

Zeitschrift:	Bulletin technique de la Suisse romande
Band:	54 (1928)
Heft:	13
Artikel:	Examen des résultats de l'épreuve du Réservoir de douze mille mètres cubes au Calvaire sur Lausanne: essai de charge par remplissage unilatéral
Autor:	Paris, A.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-41877

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: 26.01.2026

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

observer qu'il en résulterait, à certains moments, une gêne considérable pour le trafic des remorqueurs pendant la durée de la construction prévue comme pouvant atteindre sept mois. Après une discussion approfondie de cette question, la sous-commission a été unanime à se rallier à une proposition transactionnelle de la Délégation allemande, consistant à augmenter le tirant d'air provisoire de 0 m. 50 sur une largeur de 30 m. au moins. Ce relèvement a été jugé suffisant, l'empêchement se trouvant réduit de ce fait à une durée moyenne de neuf jours par an, alors que l'exigence d'un relèvement plus considérable eût pu, en raison de ses conséquences financières, compromettre l'exécution dans un avenir immédiat d'un travail destiné à faire disparaître une gêne considérable pour la navigation. La Délégation allemande a fait part de l'intention de son Gouvernement d'échafauder en même temps ce pont et celui de Maxau.

Le pont de Maxau se présente dans des conditions à peu près identiques à celles du pont de Spire. Toutefois la courbe du fleuve à l'endroit prévu pour la construction étant moins accentuée et la visibilité étant donc meilleure, la largeur libre de l'échafaudage a pu être réduite à 65 m.

4. Pont de chemin de fer entre Mannheim et Ludwigshafen : Ce pont projeté dans le voisinage immédiat du pont actuel, devenu insuffisant pour assurer à la fois le trafic routier et ferroviaire, est prévu comme ayant des ouvertures de la même largeur intérieure que celles du pont actuel. Le tirant d'air doit être de 9 m. 10 pour une zone de 66 m. environ dans la travée centrale affectée spécialement à la grande navigation.

Quand aux dispositions à prendre pendant la construction, le projet prévoit que l'une des ouvertures restera toujours libre pour la navigation.

Les prescriptions spéciales que le Gouvernement allemand propose d'édicter pour la période des travaux sont identiques en substance, et prévoient, quant aux trois ponts de Spire, de Maxau et de Mannheim-Ludwigshafen, que, dans le cas où la visibilité pour la navigation se trouverait compromise par les échafaudages, des postes d'avertissement seront établis en amont et en aval des lieux de construction, et que, si le montage s'effectue au moyen d'échafaudages de nature à gêner la navigation, on tiendra prêts à un emplacement à préciser et situé en amont des lieux de construction, des vapeurs qui, à la traversée de la section où se pratiquent les travaux, remorqueront gratuitement les radeaux descendants, les bateaux naviguant à la dérive et les chalands détachés des convois.

La Commission adoptant les conclusions proposées par la sous-commission, a constaté que les trois projets ne soulevaient aucune objection au point de vue de la navigation et du flottage et que les dispositions définitives imposées aux entrepreneurs par le Gouvernement allemand étaient appropriées.

(A suivre.)

Examen des résultats de l'épreuve du Réservoir de douze mille mètres cubes au Calvaire sur Lausanne. Essai de charge par remplissage unilatéral,

par A. PARIS, ingénieur,
professeur à l'Université de Lausanne.

(Suite et fin.)¹

7. Surface élastique (Méthode de Ritz).

Le problème de la plaque peut être traité au point de vue des déformations générales comme à celui de l'équilibre des tensions intérieures. À la limite, quand on parviendrait à reproduire exactement en tous points l'état de nature conforme aux conditions posées, les deux

méthodes confondraient leurs résultats dans une égale fidélité ; mais nous travaillons par approximation et il n'est pas indifférent sur quelle condition porte l'effort.

