

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

Band: 3 (1948)

Artikel: L'auscultation dynamique des ponts à la S.N.C.F.

Autor: Cassé, M.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-4049>

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>

Vb1

L'auscultation dynamique des ponts à la S. N. C. F.

Dynamische Untersuchungen der Brücken der S. N. C. F.

Dynamic research of bridges of the S. N. C. F.

M. CASSÉ

Ingénieur à la Division des Ouvrages d'Art de la S. N. C. F., Paris

La question des effets dynamiques subis par les ponts se présente à l'ingénieur sous un double aspect : scientifique et pratique; le premier comprend sans doute le second, mais son étude est actuellement trop peu avancée pour que leurs objectifs ne se distinguent pas nettement par les délais dans lesquels ils peuvent être atteints.

Difficultés de l'étude scientifique des effets dynamiques

L'étude scientifique de la question vise à la connaissance précise des conditions dans lesquelles se produisent les effets dynamiques, de leur grandeur, de la façon dont ils interviennent dans la sécurité des constructions; elle nécessite beaucoup de recherches tant théoriques qu'expérimentales. Jusqu'ici, les études théoriques poussées n'ont pas manqué, les expérimentations assez vastes non plus, la comparaison des résultats obtenus par les deux voies a été tentée. Cependant, il est encore impossible d'évaluer à priori avec quelque précision, pour un élément donné d'une poutre de pont, la différence entre les effets maxima provoqués par une charge en stationnement et les effets maxima résultant du passage de la même surcharge animée d'une vitesse donnée. Sans doute, quelques points ont été éclaircis; des recherches très remarquables conduites avec soin et persévérance, simultanément sur les plans théorique et expérimental, ont permis de reconnaître, par exemple, l'influence des forces périodiques résultant de l'action des contrepoids d'équilibrage des locomotives : les mesures de flèche obtenues concordent avec ce que la théorie permet de prévoir. Mais il s'agit seulement de l'effet d'une cause particulière, que tous les ingénieurs ne considèrent pas comme prépondérante; les résultats solidement établis ne concernent que les flèches des

ouvrages suffisamment longs pour que les mouvements résultant des conditions d'entrée des charges aient le temps de s'amortir avant que le maximum des déformations soit atteint; moins sûrs pour les contraintes dans les membrures, ils restent sujets à caution pour les contraintes dans les treillis; ils supposent d'ailleurs une vitesse constante, des chemins de roulement, du matériel et des convois assez bien constitués pour que des mouvements parasites ne s'amorcent pas.

En fait, interviennent simultanément, dans les effets dynamiques et pour des fractions non négligeables, diverses causes dont on sait mal tenir compte; ainsi, le passage d'une surcharge donnée à une même vitesse ne détermine pas exactement les mêmes effets en raison des conditions toujours incomplètement définies, dans lesquelles le convoi se présente à l'entrée du pont. Ce ne sont pas là des objections théoriques: elles ont été très nettement vérifiées et vivement commentées au cours des essais effectués de 1929 à 1931 sous les auspices de l'U. I. C.

En négligeant même, momentanément, les difficultés résultant de l'indétermination ou de la complexité des conditions initiales, l'étude scientifique des effets dynamiques s'est trouvée freinée par le défaut d'appareils enregistreurs absolument fidèles, notamment pour la mesure des contraintes. Les progrès considérables effectués dans ce domaine pendant la guerre, la mise au point des extensomètres à fil résistant, permettent d'escompter la solution prochaine de cette difficulté; mais la formation des opérateurs et l'exécution des nombreuses mesures nécessaires entraîneront, pour toute observation systématique en campagne, des délais et des frais importants. La seule répétition des observations faites jusqu'ici avec des appareils plus rustiques demandera déjà un temps très long.

D'autre part, l'étude complète des effets dynamiques ne saurait se borner à la détermination des déformations élastiques provoquées par le passage des charges. Il faudra évidemment se rendre compte si les indications d'un extensomètre peuvent être interprétées de même pour des charges statiques et pour des charges dynamiques, si une même extension instantanée correspond effectivement à une même contrainte et dans quelle mesure on peut assimiler, dans l'étude de la sécurité, deux contraintes effectives de même grandeur, l'une fixe, l'autre instantanée. Il semble bien que les observations sur la fatigue des métaux ne s'appliquent pas directement aux éléments de ponts, vu les conditions de variations des efforts et les fréquences auxquelles ils sont soumis. Une étude pertinente de cette seule question exigera aussi de longs délais.

