

Effets des impacts dans les ponts avec travées métalliques pour chemin de fer

Par D. Mendizábal, Madrid

Professeur du cours de Bâtiments et ponts métalliques à l'École des Ingénieurs des ponts et chaussées et Ingénieur en Chef du Service de la Voie et Travaux de la Compagnie de chemin de fer de Madrid, Saragosse et Alicante

Comme travail de collaboration aux intéressantes études qui doivent être présentées au Congrès international de construction de ponts, et dans le groupe A, section 2, j'estime intéressant de faire connaître les études que j'ai effectuées pour arriver à déterminer la formule actuellement officielle dans l'Instruction en vigueur en Espagne, pour la rédaction des projets de travées métalliques pour le calcul des effets de choc par actions dynamiques ou impact, et dans ce but j'expose ci-dessous ces travaux.

Impact

Effet de choc, par actions dynamiques ou impact

A partir des premières instructions étudiées ces dernières années, il a été donné une grande importance aux actions dynamiques ou de choc, en augmentant, pour compenser ces effets, les valeurs absolues des surcharges en proportions diverses ou en diminuant dans certains cas les coefficients de travail, considérant *impropre* et moins sincère ce système qui est presque prescrit.

Le calcul des efforts, que les diverses pièces d'une travée métallique pour chemins de fer et pour routes, éprouvent au passage des trains, s'effectue en tenant compte du poids propre ou mort de la structure et de celui de la surcharge mobile qui le traverse réduite à une série de forces isolées verticales, à des distances variables entre elles, ou à une charge uniformément répartie par unité de longueur; forces ou charges qui peuvent occuper une position quelconque dans la travée, mais toujours contenues dans son plan longitudinal de symétrie.

On considère le passage du train sur la travée, comme une série de forces *statiques*, variables de position, mais sans tenir compte du *temps* dans lequel ces variations se produisent.

En un mot: On étudie la structure au point de vue *géométrique* et non sous le point de vue *mécanique*.

Or, bien que l'étude des effets de la vitesse de passage des charges est d'une complexité si énorme qu'elle échappe à toute intention d'analyse mathématique, pour le réduire à des formules rigoureusement scientifiques, les conséquences de ces effets, tant pour les travées de chemins de fer que pour celles des routes, mais très spécialement pour les premiers, sont d'une si grande importance qu'elles ne peuvent en aucun moment être négligées pour le calcul d'une travée métallique, l'expérience ayant confirmé que dans certains cas ces charges additionnelles dues à l'«Impact» atteignent des valeurs supérieures à la somme de celles qui sont produites par le poids mort de la travée et de celui de la surcharge mobile, ce qui augmente, par suite, le travail de quelques pièces en plus de 100%.

On doit aux Anglais et aux Américains du Nord la plupart des études et des expériences sur les « Effets de l'Impact » nom qui ne constitue pas une correcte traduction de l'« Impact Effet » de ceux-là mais qui a l'avantage de conserver sa racine en vue de l'unification du vocabulaire scientifique universel.

Causes de l'impact

Elles sont si nombreuses et différentes qu'on arrive à la conviction de ce que malgré le grand nombre qu'on en arrive à découvrir en étudiant la façon d'agir des charges, il en restera toujours quelqu'une dont on n'ait pas tenu compte.

Celles qui ont pu être étudiées jusqu'à ce jour, plus ou moins complètement scientifiquement, sont:

- a) Force centrifuge verticale et horizontale.
- b) Mécanisme de la locomotive et des moteurs.
- c) Frottements et chocs.
- d) Effets vibratoires de résonance.

Toutes ces causes d'impact comportent le facteur *vitesse* et par conséquent on ne tient compte d'aucune d'elles en calculant *statiquement* une travée.

Détermination des surcharges de l'impact.

1^o Étude expérimentale.

Les essais pour déterminer expérimentalement les effets de l'impact ont été effectués, en mesurant les allongements qui se produisent dans les différentes barres d'une travée au passage des trains à des vitesses variables.

Un grand nombre d'extensimètres ont été construits pour cela, mais le plus parfait est le « Photo-enregistreur-FARADAY-PALMER » dont nous expliquerons le principe.

Appareil Faraday-Palmer

Cet appareil a pour but d'enregistrer photographiquement les variations rapides des efforts qui se produisent dans les différentes barres d'une travée métallique au passage des trains à n'importe quelle vitesse, même la plus grande. Fig. 5.

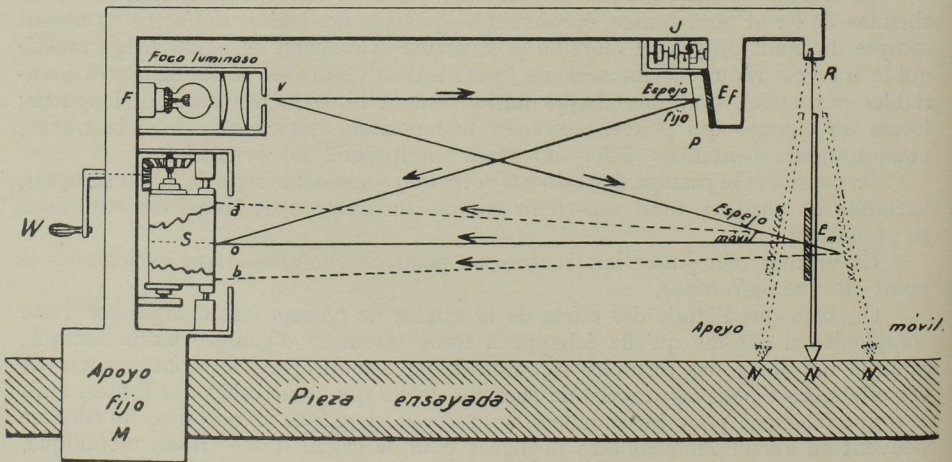


Fig. 5

On obtient cela au moyen de la projection d'un rayon lumineux émis par un foyer fixe *F* invariablement uni à un point de la barre; ce rayon est réfléchi par une

glace tournante E_m lorsque la barre supporte des variations de longueur, sous l'action des efforts.

