

Essais sur modèles réduits d'ouvrages en béton armé

Autor(en): **Villard, A.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **79 (1953)**

Heft 11-12

PDF erstellt am: **25.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-59784>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

intérieur de deux vecteurs de l'espace est proportionnel au moment relatif de l'antiprojection de l'un et de l'image de l'autre, définit la notion de « champ d'influence » (Einflussplan) et donne une méthode générale pour le calcul des déplacements des nœuds d'un système articulé gauche.

Citons ensuite toute une série d'articles de PRAGER, FEDERHOFER, BEYER, KRUPPA, SOTOFF, SAUER, DIETZ dans la *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik*, de 1924 à 1950, ainsi que l'ouvrage de K. FEDERHOFER : *Graphische Kinematik und Kinetostatik des starren räumlichen Systems* (Springer, Wien, 1928) où l'auteur applique la représentation mayorienne à l'étude de la cinématique dans l'espace, de corps rigides.

Cette représentation figure également dans les dernières éditions (1939 et 1946) du traité de SCHLINK : *Technische Statik* (Springer, Berlin).

Enfin dans son article *Die Lösung des Sechsstabanschlusses mit der Methode der dualen Abbildung* (Ingénieur-Archiv, XVI, 1947-1948, p. 14 à 38), H. DIETZ applique la représentation de Mayor au calcul des réactions d'appui d'un corps rigide de l'espace.

Trop d'ingénieurs ignorent encore la méthode de Mayor. C'est ainsi que dans une étude, d'ailleurs fort intéressante (*Three-dimensional displacement diagrams for space frame structures*. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 13 juin 1950), W. W. EWELL s'efforce d'étendre à l'espace, en utilisant les deux projections orthogonales d'un système gauche, la méthode graphique de Williot, alors que Mayor a montré vingt-quatre ans plus tôt que cette extension est très simplifiée par son mode de représentation.

Tous les auteurs mentionnés ci-dessus n'utilisent que la représentation mayorienne des vecteurs et des éléments purement géométriques (droites, plans, points). Nous n'avons pas rencontré dans la littérature (à l'exception de la thèse de H. C. YUNG) une seule application de la notion, si féconde, d'antiprojection d'un système articulé de l'espace. Et pourtant, cette notion, qui permet de concrétiser dans le plan les efforts et les déformations des systèmes gauches, est d'une importance primordiale pour l'ingénieur appelé à calculer de tels systèmes.

ESSAIS SUR MODÈLES RÉDUITS D'OUVRAGES EN BÉTON ARMÉ

par A. VILLARD, ingénieur E. P. U. L., à Lausanne

Autrefois, les routes et les chemins de fer enjambaient les rivières par des ponts que l'on essayait de construire normaux aux cours d'eau, ceci afin de les raccourcir et de simplifier leur exécution.

On cherchait d'autre part à réaliser les ouvrages du génie civil de façon symétrique afin de mieux saisir leur comportement dans le calcul et dans la construction proprement dite.

Nombreux sont les exemples de constructions de tous les types conçus selon ces principes, dans notre Europe et dans le Nouveau-Monde.

Le développement rapide de la technique d'une manière générale, celui des chemins de fer et de l'automobile en particulier, ainsi que l'adaptation de moyens

toujours plus perfectionnés à nos nécessités modernes, conduisent de plus en plus le constructeur et l'architecte à s'affranchir de toute routine et à donner aux ouvrages de la construction civile et de l'architecture des formes quasi quelconques.

L'apparition du béton armé et du béton précontraint a apporté aux constructeurs des possibilités nouvelles pratiquement illimitées dans l'exécution des formes, ce qui implique comme conséquence des choses insaisissables, voire insolubles, dans le domaine du calcul.

De nombreux ouvrages biais, en particulier des ponts-routes et ponts de chemin de fer ont été réalisés pendant ces dernières décades au moyen de poutrelles métalliques enrobées de béton afin que leur calcul se

