Zeitschrift: IABSE publications = Mémoires AIPC = IVBH Abhandlungen
Band: 22 (1962)

Artikel: Etude expérimentale du raidissage d'un about de maïtresse-poutre de pont du type Bowstring ou Vierendeel
Autor: Mas, E. / Louis, H. / Guiaux, P.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-18808

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: 12.07.2025

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

Etude expérimentale du raidissage d'un about de maîtresse-poutre de pont du type Bowstring ou Vierendeel

Versuche über die Aussteifung der Endknotenpunkte von Parabelträger- und Vierendeel-Brücken

Experimental Study of the Stiffening of the Ends of Bowstring or Vierendeel Girders

E. MAS
Ingénieur Chargé de Recherches
à la C.E.C.M.

H. LOUIS et P. GUIAUX
Professeur et Répétiteur
à l'Université de Liège

Introduction

Les abouts des maîtresses-poutres des ponts du type Bowstring ou Vierendeel constituent leurs nœuds d'extrémités (fig. 1). Ils assurent d'une part la

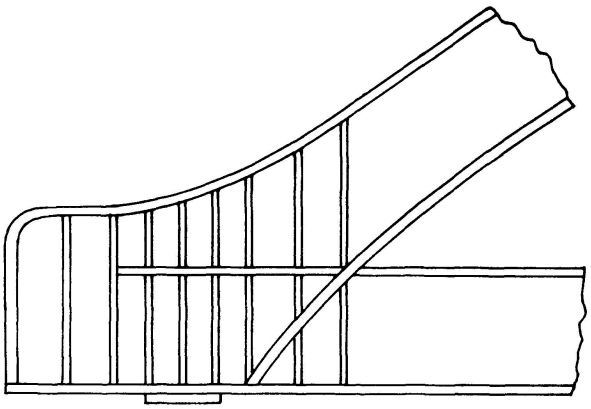


Fig. 1.

liaison entre la membrure supérieure courbe ou polygonale et la membrure inférieure le plus souvent considérée comme étant horizontale, et d'autre part la transmission des réactions d'appuis.

Ces abouts sont en général exagérément renforcés (fig. 1). En effet, l'application des théories classiques ne permet pas d'y déterminer la distribution exacte des tensions qui résultent de la réaction d'appui, des efforts sollicitant les membrures et dont la forme de l'about conditionne la répartition. On se prémunit contre les incertitudes du calcul de cette région de l'ouvrage en augmentant exagérément l'épaisseur de l'âme ainsi que le nombre et la section des raidisseurs. Il en résulte un poids d'acier surabondant, un entretien souvent difficile et une exécution complexe qui, dans le cas d'assemblages par soudure, a parfois entraîné des ruptures avant même la mise en service de l'ouvrage. L'accumulation de nombreux cordons de soudure, la plupart fortement bridés lors de leur exécution, engendre en effet, même sans sollicitation extérieure, un état de tensions résiduelles de soudage, qui a parfois donné lieu à fissuration.

En vue d'aboutir à une conception plus saine de ces parties des maîtresses-poutres de ponts par un raidissage rationnel et strictement nécessaire à leur bon comportement, des essais, subsidiés par l'Institut pour l'Encouragement de la Recherche Scientifique dans l'Industrie et l'Agriculture (I.R.S.I.A.) et faisant partie du programme des recherches de la Commission Belge pour l'Etude de la Construction Métallique (C.E.C.M.), ont été exécutés dans les laboratoires d'Essais des Constructions de l'Institut du Génie Civil de l'Université de Liège.

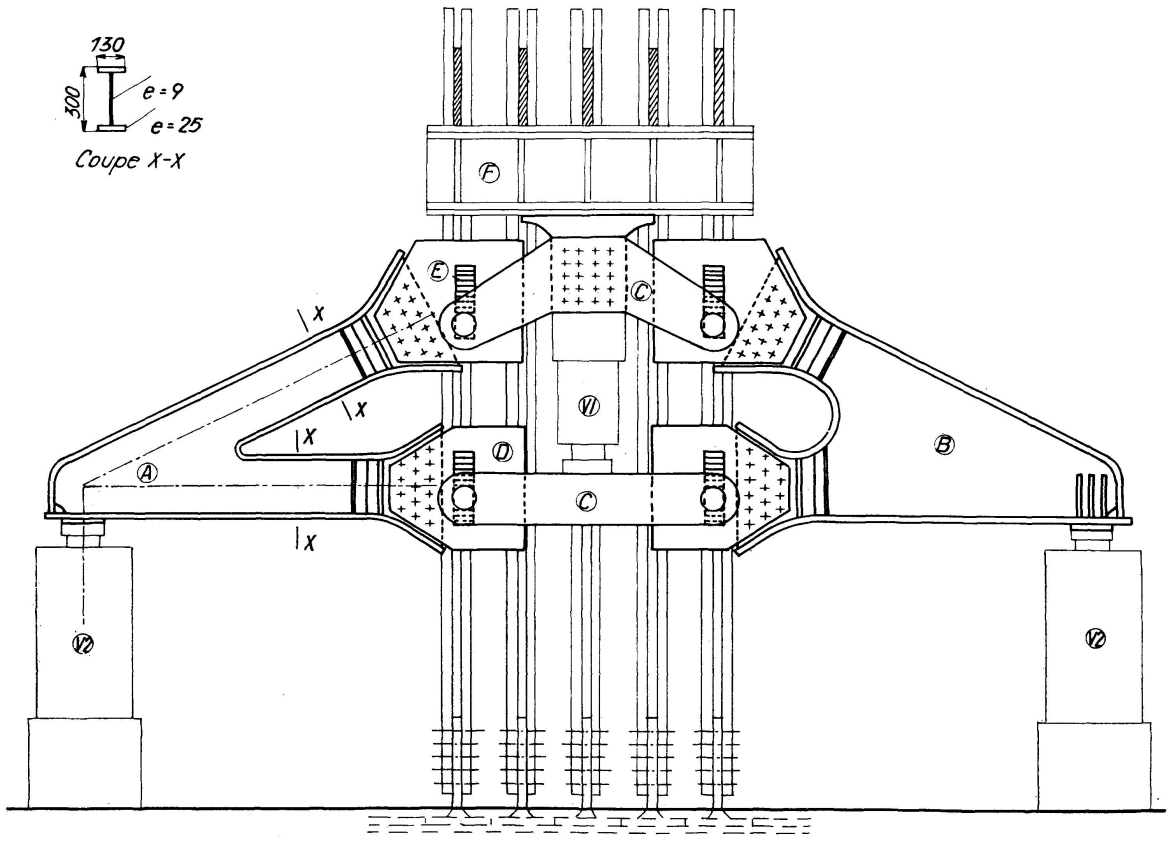


Fig. 2.

