Zeitschrift: IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH Kongressbericht

Band: 2 (1936)

Artikel: Méthode de calcul semi-expérimentale d'un ouvrage classique

Autor: Pascal, R.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-3078

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: 02.07.2025

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

V 2

Méthode de calcul semi-expérimentale d'un ouvrage classique.

Halb-experimentelle Berechnungsmethode eines grundlegenden Bauwerktypus.

Semi-Experimental Method of Designing a Typical Structure.

R. Pascal,
Ingénieur conseil, Paris.

Nous nous proposons de décrire une méthode de calcul semi-expérimentale que nous avons utilisée dans l'étude de deux ponts métalliques, l'un de 67 mètres de portée et l'autre de 82 mètres de portée. Ces deux ouvrages franchissent la Seine entre Neuilly et Courbevoie, ils ont 35 mètres de largeur et sont séparés par deux culées massives réunies entre elles grâce à une voûte en béton armé de 32 mètres d'ouverture. La largeur des tabliers est de 35 mètres, celle de la voûte centrale et des culées correspondantes est d'environ 70 mètres. L'ensemble est actuellement en construction à l'emplacement du célèbre pont construit par Perronet sous le règne de Louis XV.

La fig. 1 donne l'allure schématique de l'ensemble.

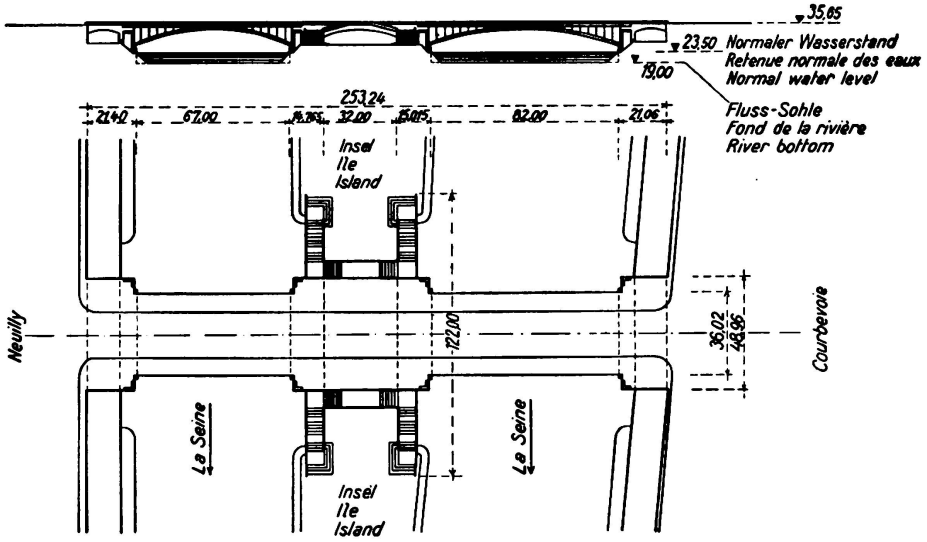

Fig. 1.

Les deux ouvrages métalliques sont du même type.

Chacun des arcs, qui sont au nombre de 12, est articulé à ses deux extrémités, et il est solidaire, des naissances jusqu'au quart à partir de la clef, d'un portique

formé par des longerons et des montants; les uns et les autres d'inertie beaucoup plus faible que celle de l'arc.

Transversalement les fermes ainsi constituées sont entretoisées en bas par des butons et en haut par des traverses; les uns et les autres constituant une poutre à arcades dont les montants sont également les montants des fermes.

Dans la partie centrale, c'est-à-dire au voisinage de la clef, les butons seuls subsistent.

La section des arcs, celle des montants et celle des butons sont des sections rectangulaires creuses convenablement raidies. Les sections des traverses et des longerons affectent une forme de double té.

L'ensemble est prévu en acier 54. Tous les assemblages en sont soudés.

Les appareils d'appui sont en acier coulé, le tablier est réalisé par des dalles en béton armé.

Cet ouvrage est construit par les entreprises Léon Ballot pour la maçonnerie et les fondations et par l'entreprise Baudet, Donon et Roussel pour la construction métallique.