L'étude du problème des effets dynamiques sur les ponts ne paraît susceptible de progresser largement qu'en y employant les méthodes modernes de la recherche scientifique: recours à des équipes spécialisées, chargées de tâches déterminées, et coordination de leurs efforts. Chaque groupe de recherche devrait comprendre des ingénieurs de formations diverses: mécaniciens capables de reconnaître dans l'infinité des processus vibratoires possibles ceux qui doivent effectivement se rencontrer dans un élément d'un tablier complexe et pour quelles conditions de présentation des charges, physiciens connaissant suffisamment les propriétés des matériaux pour se rendre compte de l'influence des variations d'efforts ou de déformation sur les contraintes admissibles dans les ponts, techniciens susceptibles de concevoir et réaliser des appareils donnant sans altération les quantités à mesurer, opérateurs rompus au maniement des appareils et à

leur installation dans les parties les moins accessibles d'une charpente. Les résultats n'apparaîtront sans doute que peu à peu, à condition de ne pas distraire les équipes constituées de la tâche laborieuse qui leur aura été confiée et de les encourager dans leurs recherches sans les chicaner trop s'il ne sort pas très vite de leurs travaux une formule définitive d'impact ne comportant que deux ou trois paramètres.

Nécessité de connaître pratiquement certains aspects des effets dynamiques

En attendant que de telles études aient tiré au clair l'importance et le rôle des effets dynamiques dans les ponts et que des lois chiffrées permettent de les utiliser pratiquement, les ingénieurs qui reçoivent la charge de conserver de vieux ponts ou d'en établir de nouveaux se demandent toujours, comme leurs prédécesseurs d'il y a cent ans: si un convoi passe sur l'ouvrage à une vitesse V , quelle est, en chaque point, la majoration de contrainte par rapport à la contrainte statique? Beaucoup jugent la question un peu académique: sous le régime général des coefficients de majoration réglementaires soit explicites (quand les contraintes admises sont élevées), soit implicites (quand les contraintes admises sont faibles), il ne semble pas (ponts suspendus insuffisamment rigides mis à part) que se soient manifestés des incidents graves résultant d'évaluations trop optimistes. De très anciens ouvrages, bien construits, d'après les contraintes-limites en usage il y a quatre-vingts ans, ont supporté sans renforcement des accroissements considérables des charges et des vitesses des convois de chemin de fer. L'on peut donc soutenir que, si la connaissance précise des effets dynamiques contribue à la satisfaction de l'esprit de l'ingénieur, son influence sur la sécurité et sur l'économie demeure modérée. Mais c'est là une façon de voir trop simpliste.

Le fait que des ouvrages tiennent ne prouve pas que l'évaluation empirique des effets dynamiques ait été assez correcte, mais seulement que les erreurs qui en résultent ne portent pas la probabilité de ruine de ces ponts à une valeur nettement supérieure à celle qui se rencontre dans les constructions courantes. Cette conclusion n'est d'ailleurs pas générale: il arrive, par exemple, qu'au-dessus d'une certaine vitesse, des rivets s'ébranlent, des fissures se propagent, des barres de treillis se mettent à vibrer ou à flamber d'une façon inquiétante. Il vaut mieux avoir reconnu cette circonstance par une étude ou par des essais sur le pont et avoir imposé une limitation de vitesse, plutôt que d'en être informé par des incidents de service.

D'un autre côté, les formules empiriques de majoration peuvent être améliorées; si l'on peut établir qu'un type d'ouvrage est particulièrement favorable à l'atténuation des effets dynamiques, il est normal d'appliquer, à ce type, un coefficient particulier qui permettra, sans réduire la sécurité, de réaliser des économies.