Ainsi donc, quand la pièce essayée subit un allongement ou un raccourcissement, le point N s'éloignera ou se rapprochera du point M entraînant dans son mouvement la pièce NR unie au corps de l'appareil par la lame flexible R . La glace E_m unie à cette pièce tournera également autour de R avec une déviation angulaire, qui se transmettra doublée au rayon lumineux qu'elle reçoit du foyer F , et se reflète sur une pellicule sensible placée en S .

A l'axe O de cette pellicule arrive aussi un autre rayon réfléchi par une glace E_f fixée au corps de l'appareil; ce rayon est donc mobile, et il impressionne sur celle-là un point de référence.

La pellicule sensible à la lumière, passe en se déroulant d'une bobine pour se rouler sur une autre, comme dans une chambre photographique, actionnée par un moteur électrique ou à main; la vitesse est réglée dans ce cas par une disposition spéciale, en vertu de laquelle en conservant pratiquement constante et égale à 150 tours à la minute, la vitesse que l'opérateur imprime à une manivelle W , la vitesse pour le passage de la pellicule peut être cependant multipliée ou réduite.

Le rayon lumineux oscillant impressionnera, au passage de la pellicule, une ligne sinueuse, pendant que le rayon fixe marquera une ligne droite.

Pour que cette ligne droite soit «un axe de temps» l'appareil est pourvu d'un mécanisme d'horlogerie J , au moyen duquel on couvre et découvre au moyen d'un écran oscillant P , par intervalles d'un quart de seconde, le miroir fixe E_f , d'où il résulte que cet axe apparaît comme une ligne de raies, dont chacune représente, à une certaine échelle, un quart de seconde, cette échelle pouvant être changée, en variant seulement la vitesse de passage de la pellicule.

En admettant que, dans la période élastique du matériel qui constitue la barre essayée, les déformations sont proportionnelles aux efforts qui les produisent, il est facile de calibrer au préalable l'appareil au moyen d'un dynamomètre, de façon à ce que l'échelle sur laquelle doivent être mesurées les ordonnées de la courbe sinueuse décrite par le rayon oscillant, soit connue.

D'après le côté sur lequel cette courbe se trouve par rapport à l'axe de référence, elle représentera des tensions ou des compressions éprouvées par la barre.

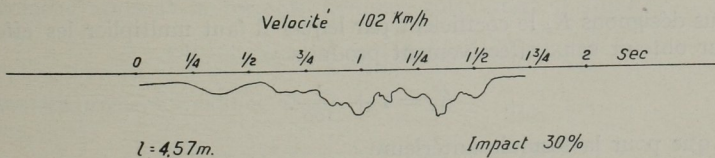


Fig. 6

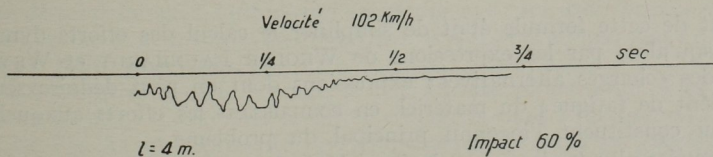


Fig. 7

Avec cet appareil il a été obtenu des courbes d'efforts dynamiques, comme celles indiquées, figures 6 à 8 dans lesquelles on observe bien nettement les grandes oscillations des efforts pour divers coefficients d'impact.

Les ordonnées de la ligne moyenne de chaque courbe sinueuse représenteraient des efforts statiques produits par le train agissant en repos, dans chacune des positions, le long de la travée, c'est-à-dire, les efforts que le calcul donnerait sans tenir compte des effets de l'impact, efforts qui résultent toujours inférieurs à ceux qui sont effectivement produits lorsque la charge passe avec vitesse.

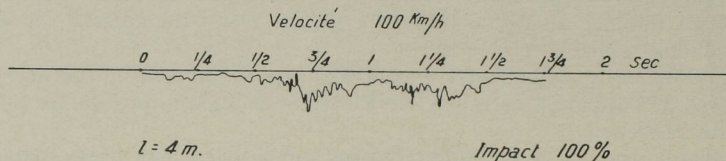


Fig. 8

La relation entre les ordonnées maxima et les moyennes, mesure l'accroissement de l'impact dans chaque expérience.

En prenant comme abscisses les différentes ouvertures des travées essayées et comme ordonnées l'augmentation pour cent de l'effort maximum de calcul par rapport à celui de l'impact on obtient, comme représentation du résultat de chaque essai, un point dont l'abscisse correspond à l'ouverture du pont et l'ordonnée à la relation pour 100 de l'effort maximum enregistré, au maximum théorique calculé.

On a ainsi pu obtenir des graphiques comme ceux de la feuille 1 dont on en a prétendu obtenir des formules simples, qui représentées graphiquement correspondent à certaines courbes qui réunissent les résultats isolés indiqués par les points.