Les travaux destinés au département de la Seine se trouvent sous la haute Direction de M. *Levaillant,* Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées et sous la Direction effective de M. *Louis Alexandre Levy,* Ingénieur des Ponts et Chaussées assisté de M. *Kienert,* Ingénieur T.P.E.

Mode de calcul utilisé.

L'ensemble de chaque ouvrage constitue un complexe grâce à l'association des fermes et des entretoises. Nous allons d'abord indiquer la marche suivie pour le calcul des fermes et ensuite celle que nous avons adoptée pour l'étude des entretoises.

1° — *Calcul des fermes.*

Les ouvrages à considérer sont d'un type très répandu en raison des exigences d'encombrement qui obligent à réaliser à la clef une hauteur très réduite; l'oeil est d'ailleurs habitué à leur esthétique. Pour ce qui nous concerne l'arc dans sa partie centrale présentait une inertie croissante à partir de la clef jusqu'au premier cadre. Celui-ci pouvait être considéré comme encastré par son longeron dans la surépaisseur de l'arc.

De nombreux ouvrages analogues ont été étudiés en supposant les portiques complètement articulés et simplement tenus à l'une de leurs extrémités.

L'Administration des Ponts et Chaussées avait demandé spécialement aux Constructeurs de considérer chaque ferme comme un monolithe absolu; par ailleurs des précautions spéciales devaient être prises pour que le hourdis n'intervienne pas dans les calculs de résistance.

Après une tentative infructueuse, nous avons renoncé en raison des complications exceptionnelles à l'étude complète de continuité qui conduisait à des calculs inextricables malgré la simplicité de la méthode.

Nous inspirant des travaux de M. *Rieckhof* et de l'appareil métallique connu sous le nom de NU. PU. BEST., nous avons demandé aux Constructeurs d'établir une maquette métallique à l'échelle 1/25ème et dont les éléments avaient des inerties proportionnelles aux sections prévues à l'avant-projet. L'emploi de

l'appareil de courbure de M. *Rieckhof* nous a permis de déterminer les points de moment nul, réels ou virtuels pour les pièces de faible inertie. Nous ne l'avons pas utilisé pour les arcs pour des raisons évidentes.[1]

En plaçant une charge quelconque en chacun des noeuds de la ferme, nous avons pu obtenir la ligne d'influence de l'effort tranchant du premier montant côté gauche. Il nous a suffi ensuite de procéder au calcul des cadres extrêmes pour lever une double indétermination hyperstatique.

La fig. 2 donne l'allure de la ligne d'influence ainsi obtenue. La fig. 2a indique la courbe d'influence des poussées secondaires.

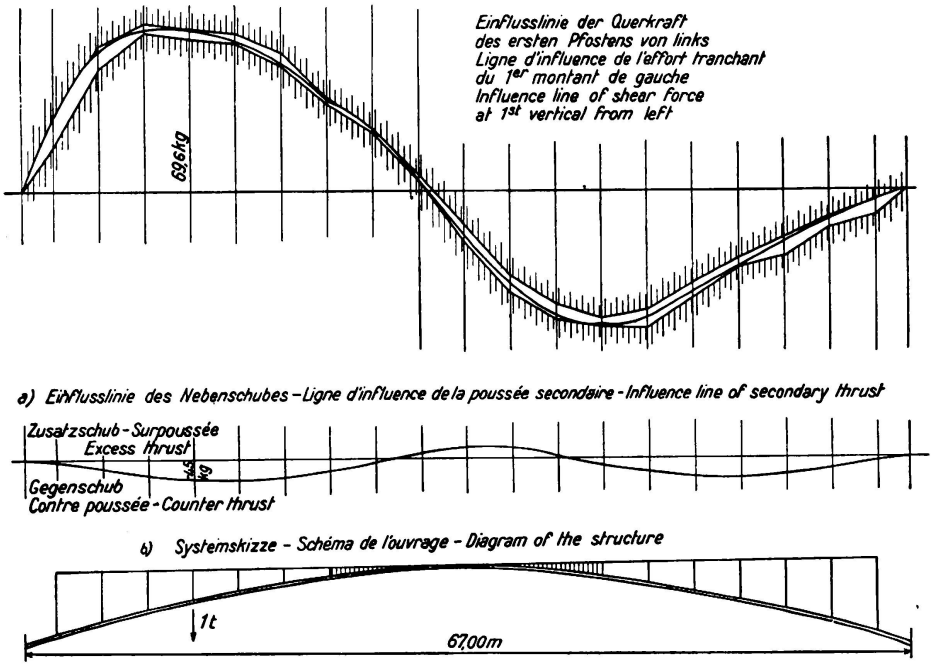

Fig. 2.