La méthode de Ritz fournit une image approchée de la surface de déformation de la plaque, en entrecroisant les lignes élastiques de deux systèmes de fibres orthogonales. Ces lignes élastiques tiennent compte des conditions connues au contour, mais supposent une charge uniformément ou linéairement répartie de la fibre, en loi pareille à la charge même de la plaque. L'objection naturelle résulte des diagrammes de répartition que nous fournissent d'autres méthodes, celle de Castiglano par exemple : les lignes de charge effective des fibres sont fortement curvilignes sous une charge générale linéaire.

La méthode de Ritz établit l'équivalence du travail de déformation sur la base de charge présumée, et calcule alors les constantes du problème ; les légères divergences de courbure des lignes élastiques réagissent toutefois fortement sur la valeur des moments fléchissants, même abstraction faite de la variation de raideur locale, dont on peut tenir compte ultérieurement.

Le calcul analytique part de l'expression

$$\text{Flèche } z = C \cdot X \cdot Y$$

où le paramètre C exprime l'influence combinée des dimensions principales de la plaque, de sa raideur moyenne et de la charge répartie qu'elle supporte ; cette charge peut du reste être uniforme ou hydrostatique, son expression mathématique restant simple. Les polynomes X et Y , à variables indépendantes puisque le contour est censé rigide, expriment les lignes élastiques des fibres sous leur charge supposée linéaire. Les moments fléchissants en un point quelconque (x, y) ont dès lors pour expression

$$33) \begin{cases} M_x = -D \left(\frac{d^2z}{dx^2} + \frac{1}{m} \times \frac{d^2z}{dy^2} \right) = -C \cdot D \cdot \left(Y \cdot X'' + \frac{1}{m} \cdot X \cdot Y'' \right) \\ M_y = -D \left(\frac{d^2z}{dy^2} + \frac{1}{m} \times \frac{d^2z}{dx^2} \right) = -C \cdot D \cdot \left(X \cdot Y'' + \frac{1}{m} \cdot Y \cdot X'' \right) \end{cases}$$

Prenant comme base les conditions réelles d'appui et de charge de l'ouvrage, contour rigide supposé, le professeur Dr M. Paschoud a recherché ces expressions pour appuis libres en haut et encastrés sur les trois autres côtés. Le profil moyen de la plaque intervient dans le facteur de raideur

34) $D = E \cdot I \cdot m^2 : (m^2 - 1)$ c'est-à-dire $D = 1,01E \cdot I$ pour $m = 10$.

On pose de plus

$$C = p : D \cdot \gamma \cdot l^4$$

où p désigne la charge répartie moyenne.

La raideur moyenne peut s'évaluer à $3,77 \cdot 10^8$ ou $2,50 \cdot 10^8$ kg.cm² selon qu'on planimètre le diagramme de raideur ou son inverse. La seconde conception reflétant l'influence en dénominateur, c'est elle que nous avons adoptée, pour le calcul des lignes de moments du moins

$$E \cdot J_m = 2,50 \cdot 10 \text{ kg.cm}^2$$

¹ Voir *Bulletin technique* du 2 juin 1928, page 125.

Toutefois, mise à ce niveau, la surface élastique de Ritz semblerait exagérée.

Conservant le rapport des côtés

$$\lambda = h/l$$

et l'origine ($x = 0, y = 0$) au centre du panneau, nous faisons

$$x = \xi \cdot l/2 \quad y = \eta \cdot h/2.$$

Les ordonnées sont positives en montant, et le contour est à

$$\xi = \pm 1 \quad \eta = \pm 1$$

Cette notation donne aux équations déterminantes la forme suivante

a) Charge uniformément répartie p .