Formules empiriques

La première formule dont on se souvient est celle qui fut présentée en 1887 par C. C. SCHNEIDER, Président de l'Association Américaine d'Ingénieurs Civils, Cette formule est

$$I\% = \frac{152,4}{l} - 30,$$

$I\%$ est l'augmentation pourcentuelle de l'impact, et l l'ouverture théorique en mètres.

Si nous désignons K_i le coefficient par lequel il faut multiplier les efforts statiques pour obtenir ceux effectivement produits

$$K_i = 1 + \frac{1}{100}.$$

Ainsi que pour la formule antérieure

$$K_i = 0,7 + \frac{1,524}{l}.$$

Le but de cette formule était de simplifier le calcul des efforts dynamiques évalués jusqu'alors par les expressions de WHOLER LAUNHARDT et WEYRAUCH, relatifs à des «charges alternatives» expressions dont on peut déduire seulement le «coefficient de fatigue» du matériel, en connaissant les efforts auxquels il est soumis, qui constituent l'inconnu principal du problème.

Huit années plus tard apparut la formule de PENCOYD:

$$I\% = \frac{91,44}{91,44 + l}$$

qui fut adoptée dans les «Instructions» de l'«American Railway and Maintenance Association» de 1905, 1906 et 1910.

Cette formule donne des résultats très bas pour de petites ouvertures et très élevés pour de grandes ouvertures, les expériences sur lesquelles elle est basée ayant été faites avec des ouvertures intermédiaires de 10 à 30 mètres.

Le Maj. MOUNT effectua des expériences sur des petites ouvertures et obtint des valeurs de $I^0/0$ qui atteignèrent 159 $^0/0$ et proposa la formule

$$I^0/0 = \frac{3657}{27 + l}$$

qui donne des valeurs très élevées pour les grandes ouvertures.

Par contre la formule:

$$I^0/0 = \frac{2787}{27,8 + l^2}$$

acceptée dans l'instruction de la «American Ry. Eng. Association» de 1920, a le défaut de donner pratiquement les mêmes valeurs de $I^0/0$ pour des ouvertures inférieures à 10 mètres.

Une autre formule parmi celles proposées a été:

$$I^0/0 = \frac{2286}{15,2 + l}$$

avec un critérium opposé à celle de PENCYD et qui donne des résultats exagérément hauts pour les petites ouvertures et trop bas pour les grandes.

La formule de WADDELL

$$I^0/0 = \frac{5030}{45,7 + l}$$

est semblable à celle du Maj. MOUNT, avec le même défaut.

Nous mentionnerons à titre de renseignement historique la formule française de RABUT:

$$I^0/0 = \frac{100}{1 + \left(\frac{l}{4}\right)^2}$$

car elle donne des valeurs insignifiantes.

Finalement apparut la formule nommée du «quart d'ellipse»

$$I^0/0 = 125 - \frac{1}{8} \times \sqrt{6562 - 10,8l^2}$$

qui fut postérieurement modifiée ainsi:

$$I^0/0 = 135 - \frac{1}{6} \times \sqrt{5315l - 10,8.l^2}$$

et comme son nom l'indique représente un quart d'ellipse tangent aux axes, aux extrémités de ses demi-axes, formule qui enveloppe avec une assez grande exactitude les résultats éprouvés pour toutes les ouvertures, et qui a été adoptée par l'Association d'Ingénieurs Nord-Américains.

Sur le fondement de cette formule, la plus parfaite aujourd'hui, nous parlerons plus tard au moment d'examiner la formule adoptée dans l'Instruction espagnole.

Sur la Fig. 11 on représente graphiquement les courbes correspondantes à ces formules et on ajoute pour leur comparaison celle qui est en vigueur en Espagne.

2^o Étude analytique

Lorsqu'une travée métallique est parcourue par la surcharge elle subit une déflexion élastique qui transforme sa ligne rasante en une courbe plate verticale correspondante à l'«élastique» de la structure après la déformation, ce qui origine

par conséquent une force centrifuge qui s'additionnera ou se soustraira de l'action de la gravité suivant le sens de la concavité de cette courbe.

Désignant par P le poids de la surcharge, V sa vitesse et r le rayon de courbure de l'élastique, la valeur de la force centrifuge en un point sera :

$$f = \frac{P V^2}{g r}$$

pour les poutres ou pièces d'une grande rigidité soumises à la flexion nous savons que

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{E I}$$

où M représente la loi de variation du moment flecteur.

En substituant cette valeur de l'inverse de r dans l'expression antérieure

$$f = \frac{P V^2}{g} \times \frac{M}{E I}$$

ce qui nous donne la valeur de la surcharge due à la force centrifuge en fonction des quantités qui sont connues.

Pour simplifier cette expression nous appellerons p la surcharge en kg/m; m le poids mort de la travée dans la même unité, et en admettant alors que la hauteur de la poutre soit $\frac{1}{10}$ de la portée et la charge de 10 kg/mm² on parvient à la formule de l'impact

$$I^0/0 = 0,3 \frac{V^2}{l} \cdot \frac{p}{p+m}.$$

Nous pouvons encore simplifier cette expression en considérant que le poids mort d'une travée est une quantité qui dépend *presque* en totalité de la portée pour chaque type de surcharge. Bien entendu lorsqu'il s'agit de structures couramment employées.