Aussi, la S. N. C. F., sans négliger la question scientifique et générale des effets dynamiques sur les ponts, s'est-elle beaucoup préoccupée d'obtenir des renseignements immédiatement utilisables et des réponses rapides à des questions pratiques touchant la sécurité de ses ouvrages ou l'économie des projets. L'ordre de grandeur des effets dynamiques correspond-il toujours à celui qui résulte des formules réglementaires? Le matériau et le type des ouvrages ont-ils une influence telle qu'elle justifie la préférence

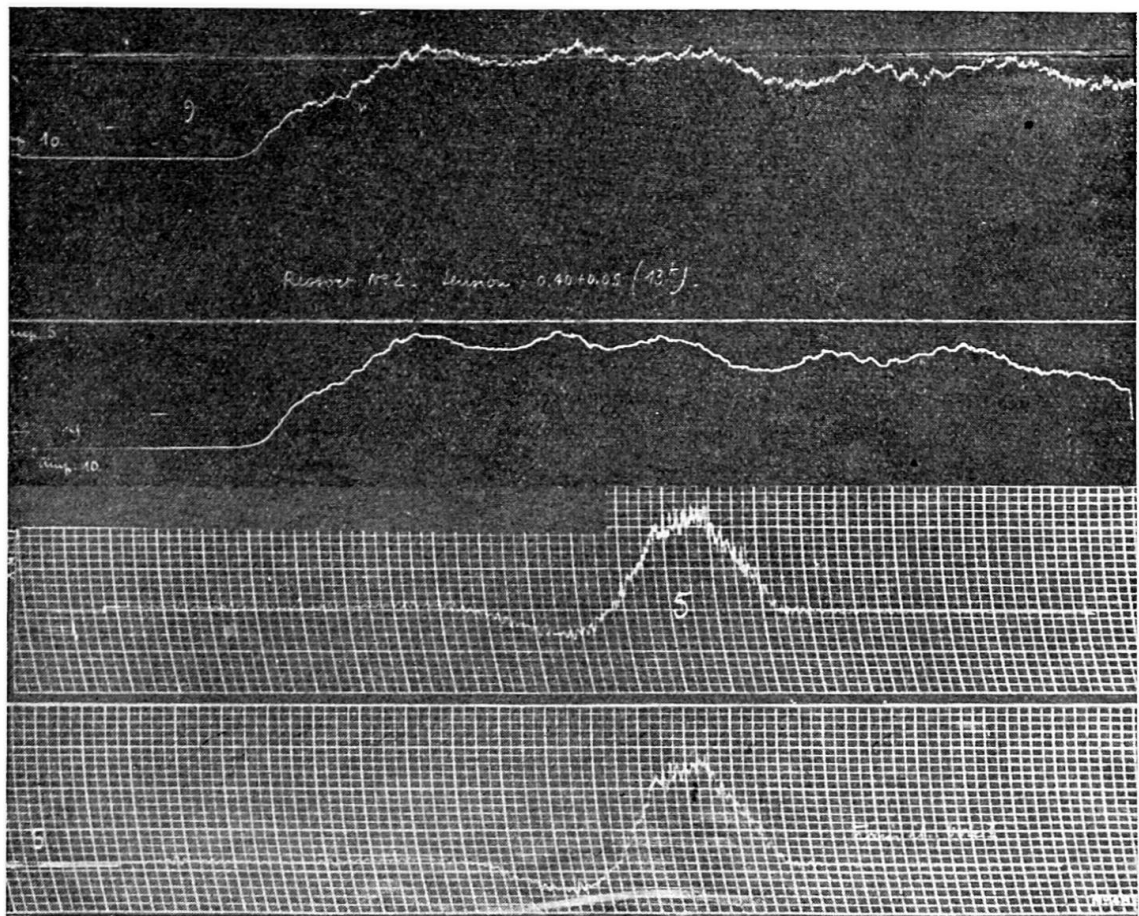


Fig. 1. Différences obtenues dans deux enregistrements de flèches effectués chacun avec deux fleximètres de type classique.

accordée à certains types ou à certaines dispositions particulières? Dans quels ouvrages ou quels éléments d'ouvrages y a-t-il lieu de craindre des mouvements anormaux ou des déformations importantes au passage des convois? Les mouvements que l'on constate sur tel pont sont-ils véritablement excessifs? A quel taux la vitesse doit-elle être réduite pour les rendre acceptables?