Nous avions au préalable fait l'étude de l'arc supposé isolé en déterminant la ligne d'influence de la poussée:

1° — sous l'action d'une charge verticale unité,
2° — sous l'action d'un effort horizontal unité,
3° — sous l'action d'un moment unité.

Les calculs avaient été conduits en tenant compte de la variation de l'inertie dans la partie centrale.

De la ligne d'influence précédemment indiquée et faisant l'objet de la fig. 2, nous avons pu déduire les tableaux d'influence concernant tous les efforts dans toutes les sections de l'ouvrage présentant des soudures. Une étude spéciale concernant l'effet des variations thermiques a été conduite simultanément.

Les Ingénieurs de la maison Baudet, Donon et Roussel nous ont fait observer l'avantage important que nous avions en remplaçant les assemblages de la maquette primitivement réalisés par des éléments cylindriques au moyen de pièces ayant la hauteur des arcs d'une part, et celle des longerons d'autre part.

[1] Cette méthode ne peut être légitimement employée qu'après avoir eu le soin d'éliminer les phénomènes de flambement, ce que l'on peut faire assez facilement.

Il suffit de comparer la maquette au plan de l'ouvrage pour se convaincre de l'utilité de cette remarque.

Une vérification d'un tronçon du modèle en lumière polarisée nous a permis de nous rendre compte de son importance.

Elle nous a fourni en même temps une justification intéressante de la méthode employée.

Le calcul des déformations nous a prouvé que les flèches verticales et horizontales de la ferme monolithe étaient plus faibles que celles d'un ouvrage comportant des portiques articulés.

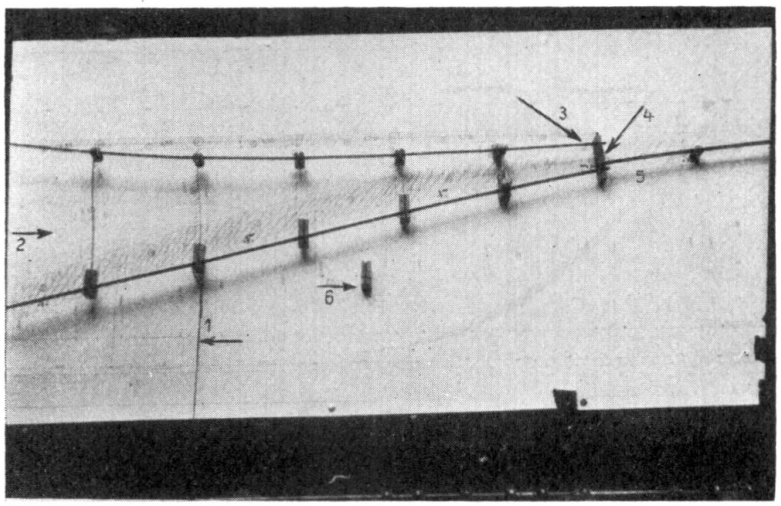

Fig. 3.

1 = Charge quelconque verticale.
2 = Effort tranchant x du montant gauche extrême.
3 = Encastrement parfait du dernier longeron coté clé.
4 = Angle indéformable.
5 = Ruban de hauteur variable (variation de l'inertie).
6 = Plot.

La fig. 3 représente une photographie partielle de l'une des maquettes employées. Des précautions spéciales nous ont permis d'éliminer les efforts de frottement causés par le poids de l'appareil disposé horizontalement; nous avons pu vérifier par ailleurs que l'augmentation d'inertie provenant de l'épaisseur des assemblages n'avait pratiquement aucune importance en ce qui concerne la valeur des résultats obtenus.

La courbe 2 à laquelle est adjointe la courbe 2a qui représente la ligne d'influence des poussées secondaires a été tracée en comparant les résultats obtenus dans le calcul du premier cadre gauche côté clef avec ceux que nous a donnés le calcul du premier cadre droite côté clef; ces deux calculs se contrôlant l'un l'autre. On a pu ainsi obtenir et délimiter une région de passage de la courbe suffisamment précise. La courbe 2a été tracée en même temps que la courbe 2.

