Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande

Band: 59 (1933)

Heft: 17

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-45670

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: 12.12.2025

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

59e année 19 août 1933 N° 17

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. — *L'éclairage artificiel des locaux intérieurs* (suite et fin). — Chronique. — *L'automotrice «Bugatti» des Chemins de fer de l'Etat et le wagon «route et rail» des Chemins de fer du Nord français.* — Bibliographie.

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.

L'étude des problèmes de haute statique au moyen de modèles d'acier a été introduite, pour autant que les auteurs en sont informés, au printemps 1930, par l'initiative du laboratoire d'ingénieurs de l'Université de Princeton. Ce principe, appliqué alors à la vérification des profils adoptés pour le pont suspendu du Mont Hope, en Rhodes Island, a donné des résultats si approchés de ceux des épures analytiques, que la méthode a été admise pour l'établissement des calculs préliminaires et définitifs du pont Trans-bay, destiné à traverser le bras de mer entre San-Francisco et Oakland (Californie). Il a de même servi à résoudre quelques problèmes relatifs à l'érection du pont sur l'Hudson, à New-York.

Le présent article décrit en détail le procédé utilisé pour vérifier, au pont du Mont Hope, les effets des charges permanentes et accidentelles, et ceux de la température. Une méthode identique a été appliquée, l'été dernier, à la recherche des efforts dans le pont de San-Francisco ; mais on l'a alors complétée par la recherche des tensions dues au vent ; il s'agissait, dans ce cas. de décider, dans l'étude du viaduc entre San-Francisco et Goat Island, sur la route tendant vers Oakland, du choix entre un pont suspendu à travées multiples et le projet d'une travée principale unique de grande envergure. Le modèle de San-Francisco, quoique établi à même échelle, était plus grand que celui du Mont Hope. Les deux représentations ne différaient du reste que par quelques détails de construction. Si l'on a préféré mettre l'exemple du Mont Hope à la base de cet article, la première publication importante relative à cette méthode, c'est que cet ouvrage, datant déjà de l'année précédente, a fait l'objet d'études très complètes en application, par M. D. B. Steinmann, de la théorie des déformations de Moisseiff. La résolution de ce problème précis par la voie mécanique a alors, d'une part, montré que l'étude par modèle se justifie pleinement dans la recherche des efforts dus aux charges normales, au vent et à la température ; et, d'autre part, elle a décelé l'influence, légère du reste, de l'erreur commise par le calcul usuel qui suppose des efforts égaux dans toutes les tiges de suspension, sous l'influence des charges et de la température, et qui néglige l'effet de l'allongement élastique de ces barres. On fera néanmoins ici de brèves allusions aux études plus récentes du pont de San-Francisco, qui comportent en particulier l'introduction des variations du moment d'inertie du treillis raidissant.

Le *pont du Mont Hope* a été décrit dans le numéro du 12 avril 1928 de *Engineering-News Record*. Sa travée principale, suspendue, a 1200 pieds de long, et ses deux travées latérales 504 pieds ; la chaussée a 32 pieds de large, trottoirs compris ; la flèche du câble atteint 120 pieds dans la grande travée. On a calculé la chaussée charretière pour le passage de trois lignées de trucs de 20 tonnes, distants de 33 pieds entre axes et majorés de 30 à 37 % pour effet dynamique ; les sommiers de raidissement sont comptés pour trois séries de trucs de 15 tonnes, en même succession ; les câbles sont prévus pour 2700 livres de charge permanente et 750 livres de charge accidentelle par pied linéaire. Les tours d'acier forment chacune un système flexible, à huit champs évidés, solidement amarré à la base et s'élevant à 284 pieds au-dessus des basses eaux ordinaires. Les poutres raidissantes, de 18 pieds de hauteur, reposent librement sur les tours ; leur dilatation y est assurée par une liaison mobile.

Principes de l'analyse des modèles.

La construction du modèle doit permettre d'y déterminer les tensions, les déformations et les allongements, tels qu'on peut les attendre de la construction réellement exécutée. Le modèle reste géométriquement semblable à l'ouvrage réel ; si donc la mise en charge crée, par l'ampleur des déformations, un nouvel état d'équilibre,