Avec une approximation suffisante nous pouvons admettre que la relation $\frac{p}{p+m}$ varie par rapport à la portée comme les ordonnées d'une ligne droite descendante, dont l'équation est :

$$\frac{p}{p+m} = y = 1 - \frac{l}{500}$$

et en substituant cette valeur dans la formule antérieure, nous aurons

$$I^0/0 = 0,3 V^2 \left(\frac{1}{l} - 0,002 \right).$$

Pour la vitesse de 80 km/h, c'est-à-dire $V = 22$ m/s il résulte,

$$I^0/0 = \frac{145,2}{l} - 0,29.$$

Ces formules donnent des valeurs d'impact très petites pour peu que l'on fasse grandir la portée, mais il faut considérer que pour son établissement on a tenu compte seulement d'une des causes de l'impact représentant, par suite, une espèce de limite inférieure seulement.

La force centrifuge horizontale se produit également lorsque la travée se défecte par l'action du vent.

Ainsi donc, dans le calcul des entretoises il y a lieu de considérer *toujours* que la travée reste *courbe*, son rayon étant donné par la même expression que nous trouvons antérieurement.

Cette cause de l'impact influe sur la flexion principale de la travée, et par

conséquent on ne doit en tenir compte que lorsque l'on étudie la rigidité transversale de la structure.

Effet des mécanismes de la locomotive

Sous ce titre on comprend les effets du piston sur la bielle, les contrepoids non équilibrés et la disymétrie de la locomotive.

Le premier s'explique en considérant que le piston transmet obliquement son effet à la roue, et par suite, dans les changements de direction il se produira des forces verticales. Fig. 9.

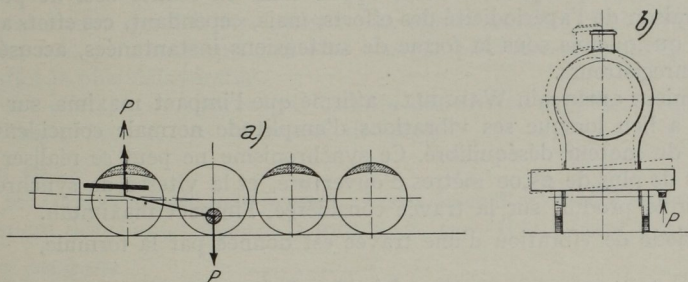


Fig. 9

Ces efforts peuvent être équilibrés en certaine façon au moyen de contrepoids dûment calculés, mais toujours il restera des forces non équilibrées comme par exemple, celles qui se produisent par le décalage des manivelles d'un même essieu, ce qui produit des efforts disymétriques de l'un et l'autre côté de la locomotive qui tendent à soulever l'un plus que l'autre, en chargeant par conséquent d'une façon inégale les deux rails.

Tout cela a été l'objet d'une étude laborieuse pour déterminer les différentes charges calculées sur chaque roue, suivant les positions de la bielle.

Et l'on arrive à la conclusion paradoxale, en apparence, de ce qu'en *augmentant le poids d'une locomotive* qui passe sur une travée métallique peuvent *diminuer les efforts* sur les pièces de cette travée.

On obtient cela simplement au moyen de masses additionnelles équilibrées, ce qui a conduit au résultat d'*imposer aux fabriques de locomotives, sur les cahiers de charges* de ne pas figurer le poids théorique que chaque essieu transmet en repos, mais le poids réel qui se produit lorsque la locomotive est en marche.

Cet effort dépend de la vitesse mais plus principalement de l'admission de la vapeur dans le cylindre, de façon qu'il peut être maximum au moment du démarrage où l'admission est également maximum et minimum à des grandes vitesses avec le régulateur fermé.

Comme il est vu, l'étude montre que le besoin de *corriger sur les locomotives et non sur les travées* les effets dynamiques mentionnés étant donné que leur effet nuisible se fait sentir également sur le reste de la voie.

Frottements et chocs

Ces deux causes d'effet d'impact dont l'étude analytique est encore plus difficile que les antérieures, comprennent les frottements produits par les freins qui se traduisent en une tendance au glissement longitudinal de certaines pièces de la travée par rapports à d'autres, et les chocs produits par les roues pendant les mouvements de « lacet » de la locomotive et des wagons et très spécialement de l'effet de « fouet », à la queue du train.

Ces effets grandissent sans doute avec la vitesse, mais ils n'ont pu être évalués, et nous sommes obligés d'admettre les résultats expérimentaux.

Pour les diminuer, on ne peut faire plus que donner à la voie la rigidité la plus grande dans la travée et la largeur minimum acceptable et constante.

Effets de résonance

Les effets de résonance plus ou moins parfaits peuvent être produits sur certaines pièces au passage des essieux. Théoriquement, si la fréquence des efforts des charges coïncidait avec la période propre de résonance de la pièce, celle-ci se casserait inmanquablement quelques secondes après. Mais en réalité ceci ne peut arriver jamais en raison de l'apériodicité des efforts, mais, cependant, ces effets atténués se produisent quelquefois sous la forme de surtensions instantanées, accusées par les appareils enregistreurs.

L'Ingénieur américain WADDELL, affirme que l'impact maxima sur un tablier métallique a lieu lorsque ses vibrations d'amplitude normale coïncident avec les impulsions du moteur déséquilibré. Ce synchronisme ne peut se réaliser que dans des travées de plus de 25,00 mètres d'ouverture, et la vitesse de synchronisme ou vitesse critique produit sur la travée considérée, l'impact maximum.

La période de vibration d'une travée est donnée par la formule,

$$T = \sqrt{\frac{(m + p) d}{p \times 0,3048}}$$

T étant la durée en secondes, m et p le poids mort et surcharge en kg par mètre linéaire et d la déformation statique en mètres due au poids p mesurée directement.

Conclusions

D'après ce que nous avons vu dans l'étude théorique de l'impact, nous pouvons affirmer que, en réalité, il est impossible d'établir *mathématiquement* une formule exprimant l'accroissement de l'impact en fonction des divers facteurs qui y interviennent.