Paramètre

$$35) \quad \gamma = 2,4121\lambda^4 + 1,3062\lambda^2 + 1,1426$$

Polynômes

$$36) \quad \begin{cases} X = [\xi^4 - 2\xi^2 + 1] \times \frac{l^4}{16} = (X) \cdot l^4/16 \\ X'' = [3\xi^2 - 1]l^2 = (X'') \cdot l^2 \\ Y = [\eta^4 - \eta^3 - 3\eta^2 + \eta + 2] \times \frac{h^4}{16} = (Y) \cdot h^4/16 \\ Y'' = [6\eta^2 - 3\eta - 3] \times \frac{h^2}{2} = (Y'') \cdot h^2/2 \end{cases}$$

Le problème de la plaque uniformément chargée se résout dès lors comme suit :

$$\text{Flèche } z = p \cdot h^4 \cdot (X) \cdot (Y) : 256D \cdot \gamma$$

Moments horizontaux

$$M_x = -\frac{p\lambda^2}{32\gamma} \left[2h^2(Y) \cdot (X'') + \frac{l^2}{m}(X) \cdot (Y'') \right]$$

Moments verticaux

$$M_y = -\frac{p\lambda^2}{32\gamma} \left[l^2(X) \cdot (Y'') + \frac{2h^2}{m}(Y) \cdot (X'') \right].$$

Dans notre cas, pour

$$p = 0,3077 \text{ kg/cm}^2 \quad \lambda^2 = 2,7822 \quad \gamma = 23,4483$$

le facteur constant prend la valeur

$$p \cdot \lambda^2 : 32\gamma = 11,4092 \cdot 10^{-4} \text{ kg/cm.}$$

b) Charge hydrostatique de 0 à 2 p.

Paramètre

$$37) \quad \gamma = [5,8203\lambda^4 + 3,0469\lambda^2 + 2,8576] \cdot l$$

Polynômes

$$38) \quad \begin{cases} X = [\xi^4 - 2\xi^2 + 1] \times \frac{l^4}{16} = (X) \cdot l^4/16 \\ X'' = [3\xi^2 - 1] \cdot l^2 = (X'') \cdot l^2 \\ Y = [-\eta^5 + 5\eta^4 - 2\eta^3 - 14\eta^2 + 3\eta + 9] \times \frac{h^5}{32} = (Y) \cdot h^5/32 \\ Y'' = [-5\eta^3 + 15\eta^2 - 3\eta - 7] \times \frac{h^3}{2} = (Y'') \cdot h^3/2 \end{cases}$$

Les solutions résultent par

$$\text{Flèche } z = p \cdot h^4 \cdot (X) \cdot (Y) : 512D \cdot \gamma.$$

Moments horizontaux

$$M_x = -\frac{p \cdot \lambda^2}{32\gamma} \times \left[h^2(Y) \cdot (X'') + \frac{l^2}{m}(X) \cdot (Y'') \right]$$

Moments verticaux

$$M_y = -\frac{p \cdot \lambda^2}{32\gamma} \times \left[l^2 \cdot (X) \cdot (Y'') + \frac{h^2}{m} \cdot (Y) \cdot (X'') \right].$$

Les solutions numériques sont ici

$$\gamma = 56,3885 \times 387 \text{ cm} \\ p \cdot \lambda^2 : 32\gamma = 47,444 \text{ kg/cm} : 387 \text{ cm} \cdot 10^4$$

Les résultats de ces opérations sont représentés graphiquement aux fig. 41 et 42.

c) Moments proportionnés à la raideur locale. Le calcul analytique par la méthode de Ritz introduit l'influence de la raideur par sa moyenne ; c'est une simplification obligée, puisque la variation du moment d'inertie ne répond en général pas à une loi mathématique simple. Dans ces conditions, et même si la flèche médiane restait inchangée, les courbures subissent de fortes modifications, qui se répercutent sur les lignes de moments. Le rapport des moments fléchissants positifs et négatifs ressort profondément altéré, mais une rectification est possible par introduction après coup du facteur de raideur relative

$$\mu = I : I_m.$$

Multipliant en chaque point le moment (M) de Ritz par le rapport correspondant, nous obtenons les courbes rectifiées M des fig. 43 à 47

$$M = \mu(M) = (M) \cdot I : I_m$$

où $E \cdot I_m$ a été pris égal à $2,50 \cdot 10^8$.