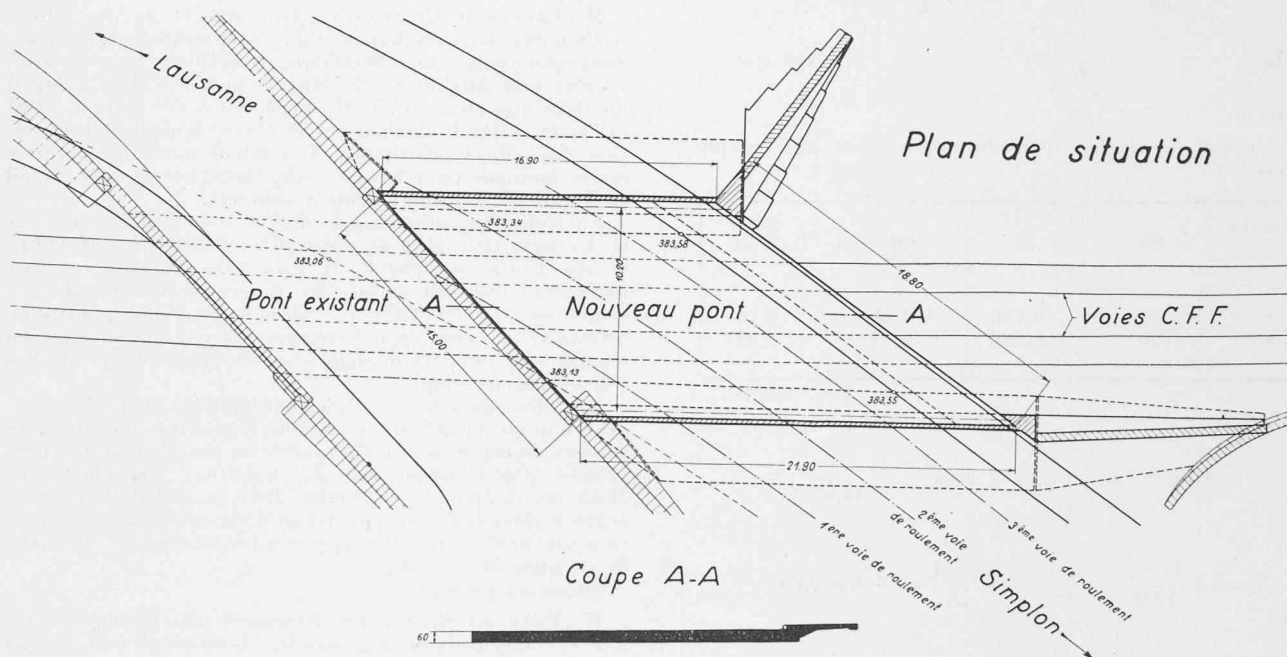


Fig. 1. — P. S. de Villeneuve. Plan général.

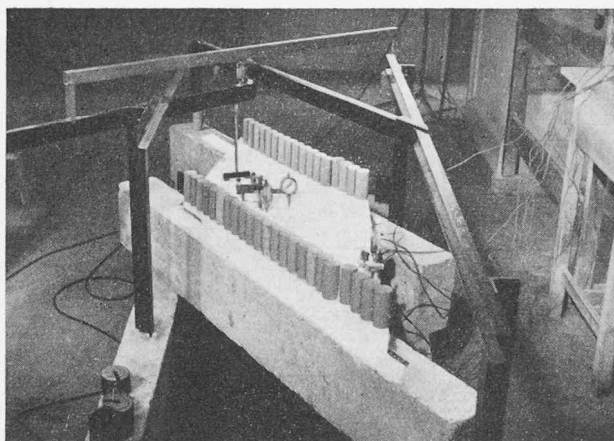


Fig. 2. — P. S. de Villeneuve. Modèle réduit.

réduise à celui de poutres droites, dont la portée se trouve ainsi automatiquement exagérée, et dont le tonnage d'acier va jusqu'à 800 kg par m³ de béton, chiffre que nul constructeur n'oserait se permettre d'atteindre aujourd'hui. Notons que dans une construction simple et de faible portée, on peut arriver au dixième de ce chiffre, et aller jusqu'à 100 à 150 kg d'acier par m³ de béton pour des constructions en béton armé chargées relativement lourdement. Ces valeurs concernent l'acier et le béton normal, et sont fonction des portées.

Les essais de charge sur modèles réduits, dont l'application des méthodes a été diffusée largement en Amérique, sont employés de plus en plus dans les laboratoires des écoles techniques européennes. Ils viennent suppléer aux lacunes des indéterminations ou des impossibilités de calcul pour certains ouvrages qu'aucune fonction mathématique ne permet d'analyser. (Il y a lieu de remarquer que le champ d'application des essais statiques sur modèles réduits n'est pas limité aux ouvrages à dissymétries extraordinaires.) Les résultats quantitatifs et qualitatifs qu'ils donnent permettent de « saisir » ce qui peut échapper même au calcul le plus subtil. Ils sont aussi dans certains cas un complément précieux de vérification d'hypothèses de calcul, ou de comparaison de mesures entre le modèle réduit et l'ouvrage lui-même après sa construction.

Les marges qui doivent souvent être prises à la suite d'un calcul en raison de dissymétries, de biais, de courbures, etc., peuvent être sensiblement réduites dans certains cas par des essais sur modèle ; la suppression

Moments dus au poids propre $g = 1,75 \text{ t/m}^2$
en mt/m .

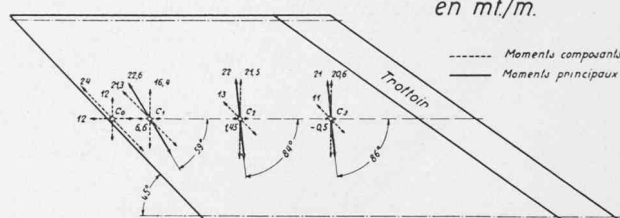


Fig. 3. — P. S. de Villeneuve. Moments dus au poids propre.

de ces marges conduit souvent à des économies appréciables. C'est le cas notamment des ponts biais dont il a été question ci-dessus.

