

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

Band: 5 (1956)

Artikel: Mesure des contraintes dynamiques sur les ouvrages d'art à l'aide des cordes vibrantes

Autor: Bellier, J. / Jacobowitz, G.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-5979>

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: 09.01.2026

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

Ib 7

Mesure des contraintes dynamiques sur les ouvrages d'art à l'aide des cordes vibrantes

Measurement of dynamical stresses with stretched strings

Messungen von Formänderungen mit Hilfe schwingender Drähte

**Medição das tensões dinâmicas nas estruturas por meio
de cordas vibrantes**

J. BELLIER et G. JACUBOWITZ

Télémesures Acoustiques Télémac
Paris

Les facilités que donne la technique moderne pour l'enregistrement oscillographique rendent en principe toute simple la mesure des contraintes dynamiques au moyen des cordes vibrantes.

On sait, en effet, que si une corde sonore est tendue entre deux points d'un ouvrage les variations de sa fréquence dépendent des variations de la contrainte en cet endroit et suivant cette direction. D'autre part il est très simple de transformer les vibrations de la corde en courants électriques sinusoïdaux, les procédés utilisés à cet effet sont connus. Au total il suffit donc de faire que la corde vibre durant toute l'expérience pour qu'un oscillogramme garde la trace de l'évolution de cette contrainte. Ceci, du moins, pour autant que l'extensométrie peut donner des contraintes, c'est-à-dire dans la mesure où il y a un coefficient d'élasticité. Nous supposerons, ici, la question tranchée favorablement.

Tous les avantages de la corde sonore en extensométrie statique se retrouveront nécessairement en extensométrie dynamique puisqu'ils sont inhérents aux procédés de fréquence. On retrouvera ainsi la sensibilité, la précision, la commodité d'emploi et la fidélité qui sont, la dernière qualité surtout, d'un si grand intérêt pour l'étude expérimentale des ouvrages d'art.

A la complication près de l'oscillographe le matériel restera simple et très semblable au matériel courant d'auscultation sonore. Toutefois, vu la trop grande rapidité d'évolution des phénomènes, il ne sera plus possible d'opérer par comparaison, comme en extensométrie statique où la fréquence peut ne servir que de véhicule à la mesure. Il faut, après

l'avoir enregistrée, la traduire directement en contraintes au moyen d'un barème lequel aura été, par exemple, établi par voie théorique et, de préférence, vérifié par voie expérimentale.

D'autre part, il faut prendre garde à ne pas introduire, avec les modifications obligées de l'appareillage, quelques défauts nuisibles. Une première condition supplémentaire s'introduit ainsi, qui vise à la conservation de la fidélité. Il faut que le système d'entretien de la corde, destiné à compenser à tout moment l'amortissement naturel, ne change aucunement la fréquence. C'est affaire de dosage de l'énergie d'entretien et de mise en phase. Que les impulsions d'entretien surviennent à contre temps, ou qu'elles augmentent par trop l'amplitude, et la corde vibrerait en vibration forcée, c'est-à-dire audessus de sa fréquence propre, le décalage risquant, d'ailleurs, de varier dans le temps ou avec la hauteur du son en sorte que toute correction serait aléatoire. Le système d'entretien que nous avons adopté évite, en principe, cette double erreur et, en pratique, il a été vérifié par des essais minutieux que, dans les limites de la sensibilité ordinaire il n'influaît pas sur les fréquences usuelles.

En second lieu on a cherché à étendre la commodité d'emploi au dépouillement et à la traduction des oscillogrammes. Pour nous expliquer sur ce point il nous faut pénétrer un peu plus dans le détail des opérations.

Pour l'application du principe de mesure la première idée qui vient à l'esprit est d'enregistrer la fréquence elle-même de la corde témoin en passant la bande photographique à vitesse suffisante pour que les sinusoïdes soient assez nettement séparées pour le comptage. Cela conduit à des vitesses de déroulement de l'ordre du mètre par seconde. Certes de telles vitesses sont faciles à obtenir mais, outre que la consommation de bande devient élevée, on voit aussitôt que la traduction de l'oscillogramme est, sinon difficile, du moins longue et fastidieuse. Le procédé n'est donc guère utilisable que pour des expériences très courtes. Dans le cas d'un pont, où l'enregistrement aura duré pendant plusieurs secondes, voire plusieurs dizaines de secondes, il faut simplifier la tâche du lecteur.

On y parvient, en même temps que l'on rend les oscillogrammes plus «parlants», plus facilement interprétables qualitativement à vue, en procédant à un changement de fréquence. Si une fréquence de vibration plutôt grande est sans doute nécessaire dans le but d'assurer un découpage assez fin des phénomènes, elle ne l'est pas du tout pour les besoins de la traduction, et, de ce point de vue, l'on a intérêt à l'abaisser.