I. Description des essais

1. Les pièces d'essais

L'about de pont étudié (*A* sur la fig. 2) réalise la jonction des deux membrures en double té dont les axes font entr'eux un angle de 26° 49′. Il est calqué à l'échelle $\frac{1}{3}$ sur les abouts des maîtresses-poutres Vierendeel d'un pont-rail réalisé à Gand par l'Administration Belge des Ponts et Chaussées. La similitude des sections, des moments d'inertie et des hauteurs est respectée, sauf pour la section de l'âme où l'échelle est inférieure à $\frac{1}{3}$ dans le modèle, afin d'éviter une épaisseur trop forte de l'âme de ce dernier.

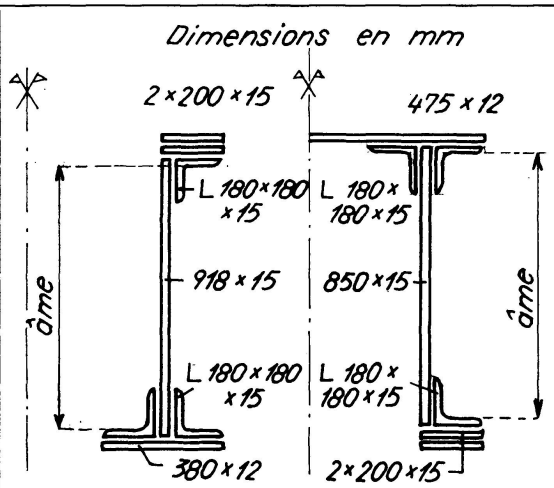
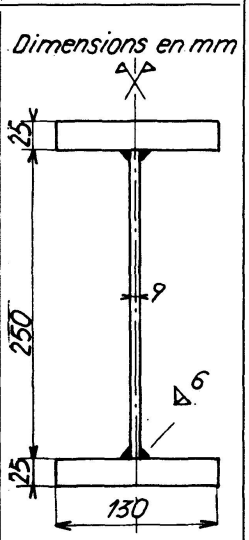
Les dimensions et les caractéristiques des membrures du pont réel, du modèle théorique et du modèle réalisé sont données au tableau I.

Les pièces d'essais, réalisées en acier A 37, sont entièrement soudées.

2. Les sollicitations

L'about de pont est sollicité de la manière schématisée sur la fig. 3a. Sur la base des résultats du calcul de l'ouvrage, douze cas de sollicitations ont été

Tableau I

Caractéristiques	Pont réel	Modèle (Echelle 1/3)		
		Caract.	Théorique	Réalisé
				
	Membrure infér. $\Omega_t = 799{,}2$ cm² $I = 1{,}173 \cdot 10^6$ cm⁴		*Membr. supérieure* $\Omega_t = 801{,}6$ cm² $I = 1{,}022 \cdot 10^6$ cm⁴	
Ω_t moyen	800,4 cm²	Ω_t	89 cm²	89 cm²
$\Omega_{âme}$ moyen	404,7 cm²	$\Omega_{âme}$	45 cm²	22,5 cm²
I moyen	$1{,}0975 \cdot 10^6$ cm⁴	I	13550 cm⁴	13495 cm⁴
$\frac{I}{v}$ moyen	24400 cm³	$\frac{I}{v}$	904 cm³	900 cm³
v	45 cm	v	15 cm	15 cm

choisis. Toutefois, afin d'analyser le jeu des tensions de la manière la plus complète et la plus économique, onze mises en charge non destructives ont été appliquées au modèle et limitées de telle sorte que les déformations restent élastiques en tout point ausculté. La douzième mise en charge destructive correspond à la sollicitation due à une charge uniformément répartie sur la membrure inférieure.

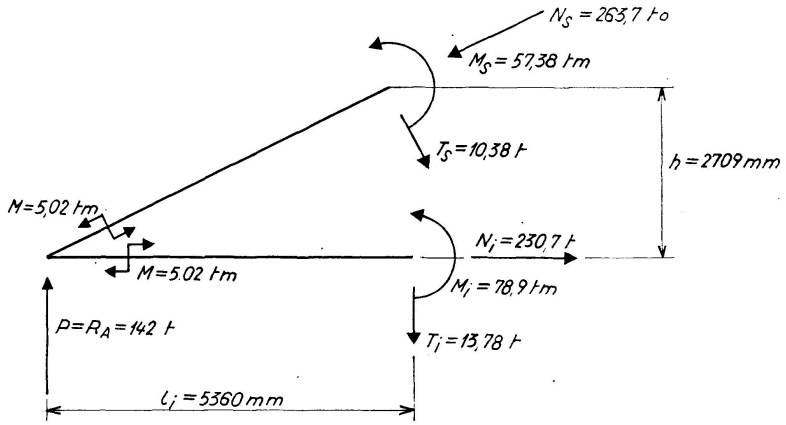


Fig. 3a.

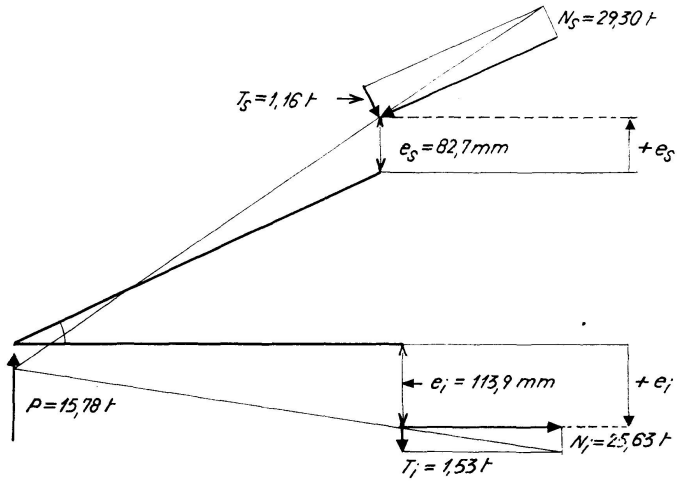


Fig. 3b.

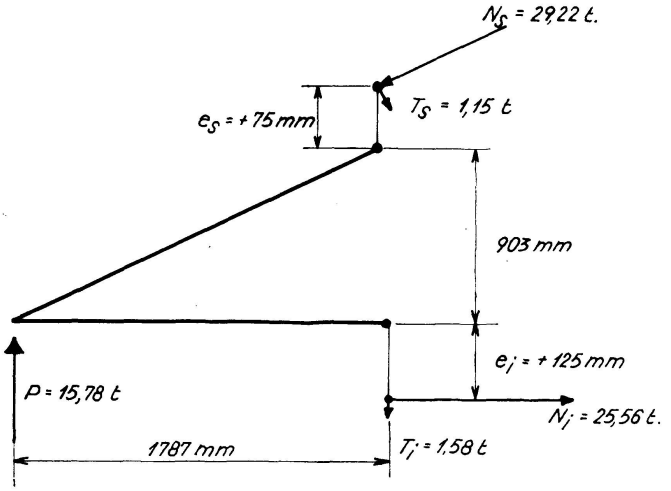


Fig. 3c.