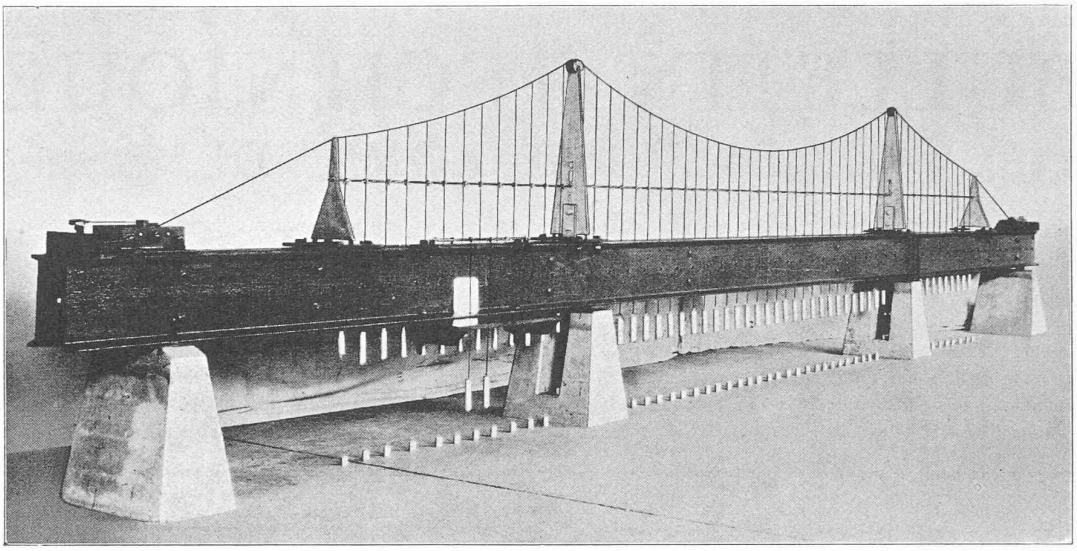


Fig. 1.

Modèle du pont suspendu du Mont Hope (travée principale 1200 pieds) ; les poids de charge permanente sont attachés aux fils de suspension ; ceux représentant la surcharge reposent encore sur le plancher. Les tours sont faites en acier plat, avec montage sur points coniques ; un dispositif de réglage aux ancrages assure les déplacements horizontaux simulant la dilatation thermique.

on l'aperçoit à l'examen. Le modèle et l'ouvrage réel doivent subir les mêmes allongements unitaires ; on établira donc une formule simple, permettant de calculer les dimensions du modèle et sa charge en fonction des valeurs correspondantes de l'ouvrage et du rapport n de réduction des longueurs.

Soient A la section transversale d'un organe de l'ouvrage réel, et S l'*effort dû à la surcharge* P, on trouvera les valeurs correspondantes du modèle par réduction à A/n^2 et P/n^2.

Une *élévation de la température* tend à donner à la construction métallique des dimensions supérieures à celles autorisées par les massifs de fondation ; il en résulte des déformations et des contraintes, qu'on obtiendrait en valeur identique si l'on déplaçait les massifs de fondation de la différence de longueur indiquée ; ceci en supposant alors constante la température de la construction métallique. On réalisera donc l'état de tension correspondant à une élévation de température en rapprochant, dans le modèle, les extrémités d'attache d'une longueur totale $c.t.L$, où c désigne le cœfficient de dilatation de l'acier, t donne l'élévation de la température (60° Farenheit) et L représente la distance entre les supports extrêmes.

On trouvera alors les *déformations* de l'ouvrage réel en multipliant celles du modèle par le facteur n, dénominateur de l'échelle choisie.

Proportions du modèle et des charges.

La fig. 2 montre la marche suivie dans la recherche des dimensions de laboratoire. Elle comprend six esquisses successives. La première reproduit les éléments de l'ouvrage existant : câble, suspensions et poutre de raidissement. La dernière indique le résultat adéquat à un système d'efforts dans le seul plan vertical ; mais on agirait de manière analogue pour étudier les effets du vent.

Pour passer de l'un à l'autre de ces croquis, on suit le développement que voici. Le croquis 2 indique un équivalent constructif de la section transversale effective du croquis 1, avec indication symbolique des charges permanente et accidentelle, agissant sur l'ouvrage.

Le module d'Young E n'est en général pas, dans les organes du modèle, identiquement celui connu ou supposé de l'organe correspondant de l'ouvrage existant ; on compensera cet effet en modifiant les organes du modèle en rapport inverse des modules effectifs, de manière à conserver des allongements unitaires équivalents.

La réduction linéaire à 1/100 du modèle par rapport à la construction existante ayant été admise ici, on passe du croquis 2 au 3 en divisant toutes les dimensions linéaires par $n = 100$, et en réduisant par le carré de ce facteur n les charges effectives.

