Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande

Band: 59 (1933)

Heft: 18

Artikel: Détermination des efforts au moyen de modèles appliquée aux ponts suspendus

Autor: Beggs, George E. / Timby, E.K. / Birdsall, D.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-45672

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

59e année 2 septembre 1933 N° 18

BULLETIN TECHNIQUE
DE LA SUISSE ROMANDE

Rédaction : H. Demierre et J. Peitrequin, ingénieurs.

Paraissant tous les 15 jours

ORGANE DE PUBLICATION DE LA COMMISSION CENTRALE POUR LA NAVIGATION DU RHIN

ORGANE EN LANGUE FRANÇAISE DE LA SOCIÉTÉ SUISSE DES INGÉNIEURS ET DES ARCHITECTES

SOMMAIRE : *Détermination des efforts au moyen de modèles appliquée aux ponts suspendus*, par MM. George E. Beggs, E. K. Mimby et D. Birdsall (suite et fin). — *Concours d'architecture pour un temple, à Renens.* — *Petit moteur Diesel économique.* — Chronique. — *Les applications thérapeutiques des ondes hertziennes courtes.* — *Le matériel moderne des travaux publics.* — *Société suisse des ingénieurs et des architectes.* — Bibliographie. — Carnet des concours.

Détermination des efforts au moyen de modèles
appliquée aux ponts suspendus

par MM. *George E. Beggs, E. K. Timby* et *D. Birdsall*,
Université de Princeton, U.S.A.
(Tirage à part de l'« Engineering News-Record », du 9 juin 1932)
Traduit et résumé par *A. Paris*, ingénieur,
professeur à l'Université de Lausanne.

(Suite et fin.) [1]

Etudes sur le modèle.

Les *tensions du câble*, qu'on devait observer, provenaient des effets de la surcharge mobile et des variations de température. On employait à cet effet des tensomètres à cadran *Anderson*, de 20 pouces ; fixés entre câble oblique et supports arrière, au droit des ancrages, ils avaient un étalonnage qui correspondait, dans la construction finie, à une composante horizontale de 86,555 livres par division de $^1/_{25}$ du cadran. On pouvait ainsi évaluer les tractions effectives du câble de l'ouvrage à la précision de 55 livres par pouce carré.

Un *fleximètre*, à simple échelle d'acier graduée, permettait de mesurer la flexion maximum du câble et du sommier de raidissement sous l'effet des charges mobiles et de la température ; le calcul théorique avait fait prévoir une flèche de 70 pouces dans l'ouvrage fini ; ce qui correspondait au centième dans le modèle, c'est-à-dire à 0,70 pouce. La mesure effectuée avait, dans ces conditions la précision voulue.

Le calcul analytique faisait prévoir, d'autre part, que les *déformations des tours* prendraient une ampleur bien inférieure à celle des flèches ci-dessus ; il fallait donc opérer, à leur égard, avec une grande exactitude. On plaça, à cet effet, monté sur le fondement de la grande pile, un microscope filaire permettant de lire le dix-millième de pouce ; le but visé, le bord d'un petit point d'encre, était posé sur une cible fixée au sommet de la tour. L'étalonnage du microscope, au moyen d'une échelle standard, indiqua une précision de mesure correspondant, sur le modèle, à 0,0198 pouce de déformation réelle du sommet de la tour de l'ouvrage existant.

Le plus sûr moyen d'évaluer les *moments fléchissants du treillis de raidissement* consiste à mesurer les changements de courbure du sommier. Ces différences étant minimes, il a fallu les amplifier. A cet effet, deux fortes épingles horizontales avaient leurs pointes placées en vis-à-vis près du milieu du secteur d'observation, et ceci à 8 pouces sous l'axe des barres représentant le

