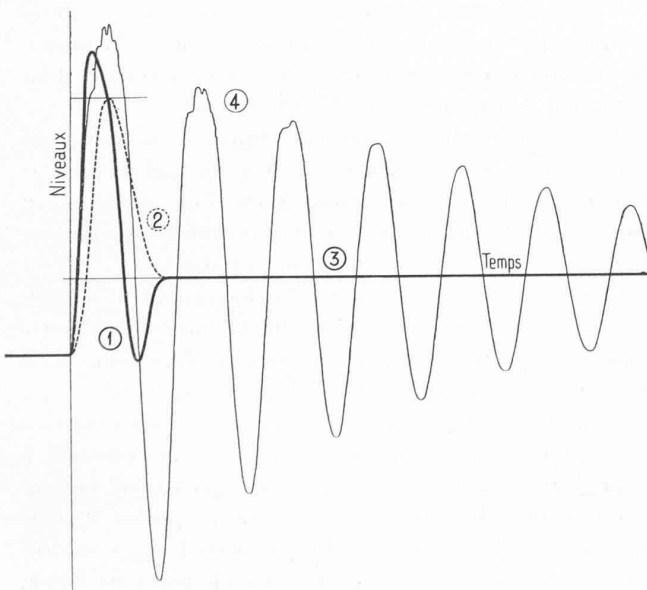


Fig. 4. — Enregistrement d'une manœuvre de fermeture effectuée simultanément sur les deux chambres : 1 et 2, variations du niveau dans le puits et le réservoir de la chambre différentielle à amortissement immédiat. — 3. Niveau stabilisé. — 4. Variation du niveau dans la chambre à épanouissement supérieur.

Quelques photographies et un tableau en style abrégé rappellent aux visiteurs l'intérêt des *études géotechniques*, soit l'examen préalable au laboratoire des terrains de fondation, examens grâce auxquels peuvent être déterminés la compressibilité d'un sol, sa cohésion, son angle de frottement interne, son aptitude au gonflement par le gel, etc. ; autant de chiffres indispensables pour appuyer à l'avance, lors de l'élaboration d'un projet, les risques de tassement et de glissement d'un ouvrage ou immeuble, les dangers de gonflement ou d'affaissement des digues, remblais, chaussées ou aérodrômes.

#### Laboratoire d'électrotechnique.

MM. les professeurs Juillard et Favez.

Un ensemble composé d'une *génératrice série* entraînée à vitesse constante par un moteur asynchrone, un *moteur à excitation séparée* et une *bobine de réactance* (voir fig. 5) illustre le phénomène dit d'*oscillation de relaxation*. Le moteur est soumis à un régime tel que sa vitesse de rotation change de sens, cas particulier extrême d'une vitesse variant périodiquement en grandeur. Ce phénomène s'explique par analogie avec un *circuit électrique oscillant* de la manière suivante :

Considérons tout d'abord la *génératrice série*. La loi d'Ohm appliquée à un conducteur de résistance  $R$  traversé par un courant  $i$  sous une tension  $v$  entre extrémités donne

$$v = i \cdot R$$

Soit maintenant  $v$  la tension aux bornes de la génératrice série,  $e$  sa force électromotrice, proportionnelle en

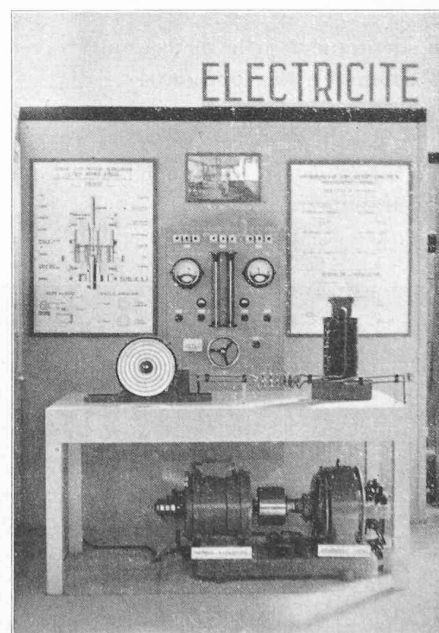


Fig. 5. — Groupe de l'électrotechnique. Circuit montrant l'oscillation de relaxation : à gauche, le moteur oscillant, à droite, la bobine de réactance ; sous la table, la génératrice série entraînée par moteur asynchrone.