Une nouvelle réduction s'est toutefois imposée. Le câble rond, quoique réduit à un fil de 0,0947 pouce de diamètre, restait trop raide pour un usage convenable. Puis les charges D/n^2 et L/n^2 étaient encombrantes encore. Enfin, on a cherché à utiliser les profils commerciaux des cordes à piano. On a ainsi passé du croquis 3 au 4 en envisageant l'usage d'un ruban d'acier au lieu de câble ; le croquis 5 a suivi en réduisant charges et profils ; puis vint le croquis final 6 dans lequel les profils du câble et des suspensions deviennent à peu près identique aux fils standard du commerce ; les charges de construction sont alors réduites à $D/n^2 \cdot m$ pour la charge permanente et à $L/n^2 \cdot m$ pour la surcharge. La fig. 1 montre ces charges en place : les premières sont suspendues, tandis que les autres reposent encore sur le plancher.

Construction du modèle.

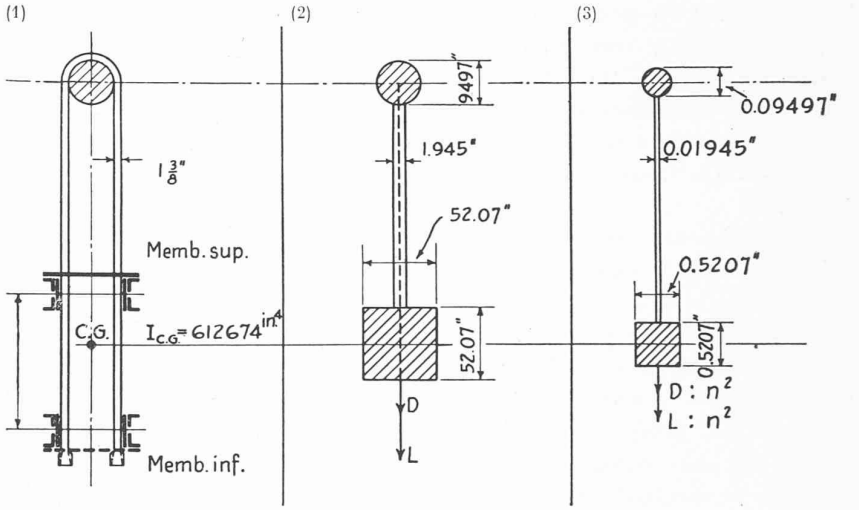
Des *massifs de fondation* en béton ont été établis sous les deux grandes tours et pour les ancrages du câble. On a placé sur eux deux grosses poutrelles à **U** de 12 pouces, pour supporter le modèle ; ces fers ont un appui fixe sur un des massifs terminaux, ils reposent par chariots à rouleaux sur les trois autres points d'appui ; les dilatations thermiques sont donc libres, mais on a pris soin de maintenir aussi constante que possible la température du laboratoire pour éviter même les efforts possibles ensuite d'inégale dilatation entre les petits profils très sensibles du modèle, et ceux plus lents à réagir des poutrelles. Les supports immédiats sont alors agencés pour permettre les déplacements équivalents à l'effet des variations de la température de l'ouvrage réel ; la mesure en était faite par des cadrans *Ames* montés sur les bases de fondation et solidarisés avec les appuis mobiles.

Les contraintes des *deux tours principales* n'ont pas été étudiées ici ; on a préféré le faire sur des pièces spéciales, à plus grande échelle. L'organe, qui les représente dans le modèle du pont, devait toutefois réaliser aussi exactement que possible les conditions réelles d'appui. Pour reproduire l'absence de résistance horizontale des selles à rouleaux, pareilles à celles du Mont Hope, on a monté les deux fortes tours sur des cônes métalliques, et les a équilibrées par un pendule calculé pour ramener le centre de gravité global dans la ligne des points d'appui ; le sommet des tours portait un disque d'acier prêt à recevoir une selle de support. Si l'on avait, au contraire, dû, comme ce fut le cas au Trans-Bay, simuler une tour élastique fixe, on aurait accru le contrepoids pour provoquer la résistance voulue, sans empêcher le déplacement représentatif des variations thermiques.

Aucun contrepoids pendule n'a été employé pour les *tours latérales*, relativement légères, placées sous l'angle du câble descendant. Mais on a simulé les appuis à rouleaux en usant des mêmes points coniques ci-dessus.

On a construit l'*amarrage du câble* en vue de rendre possibles les déplacements horizontaux voulus ; un réglage à vis équilibrait la force horizontale. La composante verticale était reprise par les moyens ordinaires. On a négligé de tenir compte du déplacement vertical, qui aurait compensé la dilatation thermique des tours, de même que le réglage au pied de ces dernières, mais on a calculé l'effet produit par leurs rotations lors de l'étude des effets de la température. Si, au contraire, on avait affaire à des tours immobilisées sur leur base, on devrait assurer leur déplacement proportionnel à cette occasion.