L'hétérodynage s'obtient très simplement, suivant un procédé classique, en faisant battre la corde témoin avec une corde extérieure initialement déréglée dont la fréquence reste fixe durant l'expérience. Suivant la contrainte les deux fréquences composantes s'éloignent plus ou moins l'une de l'autre, ce qui se traduit acoustiquement par une variation du rythme des battements et sur l'oscillogramme par un écartement ou un rapprochement des noeuds, étant entendu que l'on a pris soin d'égaler l'intensité des 2 sons composants.

La figure ci-après, extraite avec réduction, d'un oscillogramme relatif à un pont de chemin de fer, constitue un exemple typique des résultats que l'on peut obtenir et va nous servir à expliciter, maintenant, la méthode de traduction en contrainte.

L'ouvrage en question est un pont sous rail à 2 travées continues formées de 2 poutres métalliques dont la membrure supérieure est

incorporée au tablier en béton armé. L'extensomètre — ou témoin sonore — enregistré était fixé sur la membrure inférieure sensiblement au milieu d'une des travées. Il marquait donc une extension lorsque cette travée était directement chargée et l'on avait alors la contrainte maximum et une compression lorsque la charge se situait sur l'autre travée.

Etant donné les réglages initiaux des cordes un élargissement des battements correspondait à une contrainte de compression (cas de l'extrême droite de la figure) et un resserrement à une extension (cas de l'extrême gauche).

L'enregistrement inférieur se rapporte au secteur électrique (alt. 50 p.) et sert à la détermination de la vitesse instantanée de déroulement de la bande photographique. Enfin on peut inscrire sur une troisième trace les passages d'un essieu sur des pédales réparties sur le pont pour repérer les positions de la charge en regard de l'oscillogramme principal.

Pour entrer plus avant dans la théorie on sait que lorsque deux vibrations sinusoïdales stables se composent l'intensité résultante varie périodiquement, passant d'un maximum à un minimum, qui est nul si les 2 vibrations sont égales. Acoustiquement le son s'enfle et s'éteint périodiquement : on dit qu'il bat. Sur un oscillogramme la trace du spot hachure une surface de hauteur variable dont, par la suite, nous appellerons « onde » chacun des éléments entre noeuds. Ces ondes ont assez exactement pour enveloppe une sinusoïde si les 2 fréquences sont stables et pour peu que la vitesse de déroulement soit petite relativement à la fréquence des 2 vibrations, ce qui est le cas général.

La période des battements acoustiques est égale à la différence des 2 fréquences composantes ; elle se mesure sur l'oscillogramme d'après la distance des noeuds. La question de savoir quel signe attribuer à cette différence est facile à résoudre, et dans la pratique, il est facile de faire qu'elle ne se pose pas.

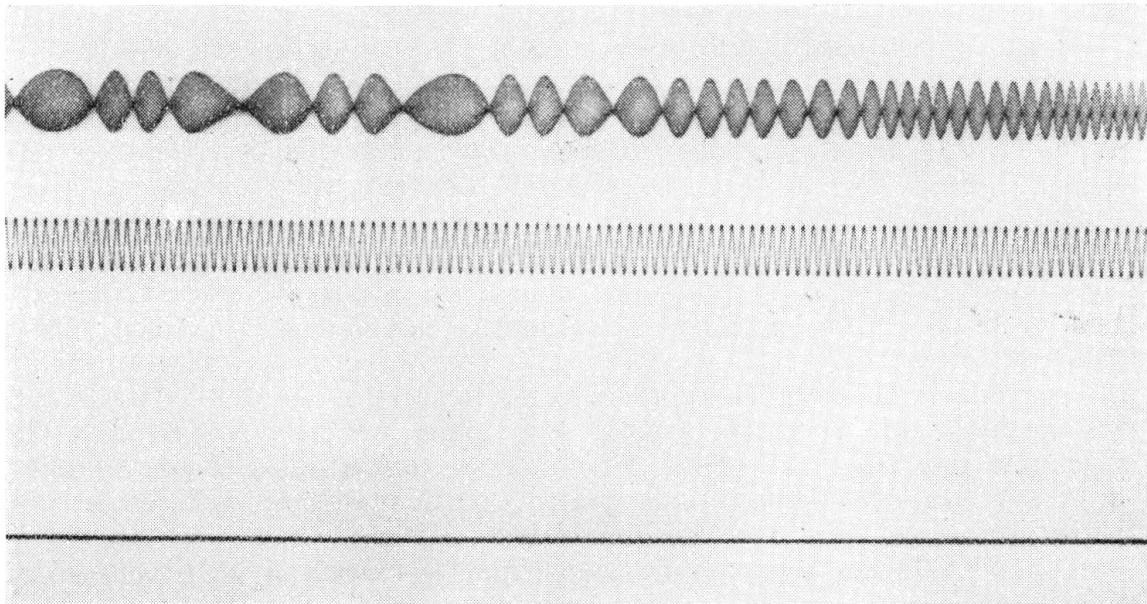
Pour préciser par un exemple considérons une des ondes de l'extrême droite de la figure. Elle définit une fréquence de battements d'environ 45 par seconde. On peut en déduire par addition algébrique la fréquence connue à priori, de la corde fixe.