première approximation au courant  $i$ , et  $R$  sa résistance. La force électromotrice sera en valeur absolue  $e = A \cdot i$  et la loi d'Ohm donne dans ce cas

$$v = i \cdot R - e = i \cdot R - A \cdot i = i (R - A)$$

Comme en général  $A$  est plus grand que  $R$  la tension peut s'écrire

$$v = -i \cdot R'$$

où  $R' = -(A - R)$  représente une résistance négative.

Or, un circuit oscillant comportant une résistance négative implique un apport d'énergie; dans le cas de la génératrice série, cette énergie provient du moteur asynchrone qui l'entraîne. La génératrice série joue donc le rôle d'une résistance négative.

Le moteur à excitation séparée obéit à la loi de la mécanique

$$K \frac{d\omega}{dt} = M$$

où  $K$  est le moment d'inertie polaire du rotor,  $\omega$  la vitesse angulaire,  $t$  le temps et  $M$  la somme des couples agissant sur le rotor.

Le couple d'un moteur est proportionnel au produit du courant d'induit  $i$  par le flux magnétique, sensiblement constant du fait de l'excitation séparée, d'où,

$$M = Cte \cdot i$$

Comme d'autre part la force électromotrice  $e$  est proportionnelle à la vitesse angulaire  $\omega$  on peut écrire dans le cas du moteur

$$Cte \cdot \frac{de}{dt} = Cte \cdot i$$

$$\text{d'où} \quad i = cte \cdot \frac{de}{dt}$$

expression identique à celle du courant traversant une capacité  $C$  soumise à une tension  $e$ .

Le moteur à excitation séparée joue donc le rôle d'une capacité.

Enfin, la bobine de réactance, à noyau de fer, joue le rôle d'une self-induction.

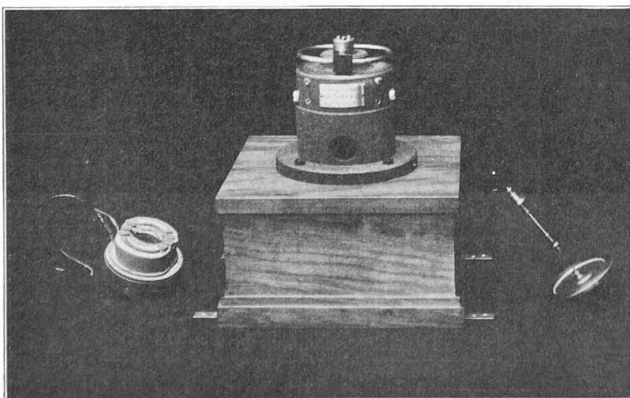


Fig. 6. — Moteur asynchrone biphasé à 75 000 tours/min. Stator, carter avec tuyaux d'amenée de l'air des paliers, rotor.

L'analogie de l'ensemble avec un circuit oscillant formé d'une self-induction, d'une capacité et d'une résistance négative est ainsi complète.

De même que le courant du circuit oscillant change de sens, le courant traversant les machines sera périodiquement inversé; le moteur est soumis à un couple variant de sens avec le courant, d'où l'oscillation constatée de sa vitesse de rotation.

Le Laboratoire d'électrotechnique expose également un moteur asynchrone biphasé construit pour une vitesse de 75 000 tours par minute (fig. 6).

Le principe du moteur asynchrone est bien connu, mais la réalisation dans ce cas particulier soulevait des problèmes difficiles d'ordre électrique et mécanique.

Le stator des moteurs asynchrones habituels est « cylindrique », les conducteurs actifs étant logés suivant les génératrices d'un cylindre. Dans le moteur présenté, le stator est divisé en deux moitiés. Schématiquement, en négligeant l'épaisseur des enroulements, on peut dire que ceux-ci sont appliqués contre deux « disques » formant les deux moitiés du stator. L'espace compris entre ces « disques » constitue l'entrefer dans lequel est placé le rotor qui n'est autre qu'un disque de Ferraris suspendu à un arbre vertical.