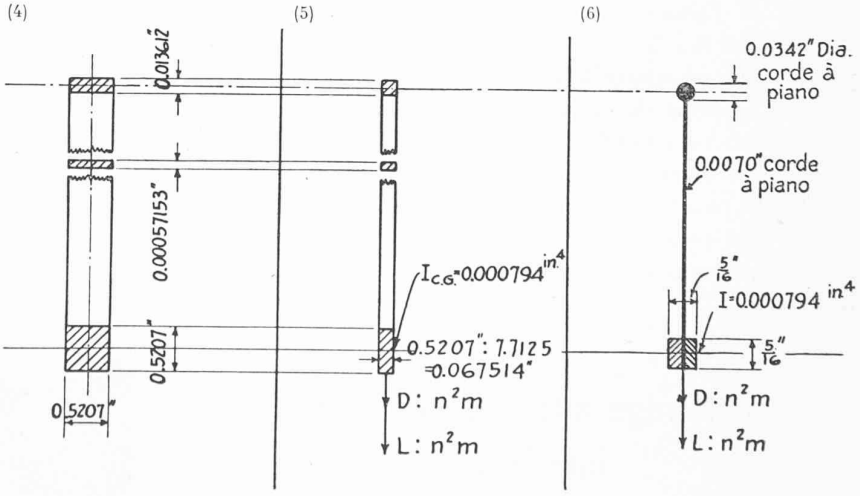
Quand on a projeté le *câble principal*, on a établi en tableau les coordonnées de chaque attache de suspension et de chaque liaison aux tours, dans la supposition d'une absence complète d'efforts dans le fil. Puis on a éprouvé, parallèlement et par dynamomètre, le câble et un ruban d'acier standard contraints à un même allongement unitaire. On fixa ensuite les points d'ancrage, ceux de suspension et les points de référence de



Légende 1. Conforme à l'ouvrage construit. Section du câble 70,93 pouces carrés. Deux suspensions de 1 3/8 pouce. Treillis raidissant. Membrure supérieure. Membrure inférieure. *C. G.* = centre de gravité I_{CG} = 612 674 pouces⁴

Légende 2. Equivalent constructif. *D* = charge permanente. *L* = surcharge.

Légende 3. Profils du croquis 2 réduits par le facteur n = 100.



Légende 4. Sections rondes remplacées par profils rectangulaires de 0,5207 pouce de large.

Légende 5. Sections du croquis 4 divisées par m = 7,7125.

Légende 6. Profil définitif du modèle. Corde à piano 0,0342 pouce de diamètre. Corde à piano 0,007 pouce de diamètre. I = 0,000794 pouce⁴. D : $n^2.m$ L : $n^2.m$.

Fig. 2. — Marche suivie pour proportionner le modèle de pont suspendu. On introduit deux facteurs de réduction ; le premier, n, est ici égal à 100, et le second, m, est choisi pour permettre d'utiliser les types commerciaux de cordes à piano. Ces deux facteurs sont appliqués aux charges du pont existant.

la tour et du câble aux intervalles voulus pour que, le câble étant attaché à ses supports et la charge permanente étant appliquée, les suspensions fussent en position correcte. Les fils proprement dits de suspension se continuaient en dessous du bâti par des brides destinées à porter les poids représentant la majeure partie de la charge permanente. Le solde intervenait comme suit.

Le câble complètement préparé, avec suspensions attachées, fut alors mis en place, la partie principale de la charge permanente étant fixée aux suspensions. Restait le poids du sommier de raidissement, qu'on représentait par de petites masses additionnelles temporaires, en attendant qu'il fût effectivement mis en place ; chacun de ces poids, temporaires et non montés, équivalait à un panneau du sommier de raidissement du modèle, avec ses crampons serre-fil. Le câble prenait ainsi exactement la position correspondant au poids mort total sous température normale. Ayant alors vérifié avec soin la flèche du câble dans la travée principale et les travées latérales, on a trouvé une erreur de construction négligeable.

Conformément aux suppositions faites, le *sommier raidissant* doit, à température normale, rester libre de moments fléchissants sous l'effet du poids mort complet. Pour satisfaire à ce postulat, on a composé le sommier de raidissement de deux barreaux d'acier selon modèle final (croquis 6) et on l'a monté sur un échafaudage construit sur les grosses poutrelles à U de 12 pouces. On a toutefois alors dérogé à l'exacte position de ce sommier, en le mettant un peu plus bas pour donner du de jeu aux tensomètres musicaux, destinés à surveiller les efforts dans les suspensions, sous l'effet de la surcharge. Ce déplacement ne doit pas avoir joué un grand rôle dans le résultat final de l'expérience, puisque les calculs théoriques peuvent impunément négliger l'influence de l'allongement des tiges de suspension.