3. *Le dispositif d'essai* (fig. 2)

Le dispositif d'essai est symétrique: le modèle étudié (A) est relié à un about considérablement plus résistant (B) par l'intermédiaire de deux maillons (C) et des pièces spéciales (D) boulonnées aux extrémités des membrures; les maillons sont dotés d'une rotule réglable en hauteur de 25 en 25 mm au moyen d'épaisseurs calibrées (E). Le maillon inférieur impose une direction horizontale à l'effort normal N_i (fig. 3b). L'effort tranchant T_i est réalisé par un vérin (V_1). Si celui-ci est placé entre les deux maillons (cas de la fig. 2), l'effort tranchant T_i agit de haut en bas sur l'extrémité horizontale de l'about, si au contraire le vérin est placé entre le sol et le maillon horizontal, l'effort tranchant T_i agit de bas en haut. Deux vérins (V_2) transmettent les réactions P aux abouts (A) et (B).

Tout le système est suspendu à une poutre (F) soutenue par des portiques ancrés dans la dalle de la halle d'essai (fig. 2, 4, 5 et 13).

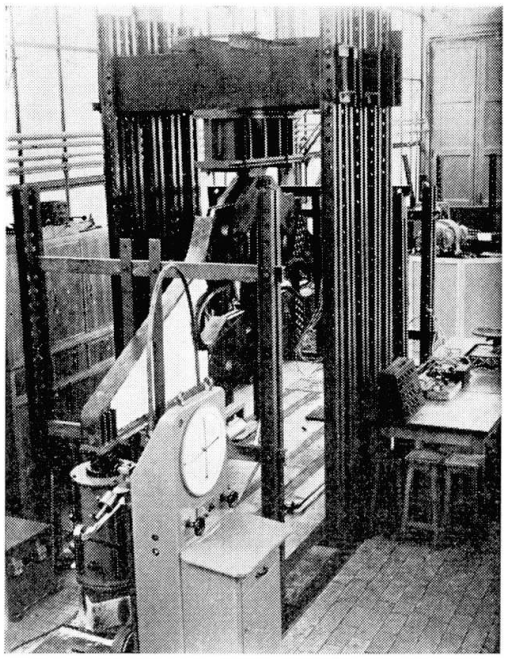


Fig. 4.

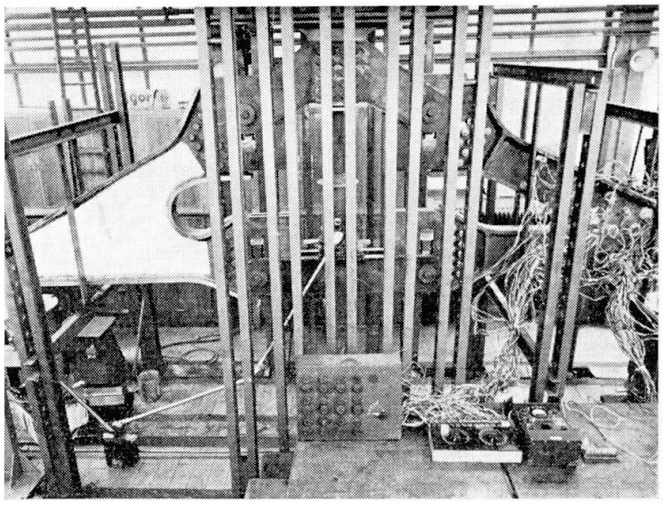


Fig. 5.

Vues générales du dispositif d'essai.

Les douze sollicitations, déterminées par les valeurs des excentricités e_i et e_s ainsi que par le rapport T_i/P, sont données dans le tableau II. Elles sont déterminées de la manière suivante: les lignes d'influence des moments fléchissants, des efforts normaux et des efforts tranchants dans l'arc et dans le tirant au droit de la première suspente ont été fournies par la Société Métallurgique d'Enghien-Saint-Eloi (actuellement Ateliers Belges Réunis), constructeur de l'ouvrage. A partir de celles-ci, on détermine les sollicitations des abouts du pont qui sont données à titre d'exemple à la fig. 3a dans le cas de la douzième

Tableau II

Essai n°	e_i mm	e_s mm	$\frac{T_i}{P}$	Essai n°	e_i mm	e_s mm	$\frac{T_i}{P}$
1	0	0	0	7	−75	−75	0
2	+75	0	+0,15	8	+125	+50	+0,15
3	0	−50	+0,10	9	−25	−50	+0,05
4	+125	+125	0	10	−125	−125	−0,10
5	+125	+125	−0,15	11	−125	−125	−0,20
6	+125	+125	+0,20	12	+125	+75	+0,10

mise en charge: $P = R_A = 142$ tonnes, M = 5,02 tm, $M_s = 57{,}38$ tm, $M_i = 78{,}9$ tm; on en déduit

$$T_s = \frac{M_s - M}{l_s} = 10{,}38\text{ t}, \qquad T_i = \frac{M_i - M}{l_i} = 13{,}78\text{ t}.$$

Les équations d'équilibre projetées sur la verticale et sur l'horizontale donnent respectivement:

$$N_i = 230{,}7\text{ tonnes}, \qquad N_s = 263{,}7\text{ tonnes}.$$

A l'échelle du modèle, on obtient (fig. 3b):

$$P = \frac{142}{9} = 15{,}78\text{ t}, \quad N_s = \frac{263{,}7}{9} = 29{,}30\text{ t}, \quad N_i = \frac{230{,}7}{9} = 25{,}63\text{ t},$$

$$T_s = \frac{10{,}38}{9} = 1{,}16\text{ t}, \qquad T_i = \frac{13{,}78}{9} = 1{,}53\text{ t},$$

$$M_s = \frac{57{,}38}{27} = 2{,}12\text{ tm}, \qquad M_i = \frac{78{,}9}{27} = 2{,}92\text{ tm},$$

$$e_i = \frac{M_i}{N_i} = \frac{292}{25{,}63} = 11{,}39\text{ cm}, \qquad e_s = \frac{M_s}{N_i} = \frac{212}{25{,}63} = 8{,}27\text{ cm}.$$