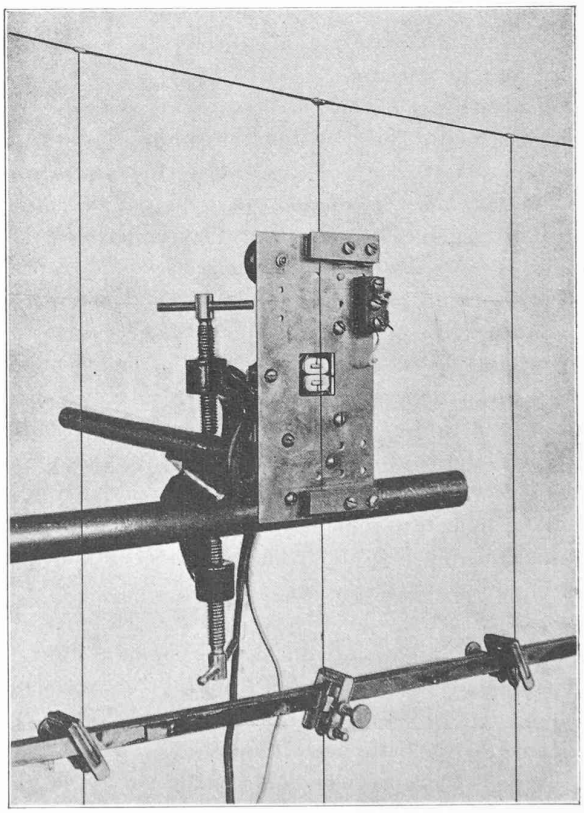


Fig. 3. — Tensomètre musical employé pour évaluer la variation des efforts de suspension. L'instrument se base sur le fait que la fréquence naturelle de vibration d'un fil tendu, de longueur donnée, change avec son état de tension. Le câble porteur du modèle apparaît au-dessus de l'instrument, tandis que la barre placée en dessous représente le sommier raidissant.

[1] Voir *Bulletin technique* du 19 août 1933, page 205.

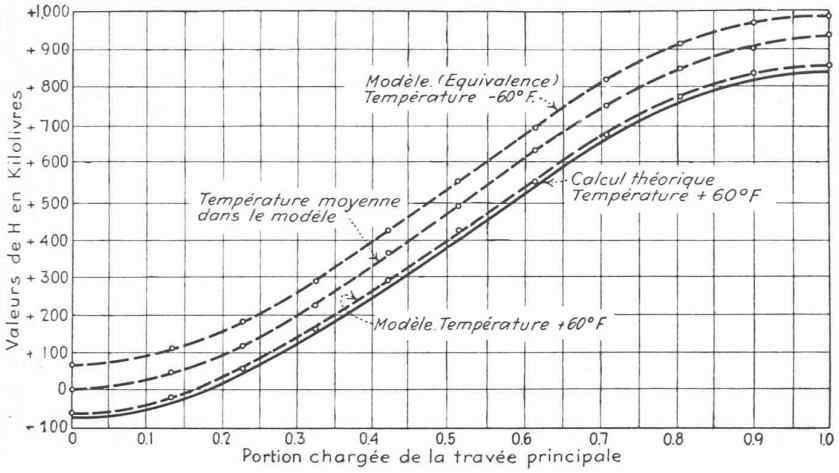


Fig. 4. — Pont du Mont Hope. Influence de l'avancement progressif de la surcharge sur la composante horizontale H de la traction dans le câble. On remarquera le parallélisme étroit qui règne entre les résultats analytiques et ceux expérimentaux du modèle.

sommier de raidissement. Les épingles étaient plantées dans un fragment de liège fixé sur des aiguilles à tricoter verticales, soudées aux dites barres de raidissement, et distantes de la longueur d'observation de 3 pouces. On mesurait le déplacement relatif des pointes d'épingles sous l'influence des moments fléchissants. Le microscope, utilisé pour cette mesure, avait été étalonné au moyen d'une barre identique à celles du sommier-modèle, et qu'on soumettait à un moment fléchissant constant sur la longueur de mesure.