Nous avons été chargé d'une part par le Service des routes du Département des travaux publics, d'autre part par la Direction des travaux de la Ville de Lausanne, de l'étude d'ouvrages particulièrement biais et dissymétriques, pour lesquels la hauteur de construction était très réduite ; nous avons été conduit pour l'étude de certaines de leurs parties, à recourir aux services du laboratoire de statique de l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne pour l'exécution d'essais sur modèle réduit.

Nous vouerons donc la suite de cet article à quelques remarques concernant trois de ces constructions, soit :

- le pont de Villeneuve (passage sur les C. F. F., fig. 1 à 13) ;
- le pont d'Aigle sur la Grande-Eau (fig. 14 à 16) ;
- la coupole de l'Aula de l'Ecole supérieure de jeunes filles (fig. 17 et 18).

I. Pont de Villeneuve

Cet ouvrage faisait partie de l'ensemble du projet de réfection de la route cantonale n° 780 (route du Simplon) comme le pont de Territet, l'élargissement de Saint-Saphorin et la déviation du village de Cully, qui sera entreprise prochainement. Sa construction a été achevée dans le courant de l'année 1952.

Le tracé de la nouvelle route (de 9,0 m de largeur) demandait les modifications suivantes :

1. Un élargissement côté Lausanne, avec renforcement des murs existants et plongeant dans les talus C. F. F. Cet élargissement a été réalisé en béton armé par un tablier complémentaire reposant d'une part,

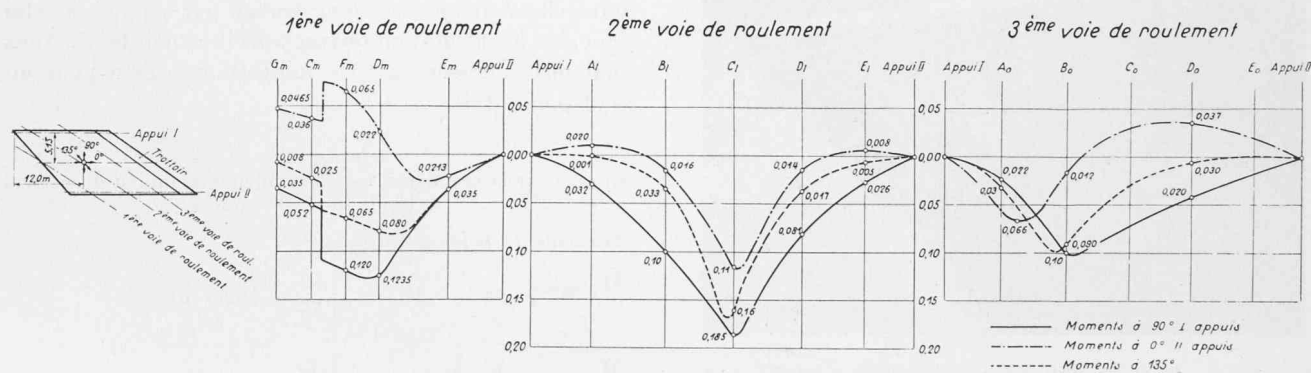


Fig. 4. — P. S. de Villeneuve. Lignes d'influence des moments fléchissants au point C2.