Cette disposition a été arrêtée pour permettre l'emploi d'un arbre flexible; le disque tournant à une vitesse supérieure à sa vitesse critique, il reste parallèle à lui-même et ne risque pas d'entrer en contact avec le stator.

Le décalage dans l'espace des enroulements du stator est de 90°. Pour obtenir ce même décalage dans le temps entre les courants formant le système biphasé, un des enroulements du demi-stator possède une capacité et une résistance auxiliaires.

A cause de la très grande vitesse — le rotor a une vitesse périphérique de 350 m/sec environ — le cuivre du rotor a dû être fretté par un anneau en bronze au béryllium dont la tension de rupture est de 15 000 kg/cm<sup>2</sup>.

Avant d'atteindre sa vitesse de régime, le moteur passe par plusieurs vitesses critiques. Il a été prévu pour le démarrage un palier auxiliaire muni d'un coussinet en feutre dans lequel tourne un des tourillons du moteur jusqu'à ce que la pleine vitesse soit atteinte.

L'arbre proprement dit est, nous l'avons vu plus haut, flexible; c'est une tige d'acier de 0,8 mm de diamètre fixée à sa partie supérieure à un deuxième arbre d'un diamètre plus grand qui fait office de tourillon.

Le film d'huile des paliers ordinaires est ici remplacé par un film d'air comprimé fourni par un compresseur à la pression de 5 kg/cm<sup>2</sup>. Le graissage des paliers présentait des difficultés nombreuses parmi lesquelles il suffit de citer le calcul délicat du jeu radial entre tourillon et coussinet et du jeu axial dans le pivot de butée. La solution élégante et nouvelle donnée au problème difficile des paliers d'arbres à très grande vitesse constitue un des éléments les plus intéressants du moteur exposé.

### Laboratoire de machines.

Le groupe d'essai des roues hydrauliques rapides exposé est destiné aux recherches sur les conditions dans lesquelles la cavitation se produit dans les roues de pompes et de turbines.

La tendance actuelle est d'installer des turbines de plus en plus rapides sous des chutes de plus en plus élevées. Or, une grande rapidité, soit un grand « nombre de tours spécifique » exige des vitesses d'écoulement considérables, et la pression en certains points de la roue devient voisine de la pression à laquelle la vapeur se dégage du liquide. Dès que cette pression est atteinte, la « cavitation » commence.

L'aptitude d'une roue à éviter la cavitation dépend évidemment de sa construction, c'est-à-dire des sections de passage, du nombre et de la forme des aubes motrices et aussi du rendement du diffuseur qui récupère une partie de l'énergie cinétique de l'eau à la sortie.

Mais, pour une turbine donnée, elle dépend aussi des conditions locales, soit de la pression barométrique  $H_b$ , de la pression  $H_v$  en dessous de laquelle, compte tenu de la température, la vapeur d'eau se dégage, de la hauteur d'aspiration statique  $H_s$  de la turbine et de sa chute nette  $H$ . On démontre que ces divers éléments se groupent en un facteur, critère de la plus ou moins grande susceptibilité à la cavitation, donné par l'expression

$$\sigma = \frac{H_b - H_v - H_s}{H}$$

où toutes les pressions sont exprimées en mètres d'eau.

Le groupe présenté à Zurich est conçu de manière à pouvoir faire varier pour la turbine-modèle la différence des termes  $H_b - H_s$  en modifiant la pression régnant sur le plan d'eau aval, et la chute nette en modifiant la différence de pression amont-aval. Il se compose d'une pompe centrifuge à grand débit entraînée par moteur électrique à vitesse variable, d'une tuyauterie d'amenée sur laquelle est inséré un « venturi » de mesure, d'une turbine à distri-