2° — *Calcul des entretoises et du complexe.*

En exprimant l'égalité des déformations pour chacun des noeuds formées par l'intersection des fermes et des entretoises on obtient un système de 228 équa-

tions à 228 inconnues qui peut d'ailleurs se simplifier assez considérablement, mais en restant absolument inabordable. Ce système d'équations, si nous pouvions le résoudre, nous donnerait pour chacun des cas de charge envisagé la répartition des efforts dans les fermes et dans les entretoises.

Ce que nous ne pouvions songer à obtenir du calcul nous l'avons demandé à l'expérience. La maison Baudet, Donon et Roussel a fait construire à notre demande une maquette au 1/25e du complexe à étudier, dans lequel le rapport des inerties transversales et polaires a été respecté dans la mesure des facilités d'échantillonnage. (Voir fig. 4.) En même temps nous avons pu disposer d'une

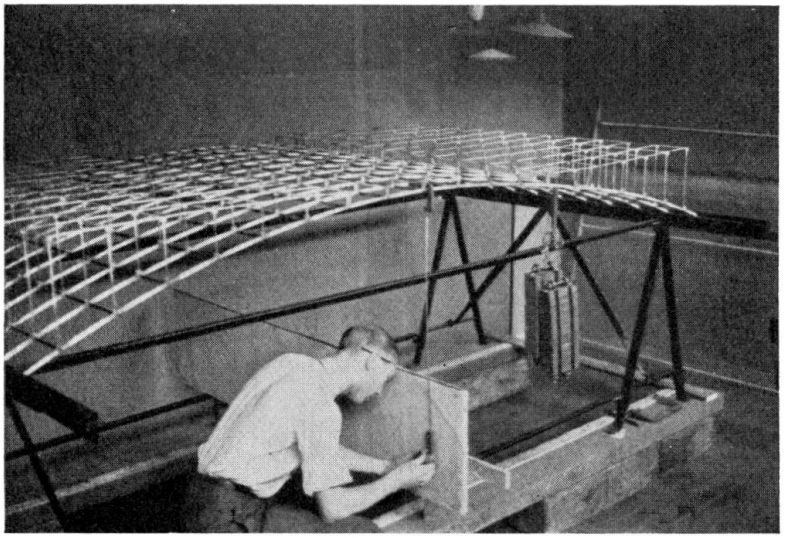

Fig. 4.

Modèle à 3 dimensions, mesure des flèches verticales.

maquette constituée par deux arcs identiques aux autres et reliés par des butons et des traverses également identiques. Ces deux arcs témoins sont visibles sur la fig. 5.

Nous avons appliqué à un grand nombre de noeuds une charge de 20 kg et nous avons relevé les déformations verticales des différents noeuds; nous avons constaté que les déformations horizontales étaient beaucoup plus faibles.

L'étude des élastiques des différentes entretoises ayant été faite, nous avons réalisé un *système d'assujettissement* en procédant de la façon suivante:

Chacune des entretoises simples ou composées a été remplacée par une maquette plane analogue à celle qui nous a servi pour les fermes et sur laquelle nous avons fait des déterminations de courbures et de points de moment nul.

Les résultats obtenus n'ont pas été aussi précis que ce que nous avions trouvé pour les fermes. Toutefois nous avons pu calculer avec une approximation a peu près suffisante les efforts réalisés dans les longerons, les montants et les butons des entretoises. Chacune des sections étudiées a fait l'objet d'un tableau d'influence. En comparant tous ces tableaux nous avons pu remarquer très nettement que la surcharge en damier telle que l'indique la fig. 6 était très sensiblement la plus défavorable, et cela pour chacune des sections envisagées.

Il convient de remarquer en passant que les entretoises ne travaillent pas sous l'action de la charge morte en raison du fait que le poids des trottoirs est presque

égal à celui des chaussées. Elles ne travaillent pas non plus sous l'action de surcharges alignées sur toute la largeur de l'ouvrage.