Nous nous trouvons en présence d'un cas analogue à celui de la majeure partie des formules de l'Hydraulique, par exemple.

Il est nécessaire d'avoir recours à l'expérimentation dont les résultats préalablement examinés, après une analyse scientifique, peuvent servir de base pour l'établissement d'une fonction mathématique qui les relationne entre eux.

Ayant donc devant les yeux les résultats expérimentaux, nous avons essayé d'établir cette fonction en prenant comme variables uniques, l'ouverture de la travée et l'accroissement d'impact pour pouvoir la représenter par une courbe plane.

Nous pouvons considérer la vitesse variable d'une façon pratique en prenant comme type sa valeur maximum admissible pour les chemins de fer espagnols de premier ordre, ce qui n'empêche pas de réduire à une certaine échelle les ordonnées de cette fonction lorsqu'elles doivent être appliquées à des travées pour chemins de fer où l'exploitation se ferait à des vitesses plus réduites.

Quant aux facteurs *surcharges* et *poids mort*, le premier est bien défini pour chaque ouverture et le second peut s'exprimer aussi en fonction de celle-ci, comme nous avons vu, d'une façon suffisamment approchée pour les types de structures couramment utilisées.

Ainsi on ne commet pas d'erreur grave en choisissant une formule d'impact qui dépende seulement de l'ouverture de la travée puisque dans ce facteur peuvent être réunis tous les autres, pour un type d'exploitation de chemin de fer.

Passons en revue les prescriptions des diverses instructions en vigueur, et plus tard, en tirant des conséquences, qui furent utilisées pour être traduites en

propositions pour l'instruction actuellement en vigueur en Espagne, nous reviendrons sur ce point si intéressant.

Instructions en vigueur

Instruction américaine

L'augmentation sur les efforts calculés par les méthodes ordinaires est donnée par la formule suivante:

$$I = S \frac{91,5}{L + 91,5}$$

I est l'augmentation qui doit être ajoutée aux efforts calculés, S ces efforts, et L la longueur de voie en mètres qui doit être chargée pour produire sur la pièce dont il s'agit l'effet le plus défavorable.

Pour cet effet on ne tiendra pas compte des efforts supplémentaires déduits, latéraux, longitudinaux, centrifuges ni de vent.

Instruction suisse

Pour les travées métalliques jusqu'à 15,00 mètres d'ouverture théorique inclus, on augmentera des charges suivant la formule $2(15 - l)\%$ l étant cette ouverture.

Instruction française

En date du 10 mai 1927, le Gouvernement français a édicté une disposition en vertu de laquelle on définit et additionne quelques-unes des prescriptions de l'Instruction pour la rédaction des projets de travées métalliques, du 8 janvier 1915; l'une des plus importantes et neuves, est celle de considérer comme nécessaire l'effort supplémentaire produit par effet de l'impact, dont on n'avait pas tenu compte dans la première disposition officielle.

On recommande la formule ci-après:

$$I\% = 1 + \frac{0,4}{1 + 0,2L} + \frac{0,6}{1 + 4\frac{P}{S}}$$

où L est la longueur de la pièce affectée par les surcharges, S le poids total de celle-ci, et P son poids propre ou sa charge permanente.

Comme nous l'avons déjà indiqué nous n'estimons pas convenables les formules ayant cette disposition, car il a été déjà dit que la valeur de P correspond presque toujours et est proportionnelle à l'ouverture.

Instruction argentine

Pour les éléments du plancher ainsi que pour les petites travées jusqu'à l'ouverture où ces effets seraient déjà moindres que ceux du train normal, on les calculera pour le passage des charges ci-après.

↓ T	1,50	↓ T	↓ T	1,40	↓ T	suivant qu'il s'agisse de
24		24	18		18	voie normale ou étroite.

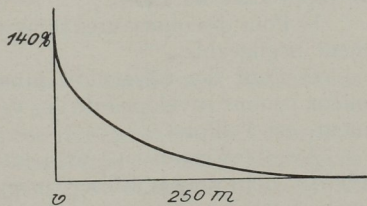


Fig. 10

En outre les charges pour des éléments du plancher ainsi que pour celles des poutres principales de 15,00 mètres d'ouverture comme maximum devront être augmentées suivant la formule $2(15 - l)\%$ représentant l'ouverture correspondante.

Instruction canadienne

On appliquera avec le même critérium que pour l'instruction américaine, la formule indiquée ci-après

$$I = S \frac{30.000}{30.000 + L^2}$$

les lettres ayant la même signification que pour celle-là.

On ne tiendra pas compte non plus des efforts longitudinaux, latéraux, centrifuges ni du vent.

Instruction belge

Elle n'indique rien à ce sujet.

Instruction allemande

Les moments flecteurs et les efforts tranchants auxquels sont soumises toutes les pièces, seront multipliés par le coefficient de choc, suivant les formules indiquées à la suite, fonctions de l'ouverture théorique des travées et du type de celles-ci en ce qui concerne la position et le placement de la voie.

Travées avec rails directement appuyés sur les poutres principales $\varphi = 1,20 + \frac{17}{l + 20}$.

Travées avec des rails appuyés au moyen de traverses sur les poutres principales $\varphi = 1,19 + \frac{21}{l + 46}$.

Travées avec voie sur le ballast $\varphi = 1,11 + \frac{56}{l + 144}$.

Pour les poutrelles et longerons du tablier, on prendra comme longueur de calcul, l'écartement entre les plans moyens des poutres principales ou entre les poutrelles respectivement.