Le dispositif d'essai permet de réaliser des excentricités multiples de 25 mm; la sollicitation la plus proche de celle qui vient d'être déterminée est donc donnée par la fig. 3c où:

$$e_i = +125\text{ mm}, \qquad e_s = +75\text{ mm}, \qquad \frac{T_i}{P} = 0{,}10$$

(e_i et e_s sont positives lorsqu'elles sont dirigées vers l'extérieur du dispositif d'essai) ce qui donne, pour $P = 15{,}78$ tonnes,

$$T_i = 1{,}58\text{ t}, \qquad N_i = \frac{178{,}7}{110{,}3}\,15{,}78 = 25{,}56\text{ t}$$

et par les équations d'équilibre projetées sur la verticale et sur l'horizontale

$$T_s = 1{,}15\text{ t}. \qquad N_s = 29{,}22\text{ t}.$$

4. Les mesures effectuées

Des rosettes et des jauges ohmiques judicieusement réparties sur la surface des pièces d'essais permettent d'y déterminer l'orientation des facettes principales ainsi que l'intensité des tensions. Les parties non auscultées de cette manière sont recouvertes d'une couche de lait de chaux.

L'orientation et la grandeur des tensions principales sont calculées à l'aide d'un appareil mécanique qui a été mis à notre disposition par le Bureau des Ponts de l'Administration des Ponts et Chaussées. Cet appareil détermine à partir des déformations proportionnelles a, b, c (fig. 6) suivant trois directions faisant entr'elles 45 degrés, les tensions principales σ_1 et σ_2 ($\sigma_1 > \sigma_2$) ainsi que leur orientation α sur la base des formules:

$$\sigma_1 = \frac{E}{2(1-\eta^2)}[(1+\eta)x+(1-\eta)w] \qquad \sigma_2 = \frac{E}{2(1-\eta^2)}[(1+\eta)x-(1-\eta)w]$$

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{z}{y},$$

où $x = a+c$ $\quad y = a-c$ $\quad z = a+c-2b$ $\quad w = y^2 - z^2$

et $0 < \alpha < 90°$ si $z > 0$ et $90° < \alpha < 180°$ si $z < 0$.

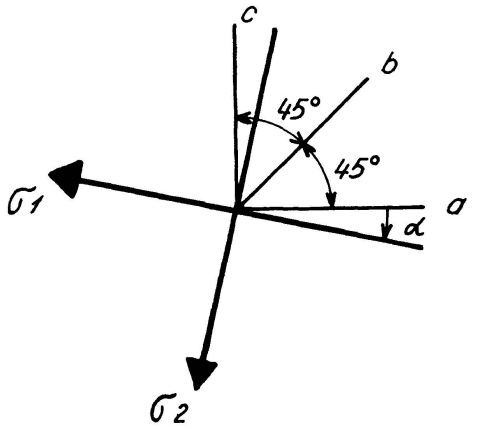


Fig. 6.

II. Résultats des essais sur les modèles non raidis

Deux abouts non raidis ont tout d'abord été essayés: le premier a été recuit à 650° C pour éliminer les tensions résiduelles de soudage et de laminage, afin d'obtenir l'influence des seules sollicitations sur la répartition des tensions; le second est brut de soudage.

1. Etude tensométrique

Les mesures tensométriques et l'écaillage de la couche de lait de chaux ont permis le tracé, pour chaque cas de sollicitation, des réseaux d'isostatiques et d'isochromatiques à la surface de l'âme ainsi que les observations suivantes:

a) Le réseau des isostatiques varie peu avec le mode de sollicitation; on donne, sur les fig. 7a à 7f, leurs tracés obtenus, d'une part dans l'about recuit et d'autre part dans l'about non recuit, lors des 1er, 4e et 12e essais pour lesquels les différences d'allures sont les plus marquées.

b) Le réseau des isostatiques est logique: à partir de leur allure, aisément déterminable dans les âmes des membrures et au voisinage du point d'appli-

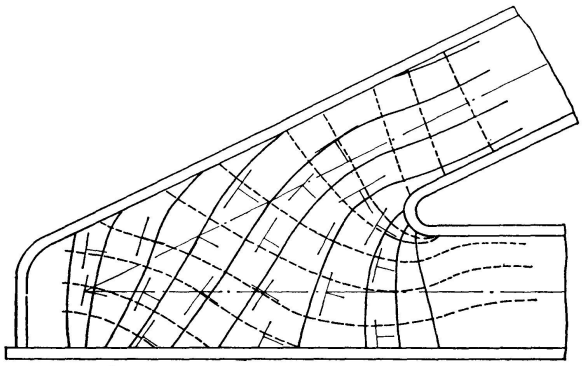


Fig. 7a. Réseau d'isostatiques.
About de pont n° 1. Recuit.
Essai n° 1 (voir tableau II).

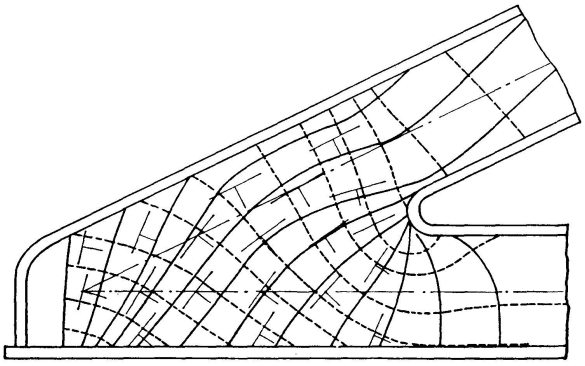


Fig. 7b. Réseau d'isostatiques.
About de pont n° 1. Recuit.
Essai n° 4 (voir tableau II).

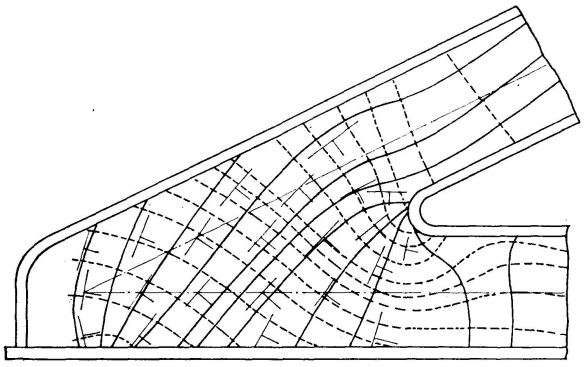


Fig. 7c. Réseau d'isostatiques.
About de pont n° 1. Recuit.
Essai n° 12 (voir tableau II).