Pour répondre objectivement à ces questions ou à d'autres analogues, il faut faire appel à l'expérience. Mais il n'est pas indispensable, pour le but pratique poursuivi, de disposer de moyens aussi importants que ceux envisagés plus haut. L'utilisation d'appareils moins parfaits se justifie quand la simplicité de leur mise en place et de leur manœuvre permet de les confier à des spécialistes d'ouvrages d'art qui, seuls, seront capables de les poser rapidement. Les mesures peuvent ainsi être multipliées dans des conditions diverses sans frais exagérés. De fait, la S. N. C. F. en effectue fréquemment sous des surcharges circulant systématiquement à des vitesses diverses. En dehors des réponses qu'elles apportent, moyennant une interprétation critique convenable, aux problèmes particuliers, ces expériences constituent une documentation permettant de reconnaître certaines lois empiriques. Nous donnerons, au cours du Congrès, un aperçu des résultats obtenus dans cette voie.

Appareils utilisés

Les appareils classiques, fleximètres et extensomètres à enregistrement mécanique, peuvent, pour des observations à objectif pratique et limité, fournir déjà des éléments de comparaison et de classement.

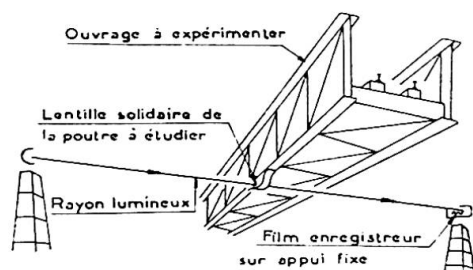


Fig. 2. Fleximètre optique.

Toutefois, pour obtenir des indications plus sûres ou pour procéder à d'autres investigations, de nouveaux appareils ont été mis au point par la S. N. C. F. ou sont en cours de construction : fleximètre, rouligraphe, accéléromètre.

FLEXIMÈTRE

La justification de la création d'un nouvel appareil réside dans la constatation que deux fleximètres amplificateurs de type classique, attachés en des points très voisins et posés dans des conditions paraissant correctes, ne donnent pas exactement le même enregistrement; dans certains cas, rares il est vrai, les graphiques accusent des différences nettes, tant pour l'amplitude que pour l'allure et l'amortissement des oscillations (fig. 1).

L'origine de ces différences réside évidemment dans les vibrations parasites introduites par la transmission, d'où le désir de supprimer celle-ci.

Le fleximètre optique (fig. 2) comprend une lentille achromatique rendue solidaire de la membrure inférieure de la poutre étudiée. Une source lumineuse envoie sur la lentille au travers d'une mince fente horizontale, un pinceau de rayons qui donne une image sur une fente verticale placée devant un dérouleur de papier sensible. Le déplacement du point lumineux et, par suite, celui de la lentille, s'enregistre en une courbe continue.

On emploie assez souvent une lentille de 8 mètres de distance focale, la source lumineuse et l'enregistreur étant placés respectivement à 16 mètres de part et d'autre de la poutre; l'amplification est alors très voisine de 2, mais elle peut être augmentée, le cas échéant, ainsi que la luminosité des images, en prenant une lentille de distance focale différente ou en faisant varier l'éloignement de la source et celui de l'enregistreur.

A défaut de circonstances locales favorables, la source et l'enregistreur sont amenés au niveau de la lentille en les disposant sur des échafaudages robustes placés assez loin du pont pour ne pas être influencés par les trépidations du sol. En opérant à la tombée du jour, on peut se con-