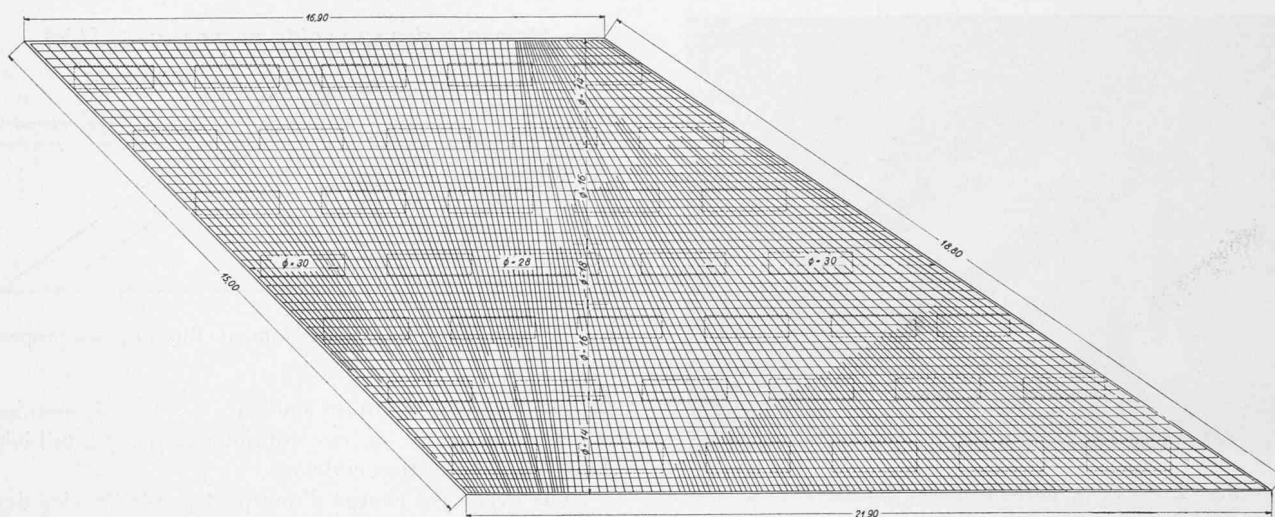


Fig. 9. — P. S. de Villeneuve. Armature de la dalle du pont.

sur le mur actuel consolidé par des contreforts en béton armé, d'autre part sur une poutre courbe s'appuyant sur les contreforts décrits ci-dessus ; le trottoir courbe est en porte-à-faux sur cette poutre.

2. Un élargissement côté Villeneuve.

Ce dernier a été réalisé par une dalle d'épaisseur constante (60 cm) reposant sur des culées massives hautes de 11,50 m (fondation comprise) et formant un quadrilatère complètement irrégulier dont les côtés ont les dimensions suivantes : 15,00 m, 16,90 m, 18,80 m et 21,90 m ; un trottoir en porte-à-faux d'épaisseur réduite termine cet ouvrage du côté Villeneuve.

3. Démolition et reconstruction du ponceau sur la Tinière, avec réfection et reconstruction des culées.

Ce ponceau, qui devait laisser le tirant d'air maximum possible, tout en permettant le logement des nombreuses conduites (eau, gaz, électricité, téléphone), sans dépasser l'arrasée inférieure de la construction, a été constitué par une dalle d'épaisseur constante de

35 cm pour la partie chaussée avec deux trottoirs en porte-à-faux sur cette dalle à l'aval et à l'amont (ce dernier est courbe).

Le plan général (fig. 1) donne l'ensemble de la disposition décrite, particulièrement pour la dalle indiquée sous 2, qui a fait l'objet d'essais de laboratoire et à laquelle nous revenons ici.

Les charges et surcharges introduites dans les calculs sont celles du projet de normes 1951 ; il en est de même pour les contraintes. Le béton est du béton de qualité. Le modèle a été réalisé en béton de pierre ponce à l'échelle du 1 : 20 (fig. 2). Nous reproduisons les valeurs des moments mesurées par le laboratoire soit : à la figure 3, pour le poids propre, et à la figure 4, les lignes d'influence des moments fléchissants en un point (C2) pour les trois directions 0°, 90° et 135°, et pour les trois voies de roulement où la circulation est possible simultanément.

Les moments totaux pour les trois directions 0°, 90° et 135° s'obtiennent par superposition de ceux du poids propre, de ceux dus aux surcharges réparties sur la chaussée et le trottoir, et de ceux dus aux surcharges roulantes, compte tenu des coefficients dynamiques afférents. Les moments fléchissants dus aux surcharges roulantes comme ceux dus aux surcharges réparties s'obtiennent en faisant agir ces surcharges respectives sur les lignes d'influence correspondantes pour les trois voies de roulement et pour les trois directions 0°, 90° et 135°, et ceci pour chaque point, ce qui représente naturellement un assez long travail par rapport à celui qu'exige le calcul d'un ouvrage droit et non biais. Nous donnons ci-dessous à titre indicatif ce calcul pour un seul point (C2).

Point C2

Charge sur la deuxième voie de roulement, milieu du convoi à 10,30 m de l'appui I

Moments du poids propre

$$M_{90^\circ \text{ p. pr.}} = 21,5 \times \frac{1,50}{1,75} = 18,50 \text{ mt}$$

$$M_{0^\circ \text{ p. pr.}} = 1,45 \times \frac{1,50}{1,75} = 1,25 \text{ mt}$$

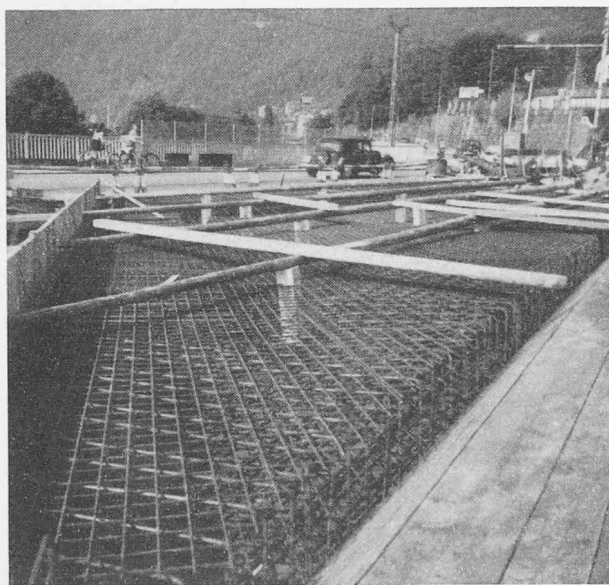


Fig. 10. — P. S. de Villeneuve. Armature partielle de la dalle du pont.