La concordance devient alors bonne avec les courbes issues de mesure, particulièrement pour la charge hydrostatique et en moments verticaux. Les valeurs numériques obtenues sont en effet les suivantes

Moments	Calcul pour charge hydrostatique uniforme	Mesure	Majoration par charge hydrost.
Médian vertical	+0,85 cm.t + 0,885 cm.t (+0,88 cm.t) —	3%	
Appui inférieur	-4,70 » -4,08 » (-5,40 ») +13%		
Médian horizontal	+2,03 » +2,22 » (+1,32 ») +54%		
Appui mi-hauteur	-3,95 » -4,32 » (-2,70 ») +46%		

L'allure de la courbe verticale rectifiée est très bonne ; les courbes horizontales diffèrent par contre sensiblement de la forme des lignes relevées à l'essai. D'un autre côté, les marges d'erreur sont plus larges ici qu'avec le treillis Bosch, selon Castigliano.

L'influence des appuis élastiques est évidente et, seule, la complication a empêché d'en tenir compte dans le calcul initial. Il en est de même d'une répartition curviligne des charges pour les lignes élastiques des polynômes X et Y .

IV. Conclusions.

Les documents d'essai, recueillis au Réservoir du Calvaire, permettent une comparaison et un contrôle de certaines données théoriques concernant les plaques,

Surface élastique d'essai et de calcul.

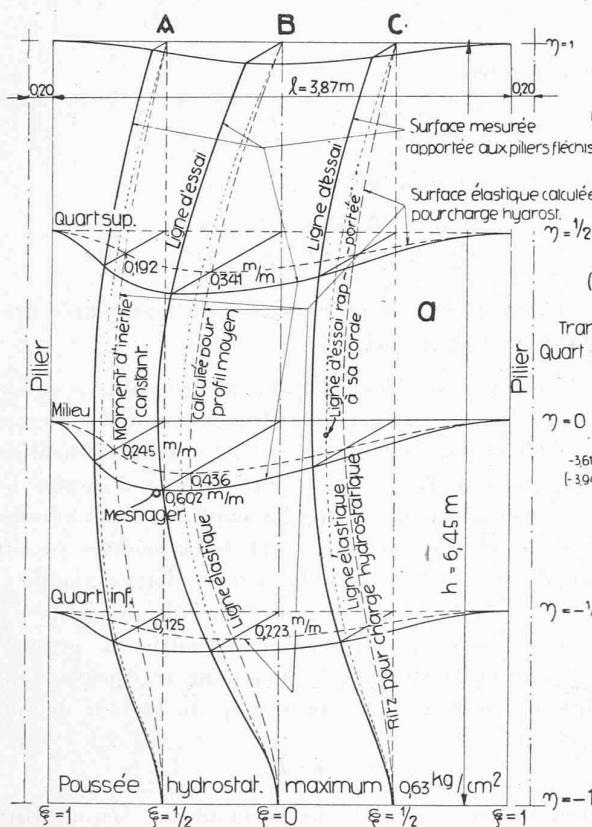


Fig. 41.

Calcul par la surface élastique de Ritz.

leurs encastrements et les phénomènes inhérents de la torsion. Les résultats ne sont valables que dans la mesure où l'élasticité linéaire des appuis n'y introduit pas des facteurs négligés ici, parce que sortant des limites de notre programme ; les surfaces cotées de déformation en conservent du reste la trace.

Le rapport d'essai ne touche que les résultats obtenus sur le panneau normal ; toutefois, ceux du grand panneau nord ont été traités de la même façon et poussés aussi loin dans le domaine de la flexion ; mais la comparaison faite avec les méthodes habituelles de calcul n'y a pas donné des résultats aussi concluants, à cause du manque général de symétrie ; le sommet de la surface topographique s'étant déplacé dans la direction du seul pilier élastique, la portée vraie de la dalle en a été rendue incertaine.

Les résultats obtenus sont de trois ordres : opératoires, théoriques et constructifs.