Dans les travées de poutres continues d'ouvertures diverses, on prendra pour chacune l'ouverture correspondante.

D'après une analyse minutieuse, la formule de l'impact doit réunir les conditions suivantes:

a) Pour des petites ouvertures, la valeur de l'accroissement de l'impact doit se rapprocher de 150%.

b) Pour des ouvertures supérieures à 200 mètres, l'effet de l'impact est pratiquement négligeable.

c) Pour des ouvertures intermédiaires, la courbe dont la forme s'adapte le mieux comme enveloppante des valeurs maxima de l'impact obtenues expérimentalement, est l'ellipse.

Avec ces conditions on peut immédiatement établir l'équation d'une ellipse, Fig. 10, dont nous n'utiliserons qu'un quart en lui imposant les conditions d'avoir pour demi-axes, $a = 250$ (ouverture pour laquelle nous supposons que l'impact est annulé) et $b = 140$ (impact maximum lorsque l'ouverture tend à s'annuler).

Cette équation serait (par rapport au centre)

$$y = + \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - x^2}$$

et par rapport aux tangentes aux extrémités des demi-axes qui nous intéressent

$$I = b - \frac{b}{a} \sqrt{2al - l^2}$$

de sorte que substituant les valeurs a et b nous aurons l'équation:

$$I \text{ ‰} = 140 - 0,56 \sqrt{500l - l^2}$$

et le coefficient K_i par lequel il faut multiplier chaque valeur de calcul pour tenir compte de l'impact, sera :

$$K_i = 1 + \frac{I}{100}.$$

Dans la Fig. 12 est représentée graphiquement cette courbe, et figure également un état des valeurs numériques.

En résumé, nous sommes arrivés à une courbe d'impact analogue au « quart d'ellipse » américain, mais déduite directement avec nos unités, pour que les coefficients ne soient pas compliqués.

Sur les Fig. 11 et 13 figurent représentées ces courbes avec toutes celles qui correspondent aux formules théoriques recommandées par divers auteurs

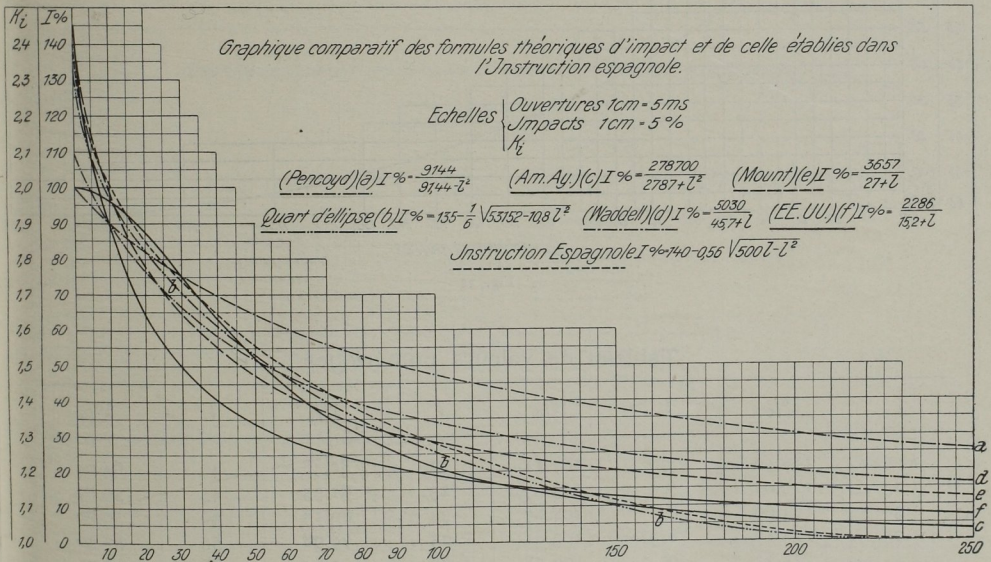


Fig. 11

et celles qui ont été prescrites comme obligatoires dans les diverses instructions en vigueur.

On peut apprécier dans la première que la courbe représentative de la formule espagnole jusqu'à 30 mètres d'ouverture peut être considérée comme la plus élevée de toutes; de 30 à 70 mètres elle continue dans une situation analogue à l'exception de la formule de PENCOYD, et à cette ouverture elle est coupée par celle qui correspond à la formule recommandée par WADDELL; dans cette situation elle se maintient jusqu'à 100 mètres et passe à occuper une situation inférieure à celle de toutes qui y sont représentées sauf celle du quart d'ellipse théorique.

Cette position est estimée logique, car il n'y a aucun doute de ce que pour une ouverture déterminée pour laquelle les poids des structures augmentent considérablement dans la même proportion l'effet de l'impact doit s'annuler ce qui n'arrive pas aux cinq autres courbes représentées sur ladite feuille.

En outre, comme nous l'avons déjà dit, il est naturel que cela se passe ainsi, car pour des petites ouvertures il doit être considérable, étant donné la masse et le poids réduits des travées et les surcharges dynamiques très grandes, diminuant jusqu'à disparaître pour une ouverture déterminée.