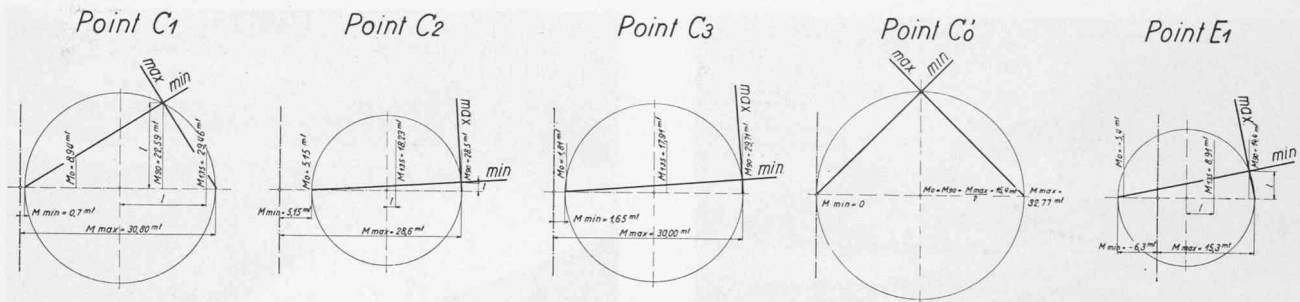


Fig. 5. — P. S. de Villeneuve. Cercles de Mohr pour quelques points.

$$M_{135^\circ \text{ p. pr.}} = 13,0 \times \frac{1,50}{1,75} = 11,20 \text{ mt.}$$

Moments dus au convoi

$$M_{90^\circ \text{ P}} = 6,62 \times 1,3 = 8,60 \text{ mt}$$

$$M_{0^\circ \text{ P}} = 3,08 \times 1,3 = 4,00 \text{ mt}$$

$$M_{135^\circ \text{ P}} = 4,67 \times 1,3 = 6,05 \text{ mt.}$$

Moments dus à la surcharge répartie

$$M_{90^\circ 1/1.5} = 39,0 \times 0,02 \times 0,5 = 0,39 \text{ mt}$$

$$M_{0^\circ 1/1.5} = 10,0 \times 0,02 \times 0,5 = -0,10 \text{ mt}$$

$$M_{135^\circ 1/1.5} = 26,0 \times 0,02 \times 0,5 = 0,26 \text{ mt}$$

$$M_{90^\circ 3/2.5} = 42,0 \times 0,02 \times 0,82 = 0,68 \text{ mt}$$

$$M_{0^\circ 3/2.5} = 0$$

$$M_{135^\circ 3/2.5} = 27,5 \times 0,02 \times 0,82 = 0,45 \text{ mt}$$

$$M_{90^\circ \text{ trot.}} = 42,0 \times 0,02 \times 0,5 = 0,42 \text{ mt}$$

$$M_{0^\circ \text{ trot.}} = 0$$

$$M_{135^\circ \text{ trot.}} = 27,5 \times 0,02 \times 0,5 = 0,27$$

Moments totaux

$$M_{90^\circ} = 18,5 + 8,60 + 0,39 + 0,68 + 0,42 = 28,59 \text{ mt}$$

$$M_{0^\circ} = 1,25 + 4,00 - 0,10 + 0,0 + 0,0 = 5,15 \text{ mt}$$

$$M_{135^\circ} = 11,20 + 6,05 + 0,26 + 0,45 + 0,27 = 18,23 \text{ mt}$$

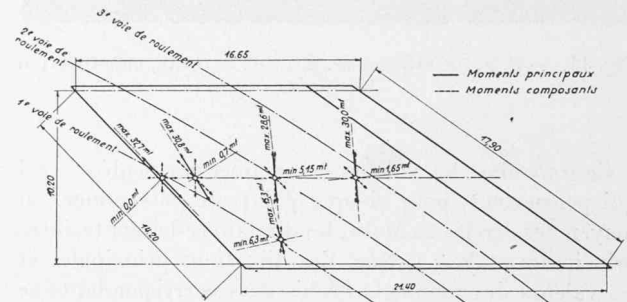


Fig. 6. — P. S. de Villeneuve. Moments principaux et directions principales pour quelques points.