Auparavant il faut considérer le cas où la tension de la corde témoin — c'est-à-dire sa fréquence — varie dans l'intervalle de battement, c'est-à-dire entre 2 noeuds de l'oscillogramme. Cela se traduit par une distorsion de la sinusoïde enveloppe. La figure ci-jointe en donne de beaux exemples dans sa moitié gauche. Notons au passage que l'on retrouve qualitativement des distorsions analogues et les mêmes alternances de régularité et de distorsion dans les divers oscillogrammes relatifs à des expériences à vitesses différentes pour des positions semblables de la charge roulante sur le pont. Autrement dit, ces détails sont caractéristiques du comportement dynamique de l'ouvrage particulier. Cela montre l'intérêt d'une analyse aussi fine qu'il se pourra.

Dans le cas où l'on pourrait se contenter de moyennes il suffirait de mesurer la distance de 2 noeuds, d'où la fréquence du battement moyen et, après calculs, la contrainte moyenne dans l'intervalle de temps correspondant. Si cet intervalle est court (par exemple de l'ordre de 0,02 sec comme pour l'extrême droite de la figure) l'approximation est sans doute suffisante pour un pont. Mais pour des intervalles plus longs (10 fois plus,

par exemple comme pour les grandes ondes de la figure considérée) on doit être plus exigeant.

La solution se trouve dans la remarque faite plus haut que le contour des «ondes» est, pour les fréquences stabilisées, une sinusoïde avec une très grande approximation étant remarqué, en outre, que les sommets de toutes les ondes sont à la même hauteur. Il en résulte, en effet, qu'en tous les points de même ordonnée la pente de la tangente à la courbe



Extrait d'un oscillogramme

enveloppe est inversement proportionnelle à la longueur du battement instantané laquelle permet de calculer la fréquence instantanée de la corde témoin. Pour faire le dernier pas il suffit, ayant tracé à vue la tangente à l'enveloppe d'une onde irrégulière, de la comparer à la tangente d'une onde régulière de battement connu, par exemple une de celles obtenues avant le commencement de l'expérience.

On arrive ainsi à une finesse d'analyse au moins aussi grande que dans le cas d'ondes très serrées, compte tenu de l'imprécision inhérente au tracé à vue des tangentes.

Possédant maintenant le moyen de traduire dans tous les cas de battement et avec assez de minutie les oscillosogrammes en fréquence instantanée ou, plus exactement, en fréquence moyenne sur un très court intervalle de temps, il reste à voir comment traduire cette fréquence en contrainte.

Nous avons déjà rappelé que l'extensométrie acoustique est basée sur le fait que la fréquence de vibration (n) d'une corde est proportionnelle à l'inverse de sa longueur (l) et à la racine carrée de sa tension (t) et, par conséquent, de son allongement relatif élastique $\frac{d}{l}$.

$$n = \frac{K \sqrt{t}}{l} = \frac{K'}{l} \sqrt{\frac{d}{l}}$$

Autrement dit, l'allongement relatif de la pièce auscultée entre 2 états de l'ouvrage est donné, à un coefficient près, par la différence des carrés des fréquences de la corde témoin entre les 2 états.

En extensométrie statique on se libère de la mesure des fréquences en comparant la corde témoin à une corde étalon dont les allongements sont commandés par une vis micrométrique. L étant la longueur de cette seconde corde (faite du même acier), si l'on maintient l'unisson ($n = N$) les 2 allongements relatifs sont proportionnels :

$$\frac{dl}{l} = \left(\frac{1}{L} \right)^2 \frac{dL}{L}$$

Passant au dynamique il est expédient de se libérer pareillement de la considération des fréquences elles-mêmes en déterminant par avance pour la fréquence fixe choisie la correspondance entre le nombre de battements par seconde, qui définit la fréquence variable, et la lecture sur le tambour du comparateur laquelle est immédiatement interprétable en contrainte.

Ce travail préparatoire est facile et l'on est largement payé par le gain de temps et l'économie de force qu'il procure dans la traduction des oscillogrammes.