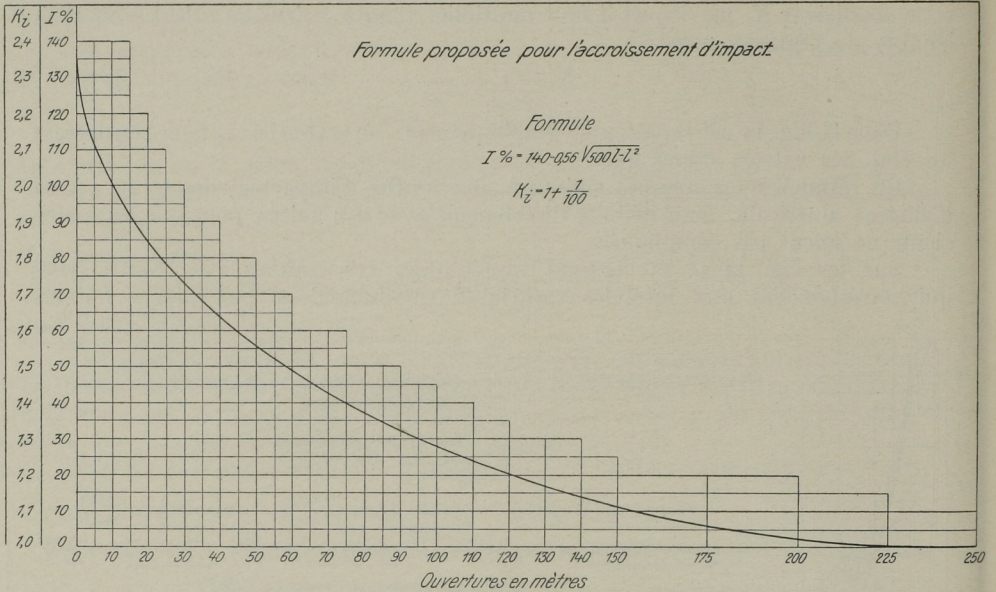


Tableau de valeurs numériques

l	$I\%$	l	$I\%$	l	$I\%$	l	$I\%$
1	127,50	7,0	107,11	22	82,58	40	64,04
1,25	126,02	7,5	105,97	23	81,35	45	59,87
1,50	124,69	8	104,87	24	80,15	50	56,00
1,75	123,47	8,5	103,81	25	78,98	55	52,39
2	122,33	9	102,78	26	77,84	60	49,01
2,25	121,26	9,5	101,77	27	76,72	65	45,84
2,50	120,25	10	100,80	28	75,62	70	42,85
2,75	119,30	11	98,99	29	74,56	75	40,02
3	118,38	12	97,15	30	73,51	80	37,35
3,25	117,50	13	95,45	31	72,47	85	34,83
3,50	116,66	14	93,81	32	71,49	90	32,37
3,75	115,85	15	92,24	33	70,48	95	30,16
4	115,06	16	90,72	34	69,52	100	28,00
4,50	113,56	17	89,26	35	68,56	125	18,76
5	112,10	18	87,84	36	67,63	150	11,69
5,50	110,80	19	86,66	37	66,71	175	6,45
6	109,51	20	85,14	38	65,81	200	2,83
6,50	108,29	21	83,84	39	64,92	250	0,00

En examinant la Fig. 13 sur laquelle on représente les courbes graphiques des formules prescrites dans les Instructions en vigueur, on peut faire des observations analogues; dans la formule espagnole les surcharges maxima correspondent jusqu'à 10 mètres d'ouvertures ce qui en réalité peut être traduit pratiquement par la prohibition d'employer des travées métalliques d'une ouverture

si réduite à partir de 10 mètres et jusqu'à la fin du graphique apparaissent comme ordonnées maxima la courbe qui correspond à l'Instruction canadienne.

De 10 à 25 mètres la courbe espagnole continue ayant les cotes les plus élevées, et pour cette ouverture en plus de la canadienne, la courbe américaine passe au-dessus d'elle; à 85 mètres elle passe sous la courbe allemande et, finalement à 175 mètres elle reste inférieure à la française.

Des considérations analogues à celles exposées, en examinant le graphique antérieur se présentent, et l'on obtient comme résultat que la courbe de l'Instruction espagnole est la plus logique de toutes les autres étudiées.

Comme conséquence de l'étude réalisée lorsqu'on proposa aux Autorités la nouvelle instruction, celles-ci acceptèrent la rédaction de l'article suivant qui en fait partie:

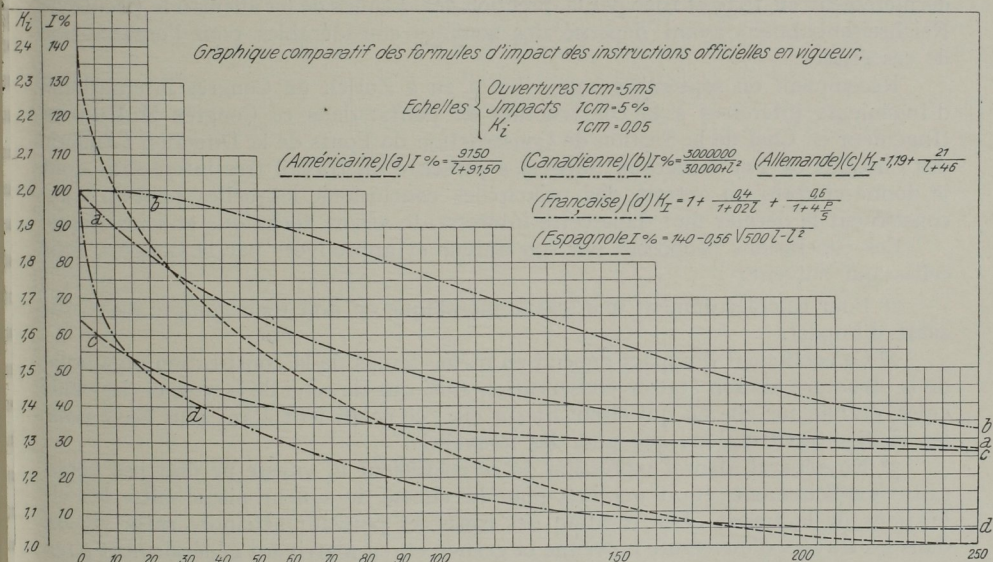


Fig. 13

Article huitième. Les efforts statiques calculés pour tous les éléments qui constituent la structure d'une travée métallique, par l'action des surcharges prescrites dans cette Instruction, seront augmentées en un % déterminé par la formule:

$$E' = E \left(1 + \frac{I}{100} \right)$$

E et E' étant les efforts respectivement accrus par l'action dynamique et calculée comme conséquence de l'action des surcharges.