Les moments maxima se produisent, dans le treillis de raidissement, sous l'influence combinée de la plus haute température et de la surchagre en position la plus défavorable. On commençait donc par détendre les écrous de réglage pour assurer l'équivalent de l'effet thermique ; on plaçait ensuite un à un les poids représentant le moment maximum positif ; l'accroissement de la distance entre pointes d'épingles tendant à s'annuler à mesure que les poids déposés s'approchaient des limites de la charge défavorable (points nuls), le microscope signalait l'instant où l'on devait interrompre le chargement. L'étalonnage du microscope avait indiqué une équivalence de 0,01549 pied-livre par division micrométrique, pour les moments dans le modèle. On passait aux moments fléchissants de l'ouvrage réel en multipliant le résultat par

$$n^2 . m \text{ fois } n = n^3 . m = 100^3 \times 7{,}7125$$

Une division micrométrique correspondait donc, sur ledit espace du modèle et pour l'ouvrage en grandeur, à un moment fléchissant de 119 500 pieds-livres. C'est le centième environ du moment fléchissant maximum atteint dans la poutre raidissante de la grande travée ; la précision obtenue suffisait donc aux besoins de la construction.

Un *tensomètre musical* spécial, établi à l'Université de Princeton par M. *W. R. Mac-Namee* sous la direction du professeur *C. H. Willis*, permettait de mesurer la variation des *tensions dans les tiges de suspension*, sous l'influence de la charge accidentelle et de la température.

La conception de l'instrument repose sur le fait que la tension d'un fil agit sur son mode de vibration ; une longueur d'observation étant alors fixée, un circuit électro-magnétique y provoquera un certain type de vibration dépendant des effets d'induction ; l'étude préliminaire d'échantillons des fils de suspension renseigne sur les relations entre tension et fréquence. L'instrument comporte donc, avec une longueur définie d'étalonnage, un système d'induction à fréquence réglable et un circuit téléphonique surveillant le son rendu par le fil ; un cadran à oscillateur fixe la fréquence des impulsions électro-magnétiques. A mesure que cette fréquence s'approchait de celle naturelle du fil de suspension tendu, le son se faisait plus clair ; on trouvait le point culminant par un tâtonnement analogue à celui du repérage des stations sur le cadran de la radio.

Sommaire des résultats d'essai.

La figure 4 représente le graphique de la *composante horizontale H* de la traction du câble, dans l'hypothèse d'une surcharge avançant pour couvrir progressivement la travée principale. D'autre part, le tableau ci-dessous donne, pour comparaison, des valeurs de H correspondant à des conditions diverses de charge et de température.

Déformations et tractions horizontales du câble au pont du Mont Hope.

Etat de charge	H en kilo-livres	Tour latérale. Déformations à l'intersection des tangentes (pouces)	Tour principale. Déformations à l'intersection des tangentes (pouces)	Flèche de la poutre raidis. au milieu de la portée (pouces)
1. Travée princ. et travée latérale éloignée complètem. chargées. Temp. + 60° F	+ 867,3 (+ 872,0)	+3,12 (+3,21)	+14,19 (+12,76)	—
2. Charges comme sous 1., mais Temp. — 60° F	+1038,0 (+1022,0)	+0,50 (+0,92)	+ 7,88 (+ 7,46)	—
3. Travée latérale voisine complètem. chargée. Temp. + 60° F	— 36,7 (— 33,8)	+1,44 (+1,37)	— 3,50 (— 3,62)	33,6 et (33,0) max. travées latérales chargées
4. Charge comme sous 3., mais Temp. — 60° F	+ 114,6 (+ 109,1)	—1,25 (—0,98)	— 9,75 (—10,20)	—
5. Toutes travées complètem. chargées. Temp. + 60° F	+ 905,8 (+ 899,3)	+3,25 (+3,34)	+ 7,56 (+ 7,30)	—
6. Charge comme sous 5., mais Temp. — 60° F	+1076,0 (+1058,0)	+0,62 (+0,99)	+ 1,31 (+ 1,95)	—
7. Travée principale complètem. chargée Temp. + 60° F	—	—	—	73,2 et (68,7) maximum
8. Travée principale complètem. chargée. Temp. normale	—	—	—	45,6 et (48,8)

(Note. — Les valeurs hors parenthèses émanent de MM. *Robinson* et *Steinmann*, ingénieurs-conseils, à New-York. Celles entre parenthèses proviennent de l'essai du modèle d'acier.)