On a vérifié par des expériences réelles la commodité d'emploi du procédé de mesures dynamiques que nous venons d'expliquer. Il ne nous appartient pas de produire les résultats et encore moins de les commenter. C'est l'affaire des constructeurs d'ouvrage. Du moins les premières applications nous semblent-elles avoir donné des résultats de nature à intéresser profondément les théoriciens et les calculateurs. Nous pensons donc que l'on gagnerait à organiser plus souvent que dans le passé des mesures de cette sorte maintenant que l'on a un moyen commode de les faire.

RÉSUMÉ

Le dispositif mis au point par les auteurs permet d'effectuer avec facilité des mesures extensométriques en régime dynamique avec des extensomètres à corde vibrante.

Les cordes vibrantes possèdent de nombreux et importants avantages pour l'auscultation des ouvrages d'art. En particulier elles sont seules à se prêter à des observations comparatives sur de longues périodes sans amoindrissement de la fidélité.

Les mesures dynamiques exigent que les cordes extensométriques soient maintenues en vibration pendant tout l'essai, ceci étant obtenu, d'autre part, sans fausser la fréquence naturelle de vibration.

L'enregistrement oscillographique pur et simple des vibrations des cordes résoud théoriquement le problème de la mesure dynamique, mais le dépouillement, à savoir le comptage sur les bandes des fréquences instantanées, serait lent et très fatigant. Les auteurs ont résolu la difficulté en enregistrant les battements de la corde extensomètre avec une corde fixe ou un diapason de fréquence connue. La finesse d'analyse est du même ordre, que les battements soient rapprochés ou espacés, les 2 cas pouvant se rencontrer au cours d'une même expérience.

SUMMARY

The system devised by the authors allows strain measurement under dynamic load conditions by means of stretched string strain gauges.

Stretched strings are well adapted for the auscultation of structures. They are the only device capable of long time comparative observation without loss of fidelity.

For dynamic strain measurement, the stretched strings must be kept vibrating throughout the test without, on the other hand, affecting their natural frequency.

The simple oscillographic recording of the stretched string vibrations solves, in theory, the problem of dynamic measurement but the actual examination of the results, i. e. the counting on the recording graph, of the instantaneous frequencies, would be slow and tiresome work. The authors have solved the difficulty by recording the beats of the stretched string gauge with a fixed string or fork of known frequency. The accuracy remains constant whether the beats are near each other or far apart and both cases may happen in the course of the same experiment.

ZUSAMMENFASSUNG

Nach dem von den Verfassern dargestellten Verfahren können elastische Formänderungen auf einfache Weise mit Hilfe schwingender Drähte gemessen werden.

Diese schwingenden Drähte besitzen zahlreiche und wesentliche Vorteile für die Untersuchungen an Bauwerken. Im besonderen können nur auf diese Art vergleichende Beobachtungen über längere Zeiträume mit gleichbleibender Genauigkeit vorgenommen werden.

Für die Messung der am Bauwerk auftretenden Bewegungen müssen die Messdrähte während des ganzen Versuchs in Schwingung bleiben, ohne dass dabei die Eigenschwingungsfrequenz verfälscht wird.

Die saubere oszillographische Aufzeichnung der Drahtschwingungen bildet theoretisch die Lösung der Bewegungsmessung, aber die richtige Auseinanderhaltung, d. h. die Auszählung bei den Frequenzbändern ist zeitraubend und ermüdend. Diese Schwierigkeit haben die Verfasser dadurch überwunden, dass sie die Ausschläge des Messdrahtes mit Hilfe eines festen Drahtes oder einer Stimmgabel mit bekannter Frequenz ermittelten. Die Messgenauigkeit ist von der gleichen Größenordnung, ob die Amplituden nun eng zusammen oder weit auseinander liegen; beide Fälle können beim gleichen Versuch vorkommen.

RESUMO

O dispositivo estudado pelos autores permite efectuar com facilidade medições extensométricas no campo dinâmico com extensómetros de corda vibrante.

As cordas vibrantes possuem grande número de importantes vantagens para a auscultação das estruturas. São, por exemplo, as únicas

que permitem observações comparativas durante longos períodos sem diminuição de fidelidade.

As medições dinâmicas exigem que as cordas extensométricas sejam mantidas em vibração durante o ensaio, sem, por outro lado, alterar a frequência natural de vibração.

O simples registo oscilográfico das vibrações das cordas resolve teóricamente o problema da medição dinâmica, mas o exame do gráfico obtido, ou seja a contagem nas bandas de registo das frequências instantâneas, seria longo e moroso. Os autores resolveram a dificuldade registrando os batimentos da corda do extensómetro com uma corda fixa ou um diapasão de frequência conhecida. A precisão da análise é da mesma ordem quer os batimentos sejam próximos ou distantes, podendo os dois casos aparecer no decorrer do mesmo ensaio.

Leere Seite
Blank page
Page vide