L'auscultation très soignée, à laquelle la commission du Groupe du béton S.I.A. s'est livrée sous la direction de M. Fr. Hübner ingénieur, a porté ses fruits grâce au nombre, à la précision et à la disposition des appareils de mesure, fleximètres et clinomètres. Elle a permis de conclure aux tensions intérieures effectives par la voie indirecte, puisque l'étude par l'extensomètre était ici difficilement praticable, et n'aurait du reste pu que

Moments fléchissants bruts pour charge hydro ~ statique ou uniforme

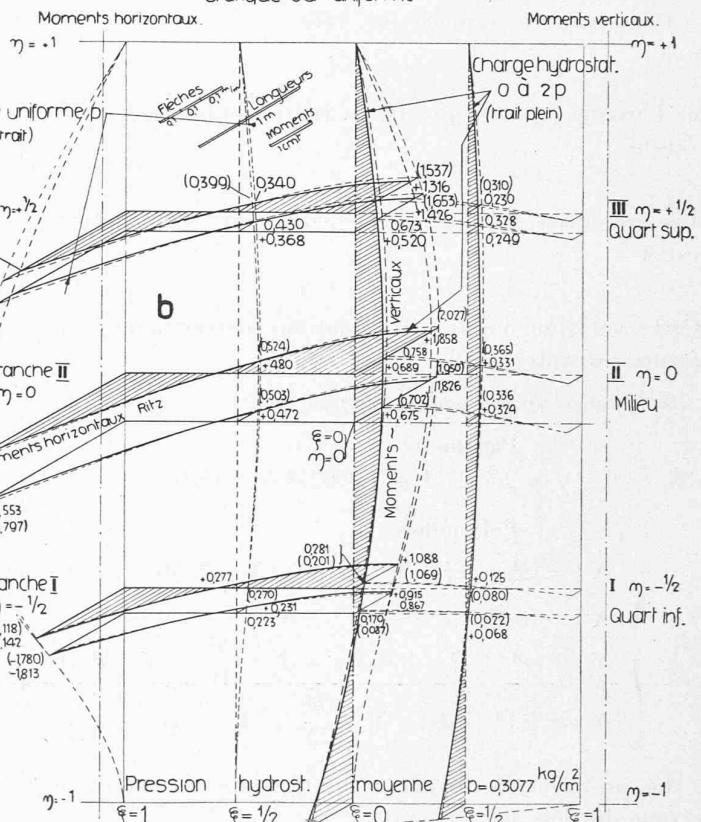


Fig. 42.

compléter les mesures faites, les contrôler et non les remplacer.

Le résultat théorique de cette étude intéresse la flexion et la torsion, c'est-à-dire la flexion gauche de la plaque, appuyée sur tout son contour. Il confirme les prévisions du risque qu'il y a à fonder le calcul des tensions de la plaque sur celui d'une simple approximation de sa surface élastique ; l'influence de la courbure locale étant prépondérante, il est moins important à ce point de vue d'obtenir la concordance approximative, mais inégale, des flèches que d'avoir une image relativement exacte de l'équilibre intérieur aux divers points ; ce sont les rayons de courbure qui importent au calcul des dimensions intérieures.

Une particularité intéressante de la plaque, c'est sa tendance à reporter les charges sur les fibres raidies par le voisinage des appuis. Le calcul de construction doit tenir compte de ce fait, qu'ignorent les diagrammes linéaires simplistes des prescriptions officielles ; les diagrammes effectifs soulagent automatiquement les régions qui fléchiraient de manière exagérée. Il n'est pas besoin pour ceci d'armatures diagonales, en période élastique du moins. Il en résulte une sérieuse économie dans les surfaces de moments fléchissants. A mesure que la méthode de calcul serre de plus près les conditions réelles de la construction, on voit les lignes de moments