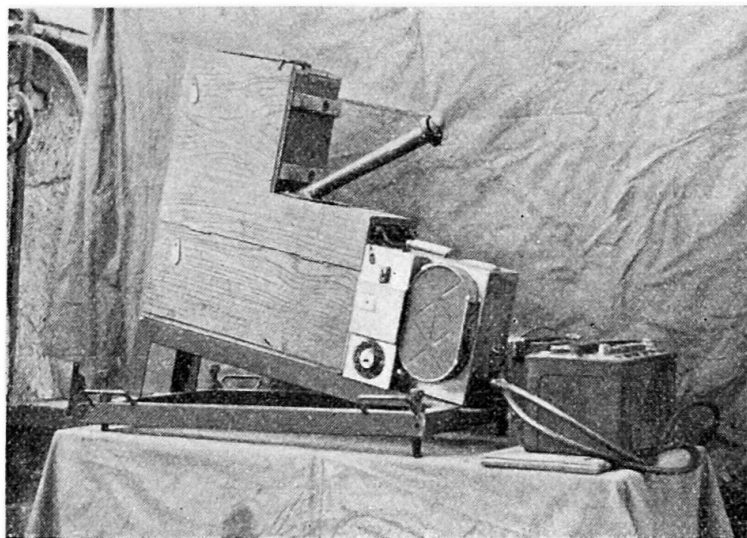
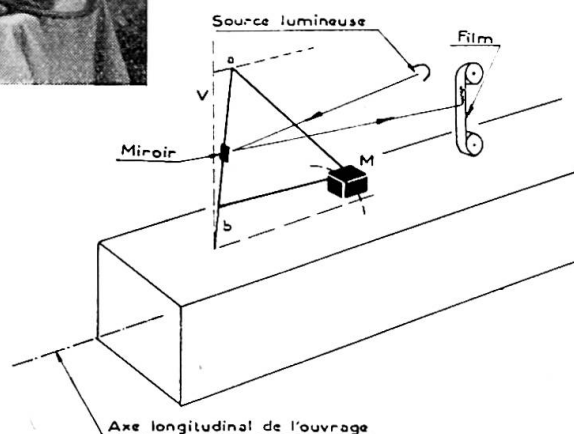


Fig. 3 et 4. Rouligraphe.



tenter d'une source peu intense, ce qui facilite l'installation en pleine campagne.

La lentille étant montée sur un support robuste, solidement fixé au pont, il n'est pas à craindre qu'elle soit le siège de vibrations propres susceptibles d'apporter des perturbations dans l'enregistrement. Les causes d'erreur possibles paraissent limitées au trouble que pourrait apporter, à la propagation des rayons lumineux, une atmosphère hétérogène et variable; cette cause ne semble pas à considérer pendant la courte durée d'un passage.

L'amplification exacte est déterminée, pour chaque essai, en mesurant le déplacement de l'image qui correspond à un déplacement vertical connu de la source.

ROULIGRAPHE

Cet appareil a pour objet principal de déceler et mesurer les vibrations horizontales, peu étudiées jusqu'ici, mais dont l'effet est parfois très sérieux; nous en donnerons des exemples au cours du Congrès. Il utilise le principe que l'on trouve dans la conception de nombreux sismographes, et suivant lequel une masse pendulaire relativement lourde demeure pratiquement fixe quand on ne la soumet qu'à des impulsions de cadence rapide par rapport à sa fréquence d'oscillation; cette dernière est rendue suffisamment lente en utilisant un pendule d'axe quasi-vertical.

Les appareils anciens, basés sur le même système, comportaient des frottements importants résultant, soit des glissières, soit du système d'enregistrement attelé sur la masse; pour pouvoir vaincre ceux-ci, une force de

rappel importante était nécessaire. Il en résulte alors une période d'oscillation trop courte pour que les déplacements du pont laissent la masse pratiquement fixe. Cette imperfection ne permettait guère de les utiliser, et avec beaucoup de réserves, que pour des comparaisons.

Dans le rouligraphe (fig. 3 et 4), on a, au contraire, réduit systématiquement les frottements : la masse pendulaire est suspendue par une tige et s'appuie par une bielle, toutes deux munies d'articulations à billes; l'enregistrement est purement optique. A cet effet, un miroir cylindrique solidaire de l'axe de rotation reçoit d'une source solidaire du bâti de l'appareil un rayon lumineux qu'il renvoie sur la fente horizontale d'un enregistreur dans lequel se déroule, d'un mouvement continu et à des vitesses réglables, un film photographique de 35 mm.

Dans ces conditions, on peut obtenir sans difficulté des périodes de trois secondes avec des frottements insignifiants (en oscillation libre, l'amplitude est réduite de moitié après une trentaine d'oscillations).

L'appareil enregistre, soit en vraie grandeur, soit avec amplification, les déplacements transversaux de cadence inférieure à la seconde, mais, par son principe même, il enregistre également les mouvements angulaires autour d'un axe horizontal perpendiculaire à la direction des déplacements, d'où le nom de « rouligraphe ».

Pratiquement, il est facile, le cas échéant, de séparer les deux mouvements dont les périodes sont très différentes.

ACCÉLÉROMÈTRE

L'emploi d'un accéléromètre conjugué avec un fleximètre ou mesureur d'oscillations (horizontales ou verticales) permet de se faire une idée de la confiance à accorder aux deux enregistrements et de mettre en évidence les vibrations rapides à faible amplitude qui sont peu visibles dans les graphiques d'oscillation.