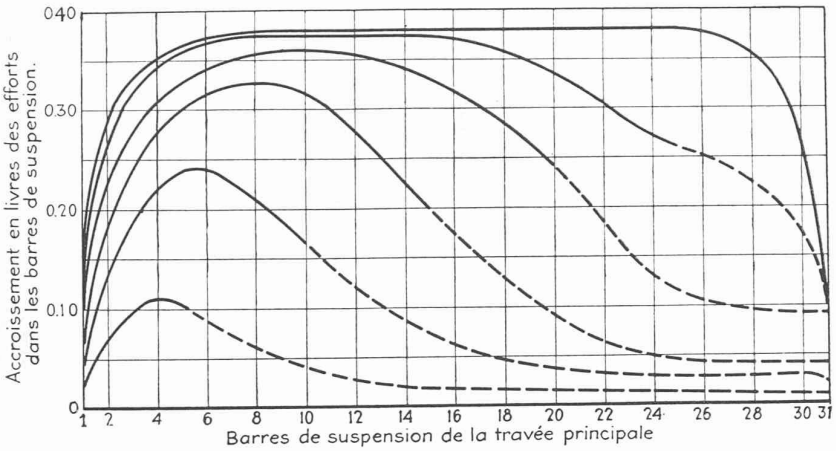


Fig. 5. — Croissance des efforts dans les suspensions sous une charge mobile avançant sur la travée principale, la température restant normale ; les parties pleines des courbes indiquent l'étendue de la surcharge (La théorie des déformations suppose l'égalité entre les charges des tiges de suspension et néglige l'allongement élastique).

Les courbes expérimentales de la force H, tracées en pointillé dans la figure 4, passent exactement par les points observés. Leur régularité et leur parfait parallélisme témoignent de l'uniformité remarquable des résultats livrés par l'appareil employé, la charge couvrant progressivement la travée. La courbe en trait plein indique la seule série de valeurs analytiques utilisables pour comparaison. On remarque la petitesse de la différence entre la courbe théorique de H et celle qu'a livrée le modèle, pour les mêmes conditions de charge et de température. Quoique pratiquement négligeable, cette différence frappe par sa régularité imperturbable ; on ne peut se défendre de croire à une cause essentielle de divergence, entre les deux ordres de résultats ; les auteurs estiment que cette anomalie provient de la supposition faite par le calcul théorique, que les tensions sont égales dans les tiges de suspension, dont on néglige par ailleurs les allongements sous l'effet de la surcharge mobile ; le modèle tient naturellement compte de l'état de fait, qui est différent comme l'ont montré les tensomètres musicaux, dont les indications paraissent à la figure 5.

La courbe expérimentale des *moments fléchissants* paraît en pointillé dans la figure 6, où elle joint les points (petits cercles) résultant de l'observation du modèle, soumis à l'action de la surcharge et de la température maximum ; la courbe intéresse la demi-travée principale et la travée latérale attenante. Comparée à la courbe des moments théoriques (trait plein), elle marque des valeurs expérimentales inférieures de 10 % aux résultats analytiques. Les auteurs estiment le chiffre expérimental plus près de la vérité, car la même cause, l'élasticité et l'inégalité de contrainte des tiges de suspension, a agi ici comme dans le calcul de la courbe des tractions horizontales H.

Conclusions.

Comparant les résultats analytiques et expérimentaux, obtenus dans l'étude des tensions et des déformations du pont du Mont Hope, on voit que tant la méthode théorique perfectionnée par M. L. S. Moisseiff que l'emploi du modèle d'acier conduisent à une solution satisfaisante du problème posé par la pratique. Les faibles différences qui se montrent entre ces résultats, doivent, de l'avis des auteurs, provenir du fait que le calcul théorique néglige l'influence des déformations, effectives et inégales, des tiges de suspension.

On peut dès lors étendre à bon droit l'application de la méthode aux effets du vent. On comptera alors, sur chaque panneau du modèle, une poussée horizontale égale à la pression effective W du vent, sur le panneau correspondant d'une demi-section transversale de l'ouvrage existant, en la divisant par $n^2.m$; on proportionnera le câble et les autres parties du pont, entre modèle et ouvrage réel, dans les mêmes conditions. Seul le contreventement diffère à cet égard ; on envisage en effet deux treillis raidissants à deux membrures chacun, l'un vertical et l'autre horizontal ; on leur assure des moments d'inertie, sur les axes de gravité horizontal et vertical, valant $1/n^4.m$ fois ceux des treillis correspondants de l'ouvrage réel. On applique ensuite l'équivalent de la poussée par des fils sur renvois de poulie, comme ce fut le cas au pont Trans-Bay.