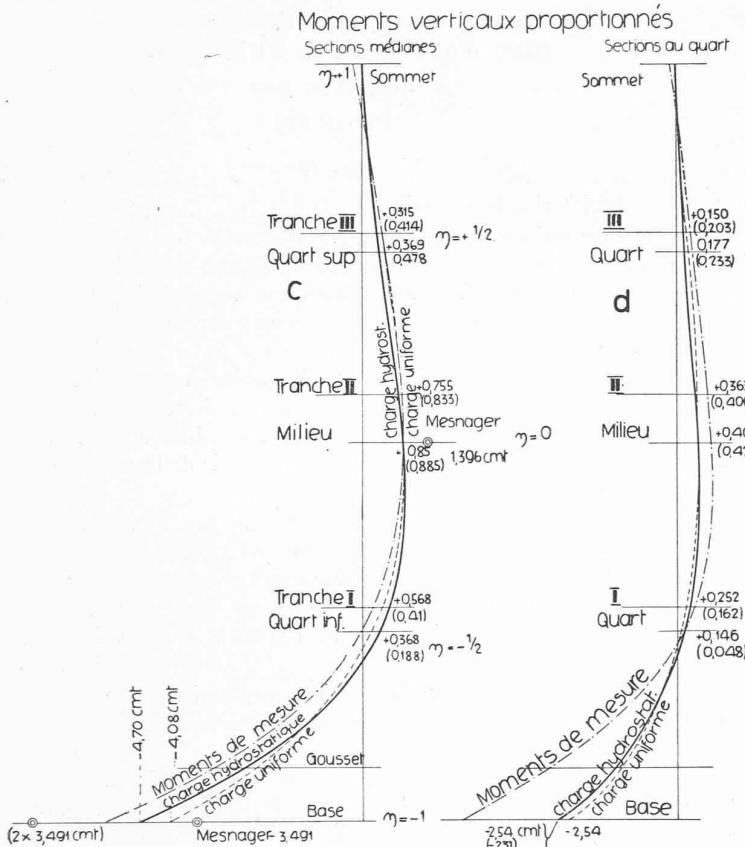


Fig. 43.

Fig. 44.

Calcul par la méthode de Ritz.

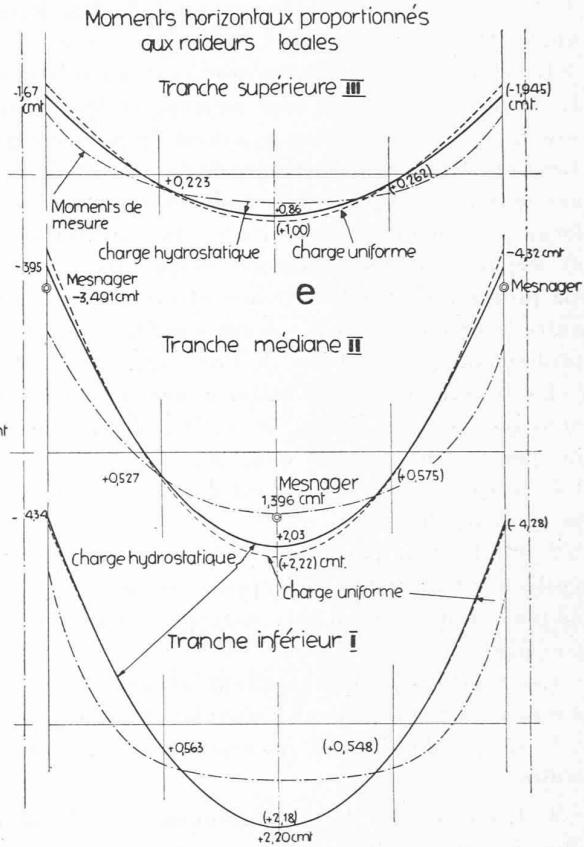


Fig. 45 à 47.

se rapprocher de l'allure des lignes issues de mesure ; l'analogie de forme est frappante pour les lignes verticales médiennes surtout ; ceci particulièrement avec la méthode Ritz de la surface élastique, sous réserve de rectification des moments par le coefficient de raideur locale. Par contre, et d'une manière générale, les valeurs d'efforts obtenues comme limites concordent mieux par le théorème du travail virtuel.