L'étude entière du complexe nécessiterait également l'étude par une méthode d'assujettissement absolument analogue[2] à la précédente des fermes de l'ouvrage sous l'action de la surcharge en damier; mais il ne s'agirait là que d'une simple vérification. En consultant la fig. 6 qui donne la comparaison entre les élastiques

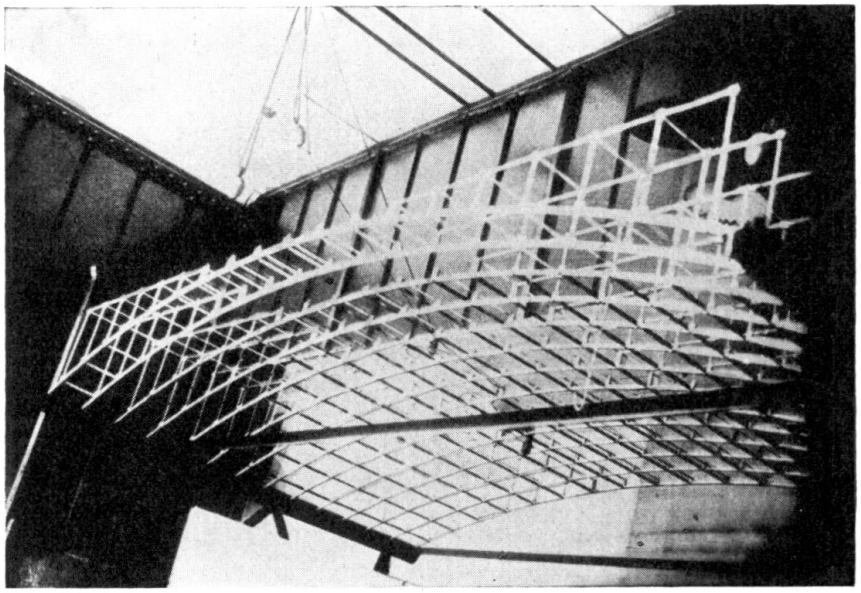

Fig. 5.

En bordure on remarque les 2 arcs témoins jumelés.
En bas la planchette de repérage.

de la ferme témoin et de chacune des fermes n° 4, 5 et 6 soumises à des charges identiques, on constate une très grande différence de déformations verticales pouvant atteindre 60 à 70 %, ce qui indique a priori que les efforts correspondants dans les fermes sont notablement réduits du fait de la présence des entretoises.

On pouvait d'ailleurs s'attendre à ce résultat en réfléchissant à la façon dont se comporte une dalle en béton armé reposant sur deux côtés et pourvue d'aciers de répartition.

En résumé, nous voyons par cet exemple que l'on peut arriver à étudier un ouvrage en demandant à l'expérience ce que le calcul ne pourrait fournir qu'au prix d'efforts disproportionnés avec les résultats à atteindre. L'essentiel est d'éviter l'empirisme et la sécurité douteuse qui s'y rattache. Il reste bien entendu que le calcul doit suivre point par point l'étude expérimentale. Cette méthode d'utilisation de maquettes planes et à trois dimensions peut être appliquée pour l'étude de très nombreuses structures à deux ou à trois dimensions, comportant

[2] Nous disons qu'il y a assujettissement imparfait lorsque les assemblages sont simplement situés aux emplacements indiqués par la maquette à trois dimensions et qu'il y a assujettissement parfait lorsqu'en outre les orientations des assemblages sont les mêmes. Nous avons pu nous convaincre dans la limite de nos essais que la différence entre les deux assujettissements n'était pas négligeable, mais qu'elle était généralement peu importante.

des triangulations ou un ensemble quelconque de portiques; elle permet par exemple d'aborder avec facilité l'étude des efforts secondaires dans les charpentes triangulées.[3]