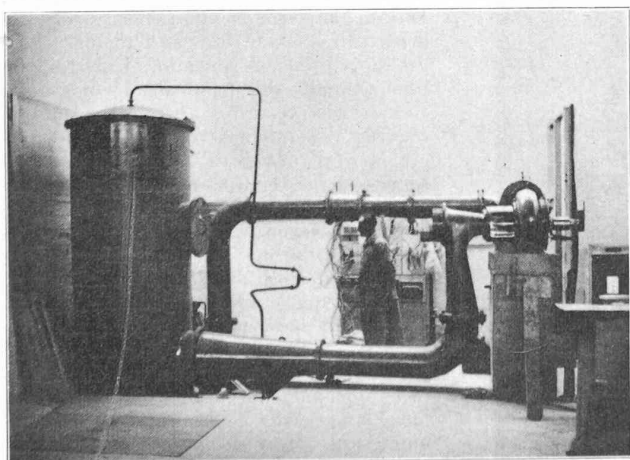


Fig. 7. — Groupe d'essai des roues hydrauliques rapides. Vue prise lors du montage, montrant le réservoir étanche, le tuyau d'aspiration d'air, le venturi de mesure du débit et la turbine.

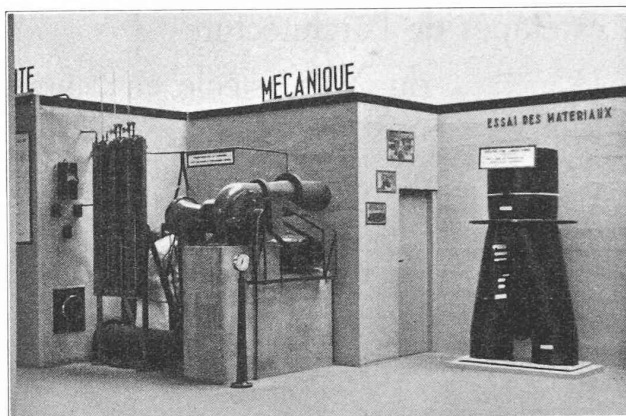


Fig. 8. — Groupe d'essai des roues hydrauliques rapides, parois en place ne laissant visibles que la turbine et son alternateur.

A gauche, les appareils de commande à distance et le tableau des piézomètres de mesure.

A droite, le tuyau de dérivation étudié par le Laboratoire d'essai des matériaux, division des métaux.

buteur mobile et roue type hélice rapide à aubes réglables à l'arrêt et d'un réservoir étanche. Le débit, la chute nette et la pression aval sont mesurées au moyen de piézomètres à mercure. Une pompe centrifuge à air permet de provoquer une dépression sur le niveau aval équivalente à celle qu'entraînerait un abaissement du niveau statique jusqu'à près de dix mètres.

La cavitation généralisée, les dégagements de vapeur importants sont révélés, comme d'ailleurs dans les installations industrielles, par une chute de la puissance et du rendement de la turbine ou des bruits anormaux dans le tuyau d'aspiration. Mais il importe de déterminer les cavitations locales, préjudiciables à la durée de la roue, qui ne peuvent être décelées que par l'observation directe.

A cet effet, la roue, tournant dans un cylindre de verre, est éclairée à chaque tour pendant un millionième de seconde environ au moyen d'une lampe au néon à grande intensité lumineuse. Elle est donc visuellement immobilisée et les traces de cavitation même les plus légères peuvent être observées tant sur le moyeu que sur les aubes elles-mêmes. La cavitation périphérique due au jeu entre les parties fixe et mobile, la cavitation produite à la sortie de la roue par une dépression exagérée ou une forme défectueuse ainsi que la cavitation provoquée par une mauvaise direction d'entrée de l'eau dans la roue sont nettement visibles.

Il est ainsi possible de contrôler la rigueur des méthodes théoriques utilisées, d'en rechercher le perfectionnement comme aussi d'ausculter complètement un aubage donné pour voir dans quelle mesure il s'adapte aux conditions particulières de l'installation à laquelle il est destiné.

Ajoutons que ce groupe se prête à l'étude du rendement des pompes et turbines rapides par le relevé de toutes les courbes de fonctionnement de ces machines et qu'il complètera fort heureusement le matériel de recherches et d'enseignement de l'Ecole.