De nombreux accéléromètres ont été imaginés ou essayés dans les dernières années. La S. N. C. F. dispose notamment d'un accélérographe qui a été signalé au Congrès de 1936 (*Rapport Final*, p. 645), dans lequel les variations de pression résultant des accélérations agissent sur un quartz piezo-électrique. Cet appareil nécessite toutefois, à proximité de l'ouvrage, une installation électrique un peu encombrante; aussi, pour les essais fréquents utilise-t-on un détecteur de vibration à induction et, pour les fréquences basses et d'amplitudes notables, a-t-on prévu un accéléromètre mécanique (à enregistrement optique). Ce dernier est constitué par une barre de torsion encastrée aux extrémités, portant en son milieu une traverse à laquelle est fixée une masse qui peut être éloignée ou rapprochée

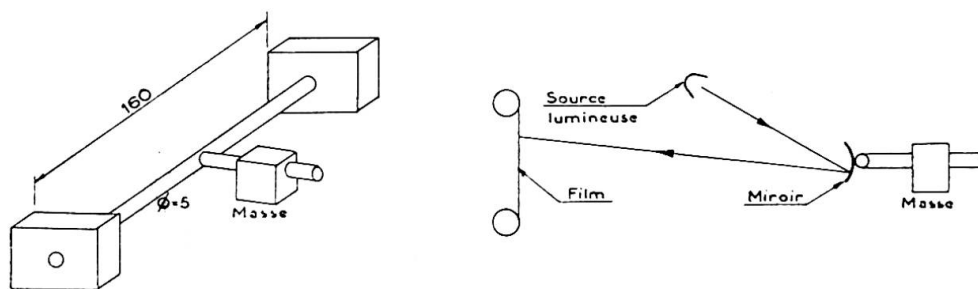


Fig. 5. Accéléromètre.

de la barre de torsion; l'appareil est muni d'un dispositif d'amortissement électro-magnétique.

Résumé

Malgré d'importants travaux théoriques et expérimentaux, on connaît encore très mal l'importance des effets dynamiques auxquels sont soumis les divers éléments des ponts et quelle est leur influence sur la sécurité. Quand on envisage une étude scientifique de la question, on se heurte à l'impossibilité de tenir compte simultanément des nombreux paramètres susceptibles d'intervenir dans le phénomène. La théorie reste hésitante tant qu'on ne se borne pas à des cas schématiques et beaucoup d'expériences demeurent confuses, même lorsqu'on ne discute pas la fidélité des enregistrements. Pour élucider vraiment la question, il faudra sans doute beaucoup de travail à des équipes spécialisées, les unes dans les calculs, les autres dans la construction d'appareils, les autres dans leur mise en place et leurs observations, etc., et coordonner tous ces travaux.

Faut-il jusqu'à ce que des résultats indiscutables aient été obtenus par les chercheurs, se contenter, pour la vérification des ouvrages anciens et l'étude des ouvrages nouveaux, d'utiliser sans trop y croire, les coefficients de majoration en usage dans les divers pays? On ne peut alors répondre aux questions qui se posent fréquemment aux ingénieurs responsables des ponts. Faut-il limiter la vitesse sur tel ouvrage et à quel taux? Y a-t-il intérêt, pour réduire les effets dynamiques, à adopter tel type d'ouvrage ou tel mode de pose? Pour donner une solution pratique à des questions analogues, la connaissance très précise du phénomène d'impact n'est pas nécessaire, puisqu'il s'agit principalement de comparaisons de quelques effets mesurables. Il est loisible d'utiliser les équipes habituelles chargées de l'auscultation des ponts et d'employer des appareils n'enregistrant que les aspects les plus simples des manifestations dynamiques et la S. N. C. F. procède souvent à de telles observations à fins limitées et pratiques. On donnera, au cours du Congrès, des indications sur les constatations faites et certains résultats généraux mis en évidence.

Pour ces observations, la S. N. C. F. a systématiquement recours à des appareils de conception, de mise en place et d'utilisation très simples, dont l'amplification et l'enregistrement sont normalement obtenus par voie optique. Le rapport donne des indications sur des appareils nouveaux conçus dans cet esprit : fleximètre, enregistreur d'oscillations horizontales ou de rotations d'axe horizontal (rouligraphe), accéléromètre vertical.