La forme des lignes horizontales de moments est empreinte de l'influence du fléchissement des piliers. La surface topographique montrait déjà que la déformabilité des appuis verticaux dépassait le tiers de celle de la plaque elle-même ; il en est résulté que le soulagement apporté à la paroi s'est peu fait sentir au centre du panneau normal, et que la ligne de moments y tend vers la droite par sa faible courbure. Le grand panneau nord, de 6,20 m de large sur autant de haut, presque carré donc mais inserré rigidement dans la voûte retombante, n'a pas donné une flèche maximum sensiblement supérieure (1,02 mm contre 0,98 mm) ; ses lignes de moments conservent dès lors la courbure parabolique régulière des lignes théoriques.

La valeur absolue des encastrements, et *a fortiori* des moments positifs, est bien couverte par l'emploi de l'Ordonnance fédérale ; avec

excès même dans les régions bordures. Des méthodes de calcul plus fouillées assureront donc autant de sécurité à la première fissuration, et à moins de frais. Il arrivera même que, d'une manière générale, le degré de sécurité aux fissurations gagnera à l'application de méthodes de calcul relativement exactes.

Celles-ci ne reculent pas devant l'extension de la notion de plaque élastique au delà de la limite $\lambda = 1,5$ du rapport des côtés. Le rapport d'essai de 1915¹, de MM. Bach et Graf, le montre par l'épreuve de plaques atteignant en longueur le double de leur largeur. Notre fig. 48 en relève le diagramme résumé.

Les résultats pratiques confirment l'évidence que la qualité des matériaux, du béton en particulier, et celle

¹ Deutscher Ausschuss, Heft 30.

Influence du rapport des côtés sur la résistance des dalles

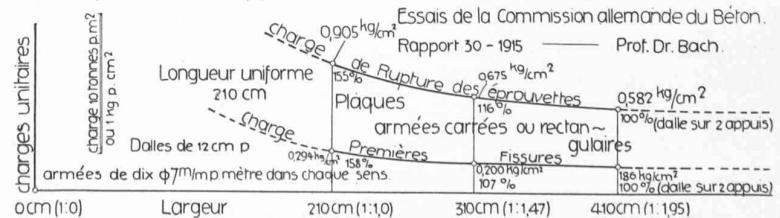


Fig. 48. — Essais du professeur Bach.

du travail sont d'importance primordiale dans la réussite finale de la construction.

La compacité du conglomérat joue un rôle essentiel. Le sable et le gravier, leur mélange et leur mouillage, sont aussi importants que le ciment de première qualité. Les imperfections de mélange, de damage et de raccords accentuent les courbures, trahissant une diminution locale du module d'élasticité et du moment d'inertie, et augmentent les moments fléchissants aux abords. La propreté du fond de fouille et l'intimité du contact entre le béton sain et le sol dur conditionnent de même profondément la stabilité de l'ouvrage.

La région tendue du béton a une action essentielle dans les résultats d'essai, et suffit souvent à expliquer de grosses divergences dans les lignes de moments. La sécurité à la fissuration est donc de première importance pour l'ouvrage.

Enfin, la vraie portée des organes flexibles correspond visiblement au vide entre appuis, et ceci d'autant plus nettement que ces appuis sont plus rigides et mieux travaillés.

Les *conclusions*, qui résultent de cette double série d'essais, s'expriment par les postulats que nous exposons à la séance du Congrès international de Zurich, c'est-à-dire

1. Les méthodes de calcul donnent une idée d'autant plus exacte des tensions intérieures probables de la construction homogène intacte, qu'elles serrent de plus près l'expression scientifique de l'élasticité.

2. L'analyse se refusant à tenir compte, dans les équations de base de certaines méthodes, de tous les facteurs variables de résistance, le calcul pratique peut se faire par degrés, les rectifications ultérieures pouvant plus aisément introduire certaines conditions locales de rai- deur et d'encastrement.