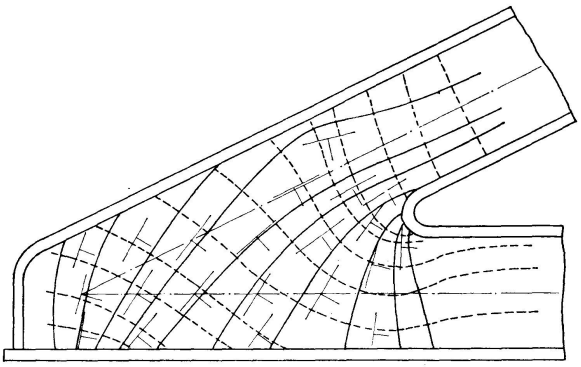


Fig. 7d. Réseau d'isostatiques.
About de pont n° 2. Non recuit.
Essai n° 1 (voir tableau II).

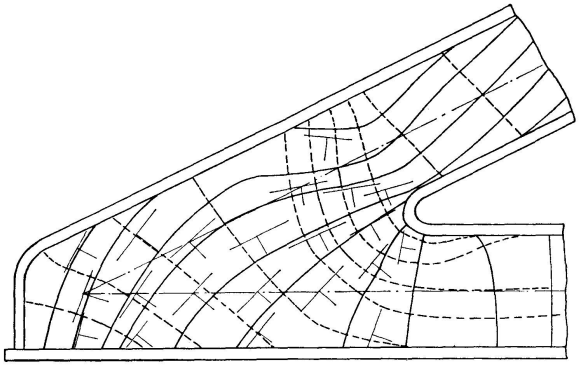


Fig. 7e. Réseau d'isostatiques.
About de pont n° 2. Non recuit.
Essai n° 4 (voir tableau II).

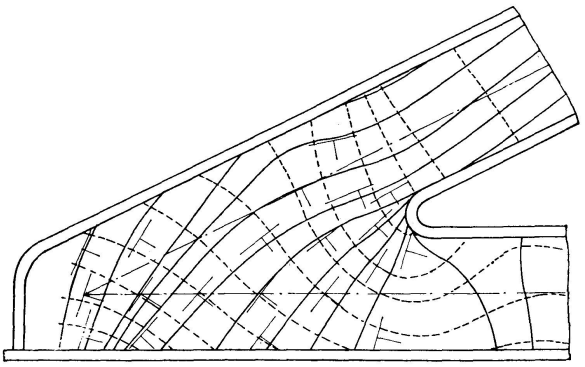


Fig. 7f. Réseau d'isostatiques.
About de pont n° 2. Non recuit.
Essai n° 12 (voir tableau II).

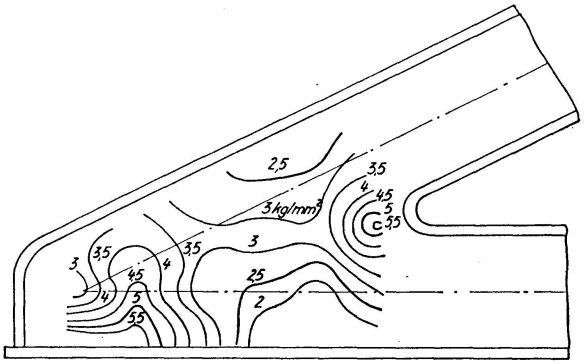


Fig. 8a. Réseau d'isochromatiques
($P = 20$ tonnes).
About de pont n° 1. Recuit.
Essai n° 1 (voir tableau II).

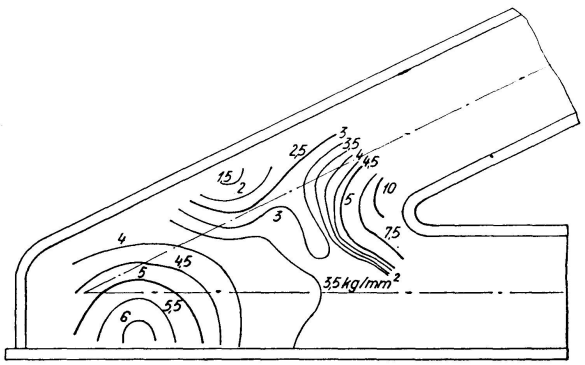


Fig. 8b. Réseau d'isochromatiques
($P = 20$ tonnes).
About de pont n° 1. Recuit.
Essai n° 4 (voir tableau II).

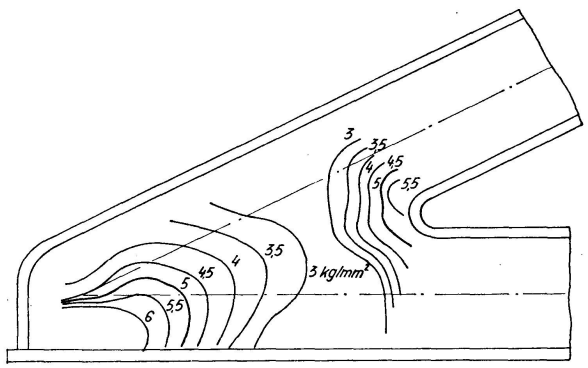


Fig. 8c. Réseau d'isochromatiques
($P = 20$ tonnes).
About de pont n° 1. Recuit.
Essai n° 12 (voir tableau II).

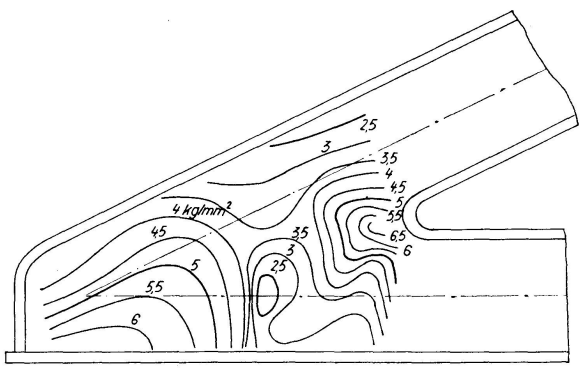


Fig. 8d. Réseau d'isochromatiques
($P = 20$ tonnes).
About de pont n° 2. Non recuit.
Essai n° 1 (voir tableau II).

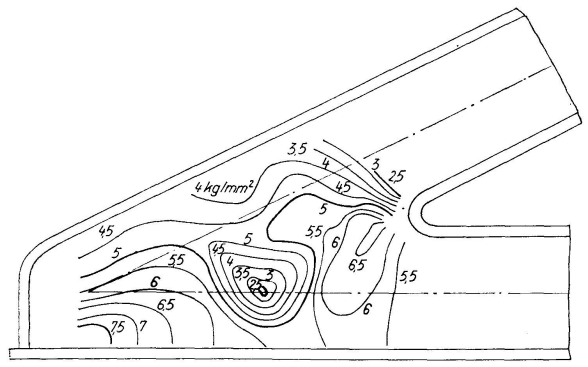


Fig. 8e. Réseau d'isochromatiques
($P = 20$ tonnes).
About de pont n° 2. Non recuit.
Essai n° 4 (voir tableau II).