Zusammenfassung

Trotz zahlreichen theoretischen und experimentellen Untersuchungen ist die Bedeutung der dynamischen Einflüsse auf Brückenbauten und die dadurch beeinflusste Sicherheit noch wenig bekannt. Wenn man eine wissenschaftliche Untersuchung dieser Frage ins Auge fasst, so stösst man auf die Unmöglichkeit, gleichzeitig die zahlreichen Parameter, welche die verschiedenen Erscheinungen charakterisieren, zu berücksichtigen. Die

Theorie bleibt auf unsicherer Grundlage, wenn man sich nicht auf schematisierte Fälle beschränkt und zahlreiche Versuche bleiben unklar, auch wenn über die Genauigkeit der Untersuchungen kein Zweifel besteht. Um die Frage von Grund auf zu klären, wird es zweifellos einer grossen Arbeit von ausgewählten Fachleuten bedürfen, welche einerseits in der Berechnung, andererseits im Bau von Versuchseinrichtungen, andere noch in der Auswertung der Versuche und schliesslich in der Zusammenfassung sämtlicher Ergebnisse spezialisiert sind.

Es scheint sehr fragwürdig zu sein, mangels fester Grundlagen den einfachen Weg der Verwendung von Stosszuschlägen zu beschreiten. Letztere sind nicht in der Lage, auf immer wiederkehrende Fragen der Brückenbeanspruchung eine klare Antwort zu erteilen. Eine für die Praxis geeignete Lösung verlangt nicht notwendigerweise eine genaue Kenntnis des Stossvorganges; denn es handelt sich hauptsächlich um den Vergleich von einigen messbaren Wirkungen. Dafür genügt es, die gewöhnlichen Wege mit den üblichen Bestand von Fachleuten einzuschlagen, welche mit Hilfe von Versuchseinrichtungen nur die einfachsten Erscheinungsformen der dynamischen Beanspruchungen bestimmen, wie es meistens auch die S. N. C. F. tut. Während des Kongresses werden darüber Angaben gemacht und gewisse allgemeine Ergebnisse hervorgehoben werden.

Für diese Beobachtungen hat die S. N. C. F. systematisch Aufnahme-geräte einfacher Art verwendet, deren Uebersetzung sowie Registrierung normalerweise auf optischem Wege erfolgt. Der vorliegende Bericht enthält Angaben über neue Versuchseinrichtungen, die zu diesem Zwecke erstellt wurden: Durchbiegungsmesser, Registrierapparate für horizontale sowie für Drehschwingungen mit horizontaler Axe (rouligraphe) sowie auch vertikale Beschleunigungsmesser.

Summary

In spite of much theoretical and experimental research, little is known of the importance of dynamic influences on bridge-building and consequential safety. If we go into scientific research of this question we are confronted with the impossibility of taking into consideration the numerous parameters which characterise the various phenomena. Theory remains on an unreliable basis unless we restrict ourselves to graphic instances, and numerous tests remain unconvincing, even where there is no doubt as to the accuracy of the research work. To elucidate the question from start to finish will necessitate much work by chosen specialists who are experts, on the one hand, in calculation and, on another hand, in the construction of experimental apparatus, whilst yet others specialise in summing up the tests and, finally, in making a synopsis of the whole results.

Owing to lack of reliable rudiments, it appears very doubtful whether we can adopt the simple method of using thrust increases. It is not possible for the latter to provide a clear answer to the constantly recurring questions of bridge stresses. A solution that is suitable in practice does not necessarily require a precise knowledge of the processus of thrust: for it is principally a matter of a comparison of a few effects that can be measured. For that, it suffices to follow the general procedure with the

usual aid of experts who, with the aid of testing apparatus, only ascertain the simplest outward forms of dynamic stresses, as is mostly done by the French National Railways. Accounts of this will be made during the Congress and certain general results emphasized.

For these observations the French National Railways systematically used recording apparatus of a simple kind, the results being interpreted and recorded optically. The present report contains particulars of new testing apparatus created for this purpose: deflection indicator, recording apparatus for horizontal and rotary vibrations with a horizontal axis (rouligraph), and a vertical acceleration indicator.