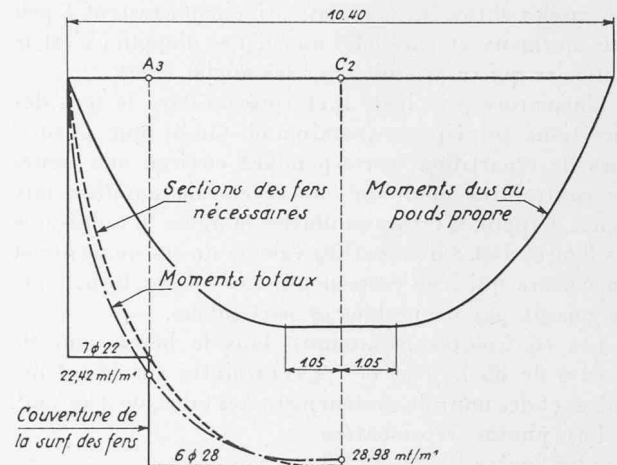


Fig. 7. — P. S. de Villeneuve. Moments fléchissants et armature dans la section de bordure de l'ancien pont.

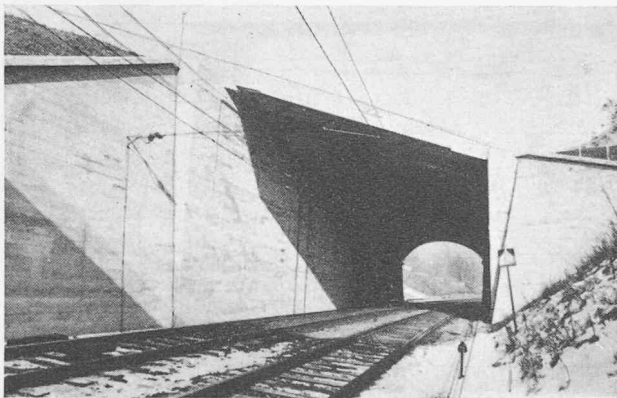


Fig. 13. — P. S. de Villeneuve. L'ouvrage principal côté Simplon.

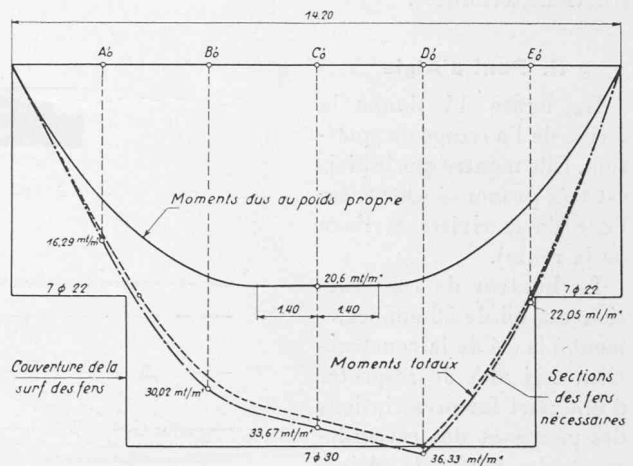


Fig. 8. — P. S. de Villeneuve. Moments fléchissants et armature dans la section médiane.

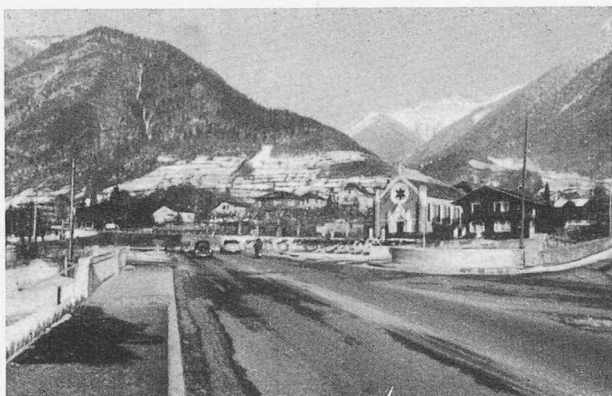


Fig. 11. — P. S. de Villeneuve. Etat de la route, construction terminée.



Fig. 12. — P. S. de Villeneuve. Elargissement et renforcement côté Lausanne.

Ce sont alors les valeurs des moments calculées ainsi qui permettent, pour chaque point, de déterminer, au moyen des cercles de Mohr, les directions des contraintes principales et leur valeur. Ces directions principales et les valeurs des moments fléchissants correspondants se trouvent indiquées pour quelques points (C1, C2, C3, C0' et E₁) dans les figures 5 et 6.

La lecture de la figure 6 montre que, dans la région des angles obtus, les moments principaux restent à peu près normaux et parallèles aux lignes d'appui; c'est le contraire qui se produit dans les angles aigus.

L'armature principale a été prévue dans le sens des directions principales (maximum) tandis que l'armature de répartition, correspondant environ aux lignes de contraintes minimum, a été choisie parallèle aux lignes d'appui. C'est ce qu'illustre la figure 9, tandis que les figures 7 et 8 donnent les valeurs de ces moments et l'armature qui leur correspond. Les efforts tranchants ne posent pas de problèmes particuliers.