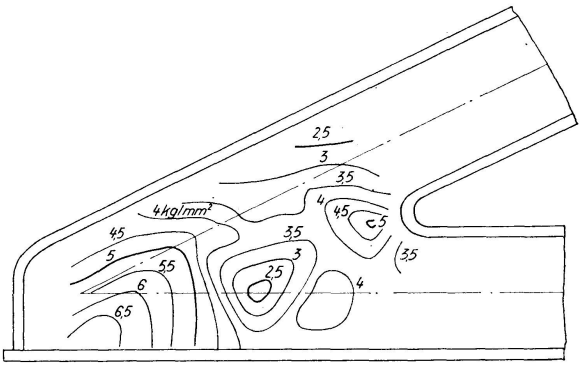


Fig. 8f. Réseau d'isochromatiques
($P = 20$ tonnes).
About de pont n° 2. Non recuit.
Essai n° 12 (voir tableau II).

cation de la réaction, il serait possible, sans même connaître les résultats des mesures, de les tracer à partir des conditions de continuité. Une perturbation est cependant observée dans la zone voisine du congé de raccordement, sur une longueur sensiblement égale à la hauteur des membrures: l'effort provenant de la membrure supérieure dévie les isostatiques de traction vers la semelle inférieure, celui provenant de la membrure inférieure dévie les isostatiques de compression vers la semelle supérieure.

c) Les réseaux d'isostatiques varient peu avec la mise en charge, seule l'orientation des isostatiques dans les membrures influence pratiquement cette allure dans des zones limitées voisines de la section courante de ces membrures.

d) L'inclinaison sur l'horizontale des isostatiques de compression, en traits pleins sur les fig. 7a à 7f, est plus forte dans le cas du nœud recuit; cette observation ne peut être imputée qu'à une différence géométrique des deux abouts qui entraîne une légère modification des sollicitations.

e) Le tracé des isochromatiques met en évidence, dans les vingt-quatre essais, deux zones de surtensions séparées par une zone de faibles tensions; comme le montrent les fig. 8a à 8f relatives aux 1er, 4e et 12e essais dans chacun des abouts recuit et non recuit, la zone de faibles tensions est dans la plupart des cas située dans le prolongement de la semelle inférieure de la membrure supérieure à mi-distance entre le congé de raccordement et le point d'application de la réaction.

L'intensité des tensions de cisaillement, égale à la demi-différence des tensions principales, dépend, contrairement à l'allure des isostatiques, du mode de sollicitation.

Si on appelle respectivement σ_a, σ_c et σ_m les valeurs maximales de $\frac{\sigma_1-\sigma_2}{2}$ mesurées près de l'appui, près du congé et dans les membrures, on observe que les rapports σ_a/σ_m et σ_c/σ_m, qui permettent de chiffrer l'intensité des surtensions, varient peu avec le mode de sollicitation et valent en moyenne tous deux 2,5; ces rapports ont toutefois atteint $\sigma_a/\sigma_m=5{,}3$ dans la mise en charge n° 12 de l'about recuit et $\sigma_c/\sigma_m=3{,}7$ dans la mise en charge n° 4 du même about.

f) L'opération de recuit n'influence pas sensiblement la valeur de $\frac{\sigma_1-\sigma_2}{2}$; les essais ont en effet été conduits de façon telle que la limite élastique ne soit pas atteinte.

g) La répartition des tensions mesurées dans les membrures est, à l'exception de la zone voisine du congé de raccordement, conforme aux valeurs calculées à partir des sollicitations théoriques. Les fig. 9a à 9d donnent les diagrammes théoriques et expérimentaux de répartition des tensions longitudinales dans les sections droites AA' et BB' de la membrure supérieure et dans les sections droites CC' et DD' de la membrure inférieure pour les essais 1, 4 et 12. Ces figures montrent que dans les sections BB' et DD' les âmes des membrures ne sont en général affectées que sur une faible hauteur par la