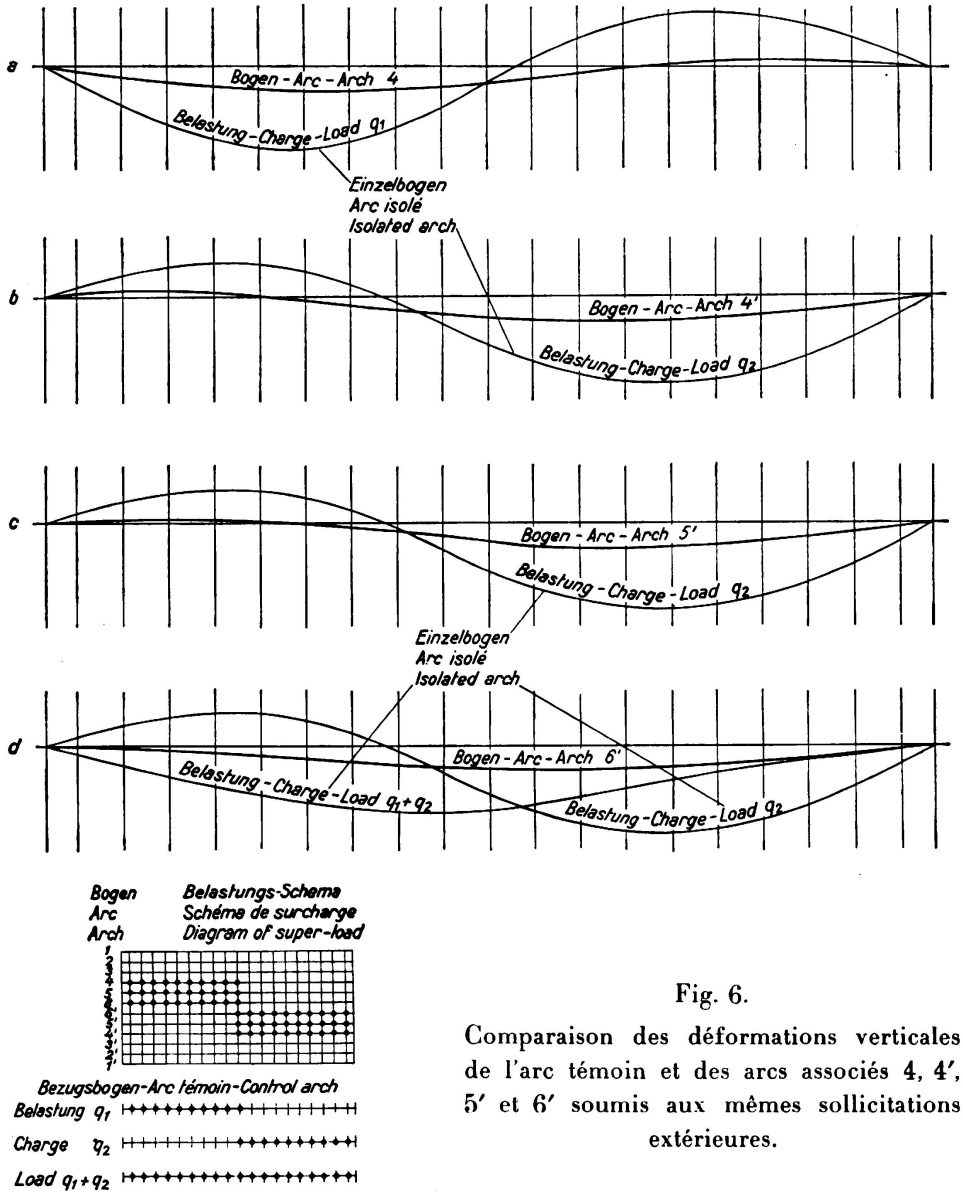

Fig. 6.
Comparaison des déformations verticales de l'arc témoin et des arcs associés 4, 4', 5' et 6' soumis aux mêmes sollicitations extérieures.

Les vérifications en lumière polarisée nous ont permis de constater un accord satisfaisant même pour des pièces assez courtes et une conformité rigoureuse pour les pièces allongées.[4]

---

[3] Nous venons de faire l'étude complète d'un grand ouvrage sur le Niger et nous avons pu vérifier que, seule la méthode expérimentale pouvait donner des résultats satisfaisants pour l'étude des tensions dans les barres surabondantes et pour celle des efforts secondaires.

[4] A la suite des difficultés d'ordre économique rencontrées en France, presque tous les gros ouvrages ont été résiliés; notamment le pont de Neuilly, qui a été confié par l'Administration à un nouvel adjudicataire. Celui-ci a modifié le projet initial en sorte que les calculs que nous avons entrepris ne présentent d'intérêt que par l'utilisation d'une nouvelle méthode de calcul, d'ailleurs très générale.