3. Les qualités de pose et d'étrésillonnage des fers, du bétonnage et des appuis sont à la base de la conformité entre calculs et réalisation de l'ouvrage. La zone tendue du béton joue en particulier un rôle essentiel dans la résistance et dans la distribution des surfaces de moments fléchissants.

4. Les encastrements peuvent se calculer par les méthodes statiques du Dr W. Ritter aussi bien à la torsion qu'à la flexion.

5. L'action de plaque se vérifie au delà du rapport 3/2 quand la construction est suffisamment soignée et monolithique en elle-même et dans ses appuis.

6. La pose, le nombre, la distribution et la précision des appareils de mesure jouent un rôle prépondérant dans la valeur intrinsèque de l'auscultation. Le centième de millimètre et la seconde d'arc sont l'ordre de grandeur auquel on doit tenir dans les conditions actuelles de fabrication.

7. Il est souhaitable de rechercher les expressions réelles des moments d'inertie pour flexion et pour torsion, en travail parallèle de l'analyse, du laboratoire et du chantier.

Concours d'idées pour l'établissement du plan d'avenir de la Ville de Sion.

Rapport du Jury.

(Suite et fin).¹

«Majorie» (4^e prix).

Projet simple et clair.

Grandes communications: La proposition de deux grandes communications, l'une au nord et l'autre au sud, est exagérée. Le tracé de l'artère nord est économique et acceptable ; son point de départ à l'ouest est suffisamment indiqué.

Le prolongement de la grande artère au sud doit être supprimé dès l'étranglement entre la voie ferrée et les rochers de Valère ; d'autre part, l'importance donnée aux deux avenues sous le Seex est à réduire à partir de la transversale nord-sud (route de l'Hôpital).

Réseau secondaire: Les communications à l'intérieur de la ville sont bien tracées, tout en conservant les anciennes artères et en prévoyant les élargissements nécessaires.

Zones: La répartition des zones est bien comprise ; cependant, le quartier industriel au nord de la voie ferrée devrait être supprimé.

Bâtiments publics: Les écoles secondaires et primaires ne devraient pas être au delà de la grande voie de communication.

L'utilisation du jardin public pour des bâtiments administratifs et la création à grands frais d'un nouveau jardin public au nord de la route de Lausanne, n'a pas sa raison d'être.

La nouvelle église est bien située, ainsi que les casernes et l'hôpital, mais celui-ci occupe une surface trop étendue.

Les abattoirs sont à repousser un peu à l'ouest ; le stand est mal orienté.

Places et sports: L'emplacement du champ de foires et du marché couvert est bien choisi ; par contre, la place de stationnement est insuffisante et occupe un terrain trop coûteux.

Le projet pour le parc des sports est joli et la place d'aviation bien choisie, tandis que le cimetière est trop excentrique et son accès par la route cantonale est défectueux.

La patinoire est trop au soleil.

«Ménageons le passé» (5^e prix).

Plan général clairement indiqué.

Grandes communications: L'auteur propose que la route cantonale passe au sud de la ville ; cette solution présente l'inconvénient d'amener la grande circulation au nord de la gare, sur un point où elle deviendra intense dans la suite. Sous le rocher de Tourbillon, sa construction sera coûteuse et n'apportera aucun développement.

La grande communication nord-sud est bonne.

Réseau secondaire: L'accès du centre de la ville à la gare est amoindri du fait de la suppression d'une partie des rues existantes. Le lotissement au nord est bien étudié et l'utilisation de la pente des terrains de Condémines bien comprise ; par contre, le projet s'étend trop à l'ouest.

Zones: La répartition des zones n'est pas judicieuse ; il n'est pas donné assez d'importance à la zone 1 qui devrait être la continuation de la vieille ville au sud.

La zone des villas est trop étendue, ainsi que celle du quartier agricole. Le quartier industriel est à sa place, mais

¹ Voir *Bulletin technique* du 16 juin 1928, page 142.