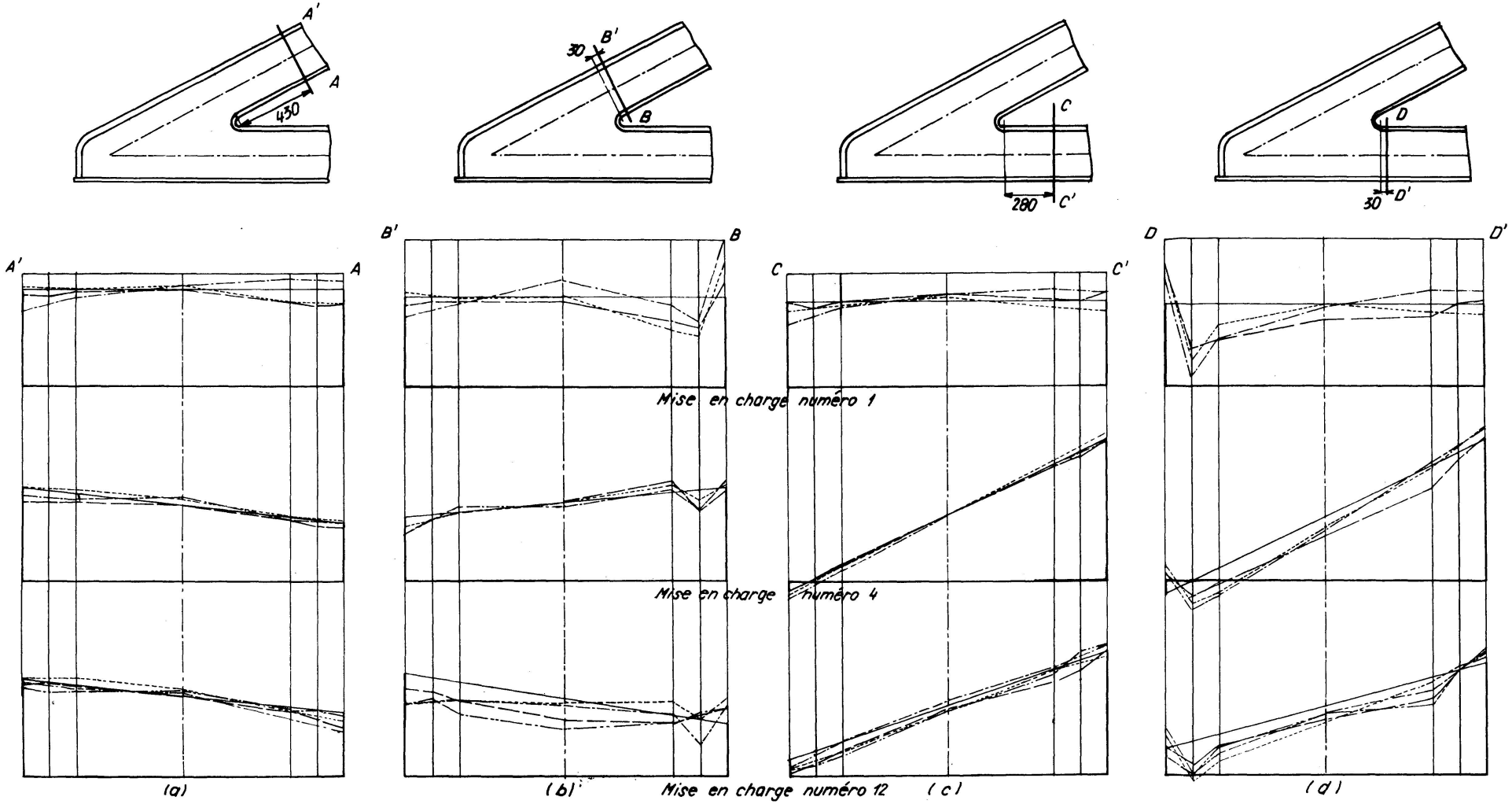


Fig. 9.

——— diagrammes théoriques
– – – – – – recuit non raidi
·—·—· non recuit non raidi
– – – – – non recuit partiel. raidi
··—··— non recuit compl. raidi
| 2 kg/mm²

présence de congé, tandis que les semelles intérieures subissent une flexion supplémentaire qui, quel que soit le mode de sollicitation, agit toujours dans le sens des aiguilles d'une montre (voir fig. 10); le moment correspondant soulage ainsi les faces des semelles situées du côté des âmes et surcharge les faces opposées.

h) Les mesures exécutées sur les faces extérieures des semelles montrent que:

— dans la semelle supérieure, à la verticale de la réaction, la tension est constante et ne dépend pas du mode de sollicitation, elle vaut en moyenne, pour $P = 20$ tonnes, 1,6 kg/mm²;
— il en est de même dans la section verticale située à 290 mm de l'appui; la tension dans la semelle supérieure vaut en moyenne 4,8 kg/mm² pour $P = 20$ tonnes; dans la semelle inférieure, elle vaut en moyenne 3,7 kg/mm²;
— dans la section verticale située à 540 mm de l'appui, la tension dans la semelle inférieure varie suivant le mode de sollicitation entre 3,6 et 9,9 kg/mm². On constate donc que les semelles, ainsi que l'âme, ne sont influencées par le mode de sollicitation que dans la zone voisine du congé de raccordement, sur une longueur égale à la hauteur des membrures.

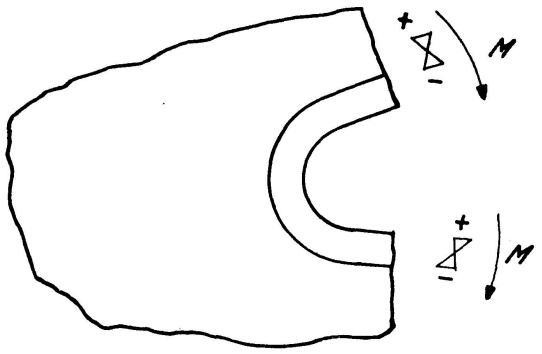


Fig. 10.

2. Mode et charge de ruine

Dans l'about de pont recuit, les premières déformations plastiques sont apparues, en dehors de la zone immédiatement voisine du point d'application de la réaction, pour une charge P de l'ordre de 40 tonnes.

L'écaillage de la chaux s'est propagé comme l'indiquent les fig. 11a à 11e. Comme le laissait prévoir le tracé des isochromatiques (fig. 8c), les plastifications au droit de la réaction sont déjà assez intenses au moment où l'écaillage débute près du congé pour la charge P égale à 50 tonnes. Lorsque la charge P augmente, la plastification se propage à partir de ces deux zones, celle du congé conservant toujours un certain retard quant à son étendue sur celle voisine du point d'application de la charge P. A partir de l'écaillage donné sur les fig. 11d et e, on a tracé sur la fig. 12, les lieux des directions des déformations principales.

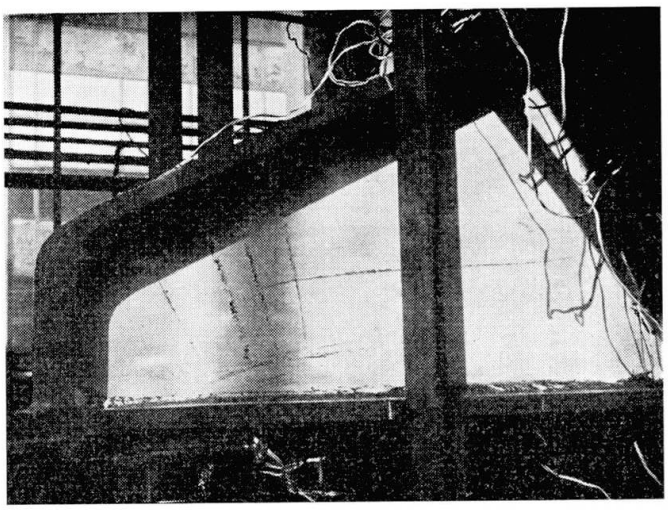


Fig. 11a. About de pont recuit. Ecaillage pour $P = 60$ t.

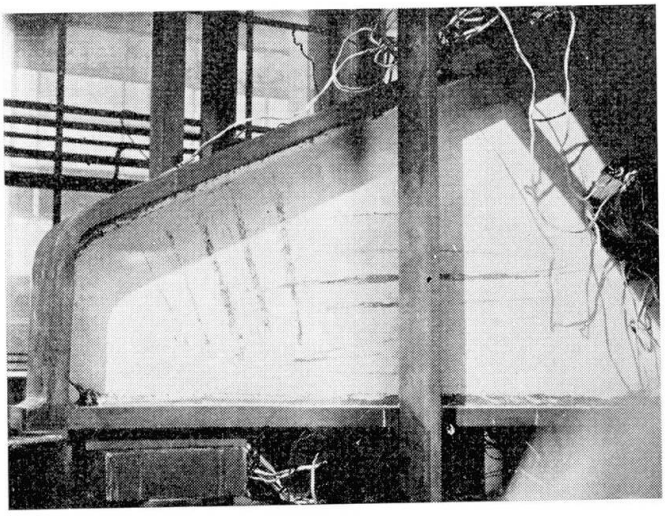


Fig. 11b. About de pont recuit. Ecaillage pour $P = 65$ t.