Les contraintes maximums dans le béton sont de l'ordre de 80 kg/cm² et les contraintes sur le sol des culées et des murs de soutènement des talus, de 3 kg/cm².

Les photos représentées par les figures 10, 11, 12, 13 illustrent la disposition des armatures de la dalle et différents aspects des constructions terminées.

II. Pont d'Aigle

La figure 14 donne la forme de l'ouvrage en question. Elle montre que le biais est très prononcé (30° entre l'axe de la rivière et l'axe de la route).

La hauteur de construction est ici de 50 cm seulement à la clé de la construction, ceci afin de respecter d'une part les prescriptions des pentes et des raccordements des routes de plaine, et de laisser, d'autre part, le tirant d'air le plus grand

possible, condition qui s'est révélée d'une grande importance après les crues de ces dernières années qui mettaient sans cesse en danger le pont métallique actuel.

Nous avons donc prévu, pour réaliser cette faible hauteur de construction, une dalle de hauteur variable, en réglant les conditions de charge à la clé par des contrepoids s'appuyant sur les culées par l'intermédiaire d'articulations et de piliers-pendules. La variation de la courbure inférieure de la dalle est représentée par une surface cylindrique dont l'axe est parallèle à la rivière; l'intersection de ce cylindre sur les parements du pont est ainsi une ellipse très surbaissée. Le béton



Fig. 15. — Pont d'Aigle. Modèle réduit; le rectangle noir correspond à la grandeur d'une automobile normale.

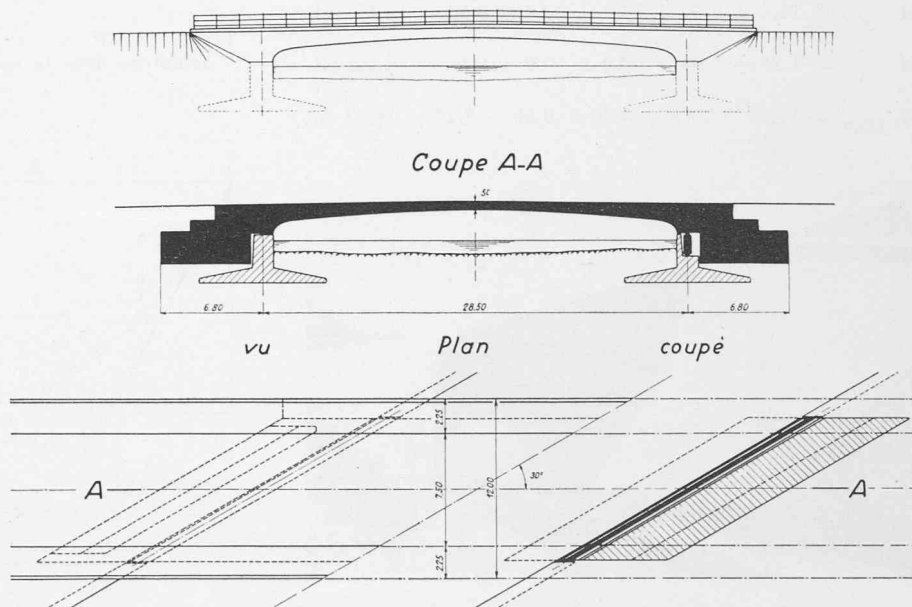


Fig. 14. — Pont d'Aigle. Plan général.

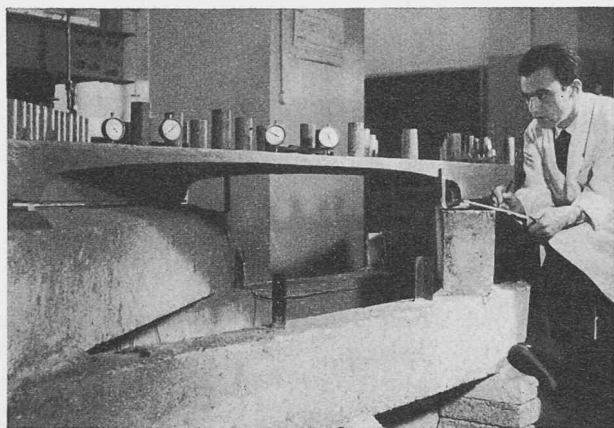


Fig. 16. — Pont d'Aigle. Modèle réduit chargé.

de la table de roulement est recouvert d'un tapis de 35 mm.

Le processus de détermination des directions et des contraintes principales est semblable à celui exposé complètement pour le pont de Villeneuve. Nous renonçons à le reproduire ici, faute de place, et nous contentons de donner deux photos montrant l'aspect du pont (modèle réduit, fig. 15) où la grandeur du rectangle dessiné en noir correspond à peu près à celle d'une automobile moyenne, et le pont chargé des éléments représentatifs du poids propre (fig. 16).