Le modèle d'acier se prête aussi commodément à l'étude des efforts intérieurs d'ouvrages trop compliqués pour l'analyse mathématique ; le travail n'y trouve pas plus de difficulté que dans le modèle décrit.

On pourrait, de même, examiner les effets de tremblements de terre en transmettant, par l'intermédiaire de ses bases de fondation, au modèle chargé comme ci-dessus, des vibrations analogues aux secousses sismiques, mais réduites à $1/n$ de leur amplitude et dont la

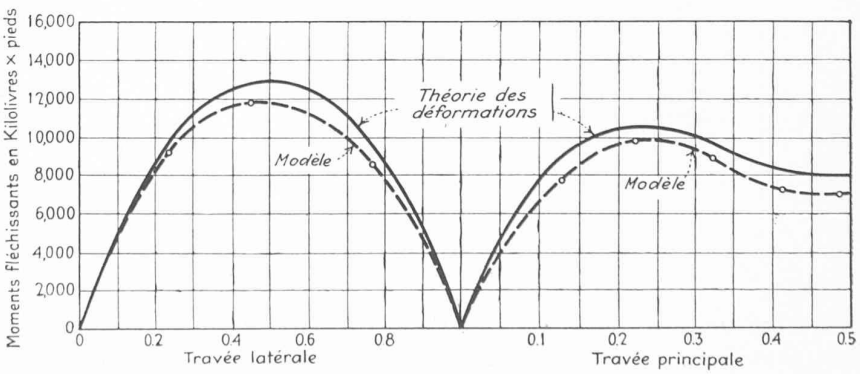
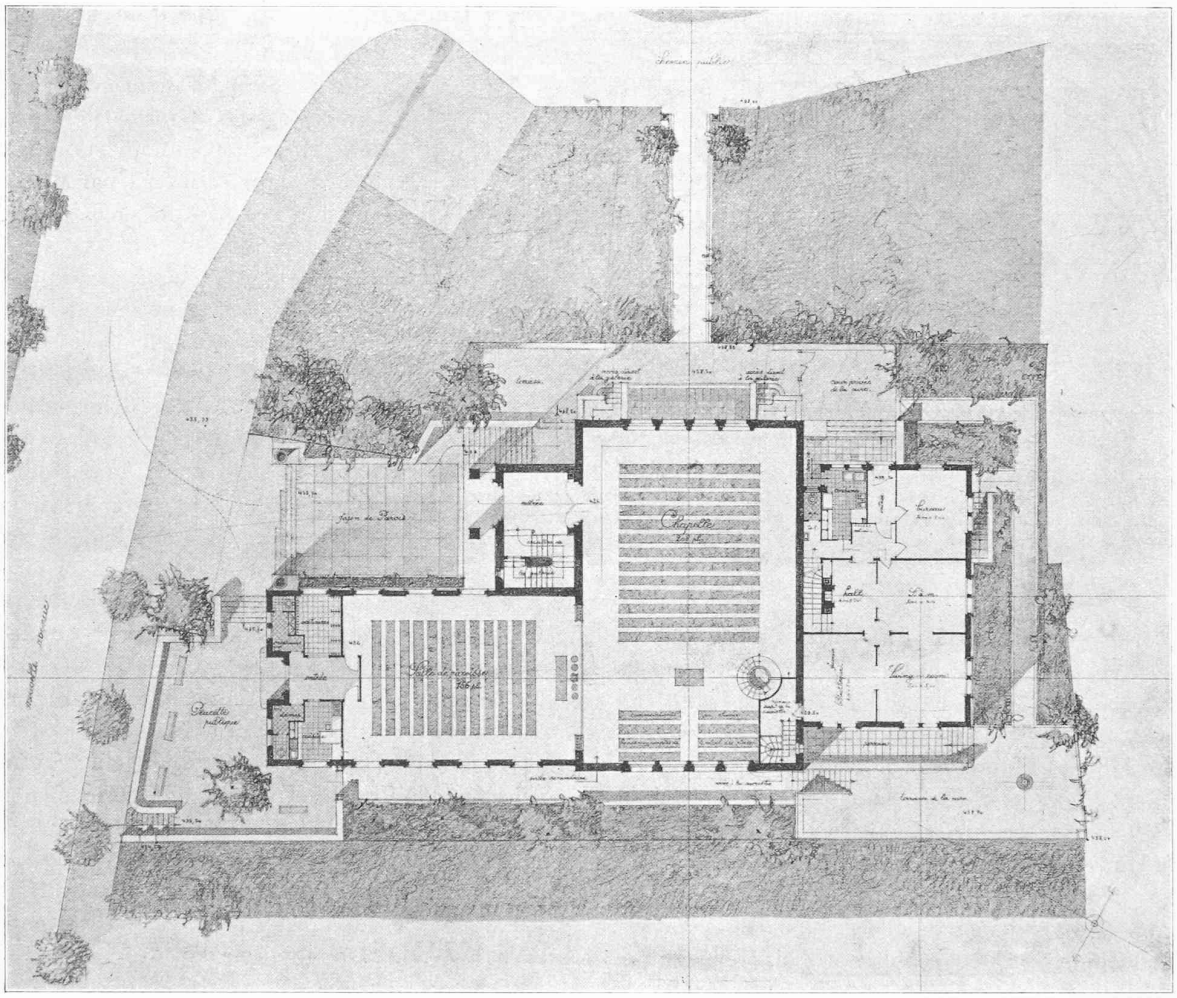
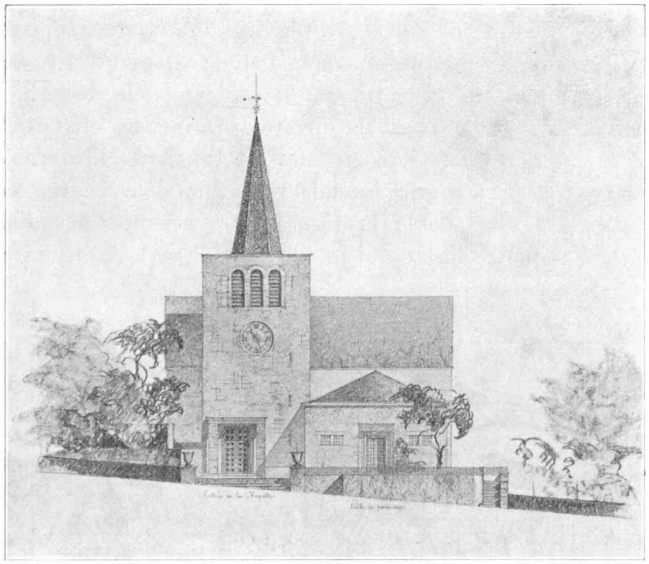


Fig. 6. — Pont du Mont Hope. Les moments fléchissants positifs maxima dans la poutre raidissante sont restés uniformément inférieurs de 10 % à ceux qu'indique le calcul basé sur la théorie de l'élasticité ; on attribue cette différence à la supposition erronée, introduite en théorie, d'une égalité constante dans la charge des tiges de suspension.





CONCOURS POUR LE TEMPLE DE RENENS

1er prix : Projet N° 44, de M. *P. Lavenex*, architecte, à Lausanne.

Plan de situation. — 1 : 400.
Façade sur la nouvelle avenue. — 1 : 500.

fréquence sera augmentée $\sqrt{n}$ fois. Cette indication ressort d'une étude de principe ; elle demanderait une vérification expérimentale au laboratoire avant d'entrer dans la pratique. Le modèle une fois établi, il suffit de peu de temps pour obtenir le résultat exact, correspondant à un état de charge donné, qu'il s'agisse de surcharge ou de température, de tensions ou de déformations. L'usage simultané du modèle et du calcul analytique procure naturellement une compréhension particulièrement intime des conditions de travail intérieur du système.