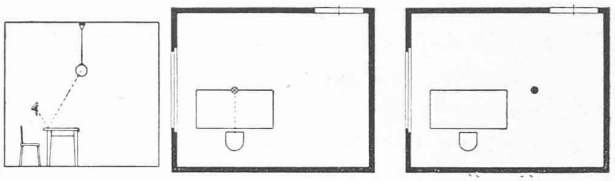
L'attache des barres de raidissement aux fils de suspension par crampons à vis, et celle aux tours, se firent en même temps en respectant la condition de liberté auprès de la tour pendule gauche. Les poids additionnels étant alors enlevés, l'échafaudage fut éloigné, laissant le modèle pourvu d'un sommier répondant aussi exactement que possible au postulat d'absence de moments fléchissants, sous la charge permanente et à température normale. *(A suivre.)*

L'éclairage artificiel des locaux intérieurs

(Suite et fin.) [1]

3. Aménagement des locaux. Installation des appareils d'éclairage.

En général, la disposition symétrique des lampes produit un éclairage suffisamment uniforme des postes de travail et du local. Mais cette symétrie peut engendrer un éclairage qui



Eblouissement par réflexion. Pour éviter l'éblouissement par réflexion.

Fig. 9. — Disposition des appareils d'éclairage et possibilité d'éblouissement par réflexion.

ne soit pas irréprochable si l'aménagement du local, l'emplacement des meubles et des postes de travail sont de nature à donner naissance à des ombres, propres ou portées, gênantes et surtout à des phénomènes de réflexion sur les plans utiles. C'est pourquoi il est préférable d'orienter d'emblée les lampes d'après la position des postes de travail.

Des ombres portées gênantes prennent naissance quand la lampe éclairant le poste de travail est placée derrière le travailleur et que l'incidence des rayons lumineux est trop inclinée par rapport au plan de travail. En règle générale, c'est l'incidence à gauche, de l'avant à l'arrière ou de l'arrière à l'avant, qui est désirée. Mais, avec l'éclairage semi-indirect ou semi-direct, on peut s'accommoder de l'incidence par la droite car, moyennant une hauteur suffisante des lampes, les ombres, d'ailleurs légères, sont peu étendues.

La réflexion de la lampe sur les surfaces brillantes du poste de travail se produit quand la lampe, placée devant le travailleur est située dans le plan formé par la direction du regard et la normale à la surface réfléchissante. Ce phénomène peut donner lieu à un évanouissement complet des contrastes

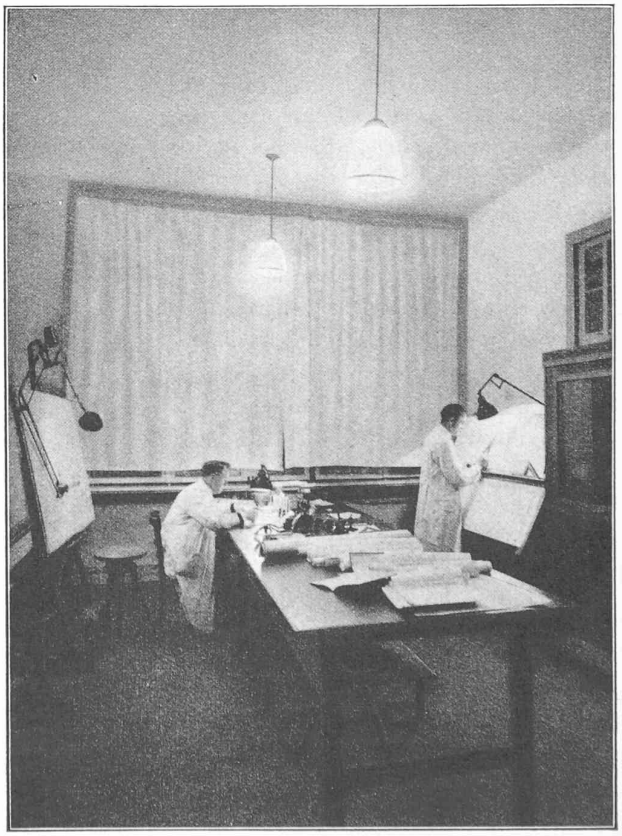


Fig. 10. — Eclairage abondant et économique d'un local par combinaison d'un éclairage général « semi-direct » avec un éclairage local des postes de travail.

[1] Voir *Bulletin technique* du 5 août 1933, page 195.