Les valeurs diverses de I pour les différentes ouvertures l seront trouvées par la formule:

$$I = 140 - 0,56\sqrt{500 - l^2}$$

Lorsque l'effet dynamique ou de choc sera pris en considération on ne devra pas tenir compte pour le calcul des efforts sur les diverses pièces, des effets supplémentaires calculés, comme par exemple les effets latéraux, longitudinaux, de force centrifuge, vent, etc.

Études postérieures.

Après avoir été officiellement publiée l'Instruction espagnole, les diverses études réalisées ces dernières années, dont leurs résultats n'étaient pas connus, ont été divulguées; leur examen ne modifie point les raisons que j'ai eues en proposant la formule de l'impact établie officiellement aujourd'hui, étant donné que les enseignements tirés de celles-ci, conduisent à la conviction que malgré qu'il s'en faille beaucoup pour que ces règles soient complètement étudiées, elles n'ont pas été perfectionnées par suite desdites études et expériences.

Celles-ci ont été effectuées par les Chemins de fer fédéraux suisses (Schweizerische Bundesbahnen) pendant les années 1917 à 1926; dans l'Inde par la commission spéciale nommée à cet effet (India Bridge Committee), de 1918 à 1921; dans les chemins de fer anglais (Ministry of Transports) pendant 1924 à 1926 et, dernièrement en 1925 et 1926 par la direction des chemins de fer allemands (Deutsche Reichseisenbahnen) ayant dépensé des sommes considérables pour l'organisation de ces études.

Récemment en septembre 1926, il y a eu à Zurich un Congrès international d'Ingénieurs intéressés à la construction de ponts; dans ce Congrès M. BUHLER (Ingénieur en Chef de la Section de Construction de Ponts de la Direction Générale des Chemins de Fer Généraux Suisses) a présenté un travail très intéressant dont je donne ci-après un extrait des principales conclusions, lesquelles peut-on dire, constituent le dernier mot dans cette intéressante affaire technique et scientifique.

Ces conclusions proposées par son auteur et approuvées par le Congrès, sont celles qui suivent:

1^o Pour calculer dûment une travée métallique on doit tenir compte du coefficient d'impact.

2^o Ce coefficient d'impact dépend en même temps de la constitution organique de la structure, de son état de conservation ainsi que de celui de la voie et des véhicules, établie sur elle ou qui circulent sur elle; ce coefficient étant plus élevé pour les vieilles constructions que pour les nouvelles.

3^o En général, dans l'expression de ce coefficient la vitesse ne doit pas apparaître explicitement, étant maxima pour la vitesse de synchronisme entre les vibrations de la travée et la rotation des roues, et pouvant atteindre cette vitesse dans les travées d'ouverture moyenne et grande et, en n'arrivant généralement pour les petites ouvertures, les autres facteurs qui influent sur ce coefficient pouvant être prédominants.

4^o Les formules les plus employées contiennent comme variable la longueur du tablier, pouvant peut-être trouver plus convenable entrer par la longueur chargée spécialement dans les éléments soumis à des efforts alternatifs.

5^o On peut estimer comme convenable la formule de PENCROYD (malgré que pour les petites ouvertures les coefficients soient faibles); peut-être la formule de l'Association Américaine d'Ingénieurs, serait plus convenable.

6^o On peut diminuer le coefficient d'impact en utilisant des rails longs, avec des joints soudés, et des traverses en bois très éloignées; l'adoption de longerons continus en bois, ou le placement de la voie sur le ballast peuvent également diminuer ce coefficient; sous ce point de vue les travées obliques sont peu convenables.

De toutes ces conclusions la seule avec laquelle je ne suis point d'accord, est celle qui concerne la recommandation de la formule de PENCROYD et de l'américaine, spécialement de la première, car comme montre la première feuille, elle s'écarte d'une façon extraordinaire, et à ce sujet les commentaires opportuns ont été déjà faits de l'Instruction espagnole; par contre la seconde, c'est-à-dire l'américaine, à partir de 30 mètres se rapproche considérablement de celle-là, quoique ne s'an-

nulant pas pour 250 mètres d'ouverture comme l'espagnole, mais elle est plus inférieure à celle-ci jusqu'à ces 15 mètres.

Résumé

En considération de tout ce qui a été exposé dans l'étude que nous copions et de toutes les études parues postérieurement sur cette intéressante question, je me permets de proposer, comme seule conclusion pour additionner à celles qui ont été déjà acceptées par le Congrès de Zurich de 1926, la suivante

Conclusion:

On propose comme formule indiquée pour la détermination du coefficient de l'impact celle qui a été adoptée par l'Instruction espagnole, c'est-à-dire, la suivante:

$$E' = E \left(1 + \frac{I}{100} \right)$$

étant

$$I = 140 - 0,56 \sqrt{500 \cdot l - l^2}$$