Le modèle a été réalisé en béton de pierre ponce à l'échelle du 1 : 16,5.

III. Coupole de l'Aula de l'Ecole supérieure de jeunes filles, à Lausanne

La figure 17 montre la forme de la coupole, que l'architecte a prévue conforme à son plan d'Aula, ce qui lui donne une forme symétrique par rapport à son axe longitudinal, mais une forme qui est loin de celles des coques de révolution circulaires ou elliptiques.

Les essais ont montré ici essentiellement que les tractions de l'anneau de ceinture se répercutent dans la coupole elle-même bien au-delà de ce qui se produit dans une coupole de révolution. En dehors de cette zone particulièrement sollicitée, les flexions y suivent un cours que l'on peut dire normal, aux directions principales près, surtout dans la région des angles.

Nous nous bornons ici aussi à reproduire la photo du modèle, les essais venant d'être terminés. Le modèle a été réalisé en celluloïd, à l'échelle du 1 : 25 (voir fig. 18).

* * *

Les remarques faites au sujet de ces trois ouvrages montrent que le calcul ne saurait conduire à des résultats assez voisins de la réalité pour certaines de leurs parties, étant donné l'ordre de grandeur des dissymétries ou des biais qui les caractérisent.

L'examen sur modèle réduit, du comportement d'ouvrages semblables sous l'effet des charges auxquelles ils

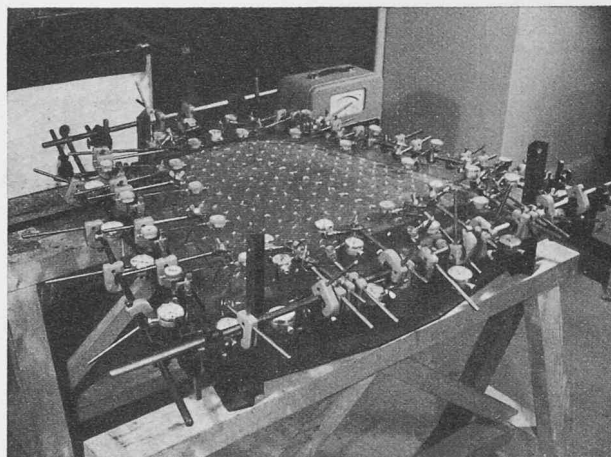


Fig. 18. — Aula de l'Ecole supérieure de jeunes filles. Modèle réduit chargé.

sont sollicités, est particulièrement recommandé; il conduit généralement à de sensibles économies, en permettant l'adaptation de leur structure aux efforts réels auxquels elle doit répondre.

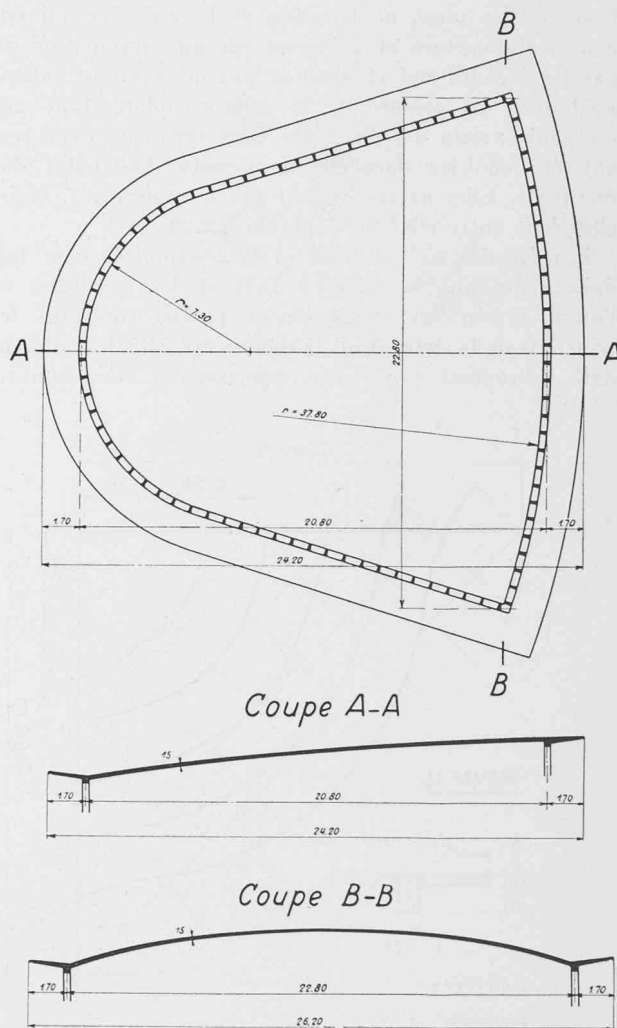


Fig. 17. — Aula de l'Ecole supérieure de jeunes filles. Plan général.