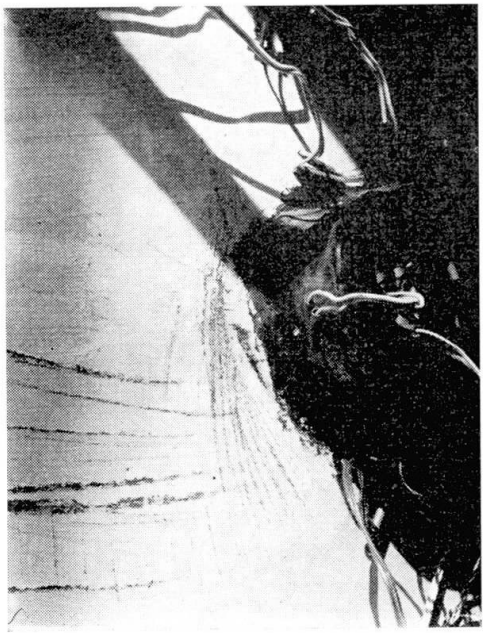


Fig. 11c. About de pont recuit. Ecaillage dans la zone voisine du congé de raccordement des deux membrures pour $P = 65$ t.

L'écaillage met en évidence l'intersection avec la surface de la tôle, des surfaces des glissements maxima. Si, dans le domaine plastique, on admet par analogie avec ce qui se passe dans la phase élastique, que ces intersections sont les bissectrices des directions des déformations principales, on observe un bon accord avec les isostatiques tracées sur la fig. 7c. Toutefois, dans la zone prolongeant la membrure supérieure, les courbes donnant les directions des raccourcissements principaux se déforment au fur et à mesure que la charge croît. Malgré cette dernière observation, il nous a paru acceptable de réaliser

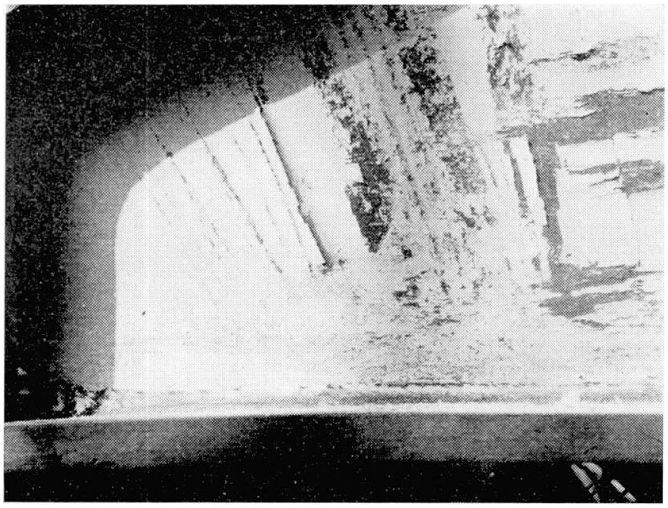


Fig. 11d. About de pont recuit. Ecaillage dans la zone voisine de l'appui pour $P = 70$ t.

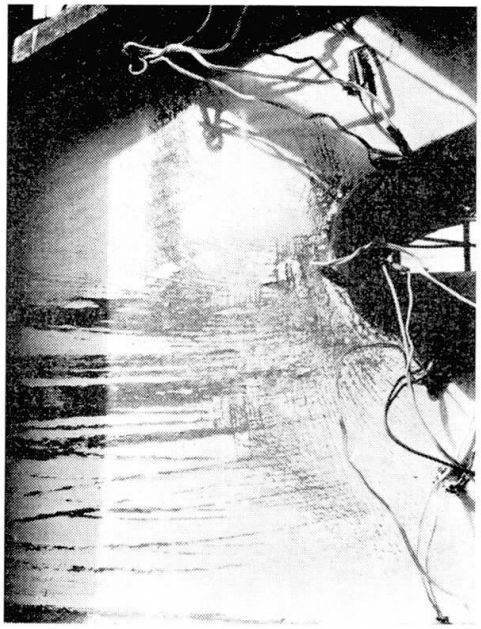


Fig. 11e. Ecaillage dans la zone voisine du congé de raccordement des deux membrures pour $P = 72{,}8$ t.

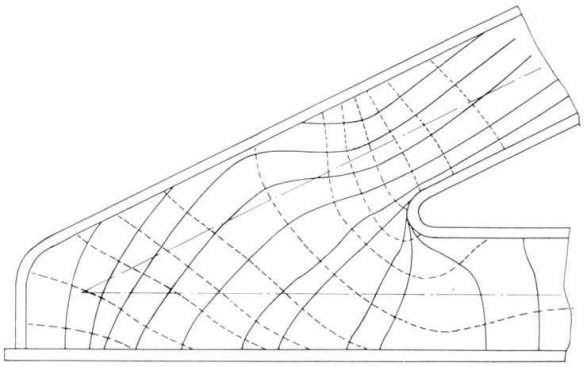


Fig. 12. Lieux des directions des déformations principales obtenues à partir de l'écaillage. About de pont n° 1. Recuit. Essai n° 12 (voir tableau II).

le raidissage sur la base de l'orientation des isostatiques déterminée au cours de la phase élastique des essais.

La valeur maximum atteinte par la charge P (fig. 3c), au cours de l'essai destructif de l'about de pont recuit, est égale à 72,8 tonnes.

Sous cette charge, qui a pu être maintenue pendant quelques secondes, les portions d'âme et de semelles, voisines du congé de raccordement entre les membrures, sont sorties de leur plan. Cette déformation rapide mais non brutale, visible à l'œil, a entraîné le déversement de la partie de l'about située dans le prolongement de la membrure supérieure; dès que ces grandes déformations sont apparues, la charge a diminué lentement. Vu l'importance de la

déformation, l'essai a été arrêté après quelques minutes. La figure 13 donne une vue de la pièce après essai.

La charge P pour laquelle la tension atteint dans les membrures la valeur admissible de 14 kg/mm^2 est égale à 42,8 tonnes. La sécurité à la ruine d'un tel about recuit et non raidi est donc égale à 1,69.

Il est à noter que les premières déformations plastiques apparaissent pour une charge $P = 40$ tonnes inférieure à cette valeur de 42,8 tonnes.

L'about de pont non recuit a péri d'une manière identique à celui qui était recuit. Malheureusement, la couche de lait de chaux n'a subi un début d'écaillage que pour une valeur élevée de la charge, soit égale à 80 tonnes. Ce fait provient probablement d'un trop grand pourcentage d'humidité dans l'air ambiant lors de l'essai. La valeur maximum atteinte par la charge P est égale à 91,3 tonnes, c'est-à-dire une valeur supérieure d'environ 25% à celle obtenue pour l'about de pont recuit. La sécurité à la ruine d'un tel about non recuit et non raidi est égale à 2,13.

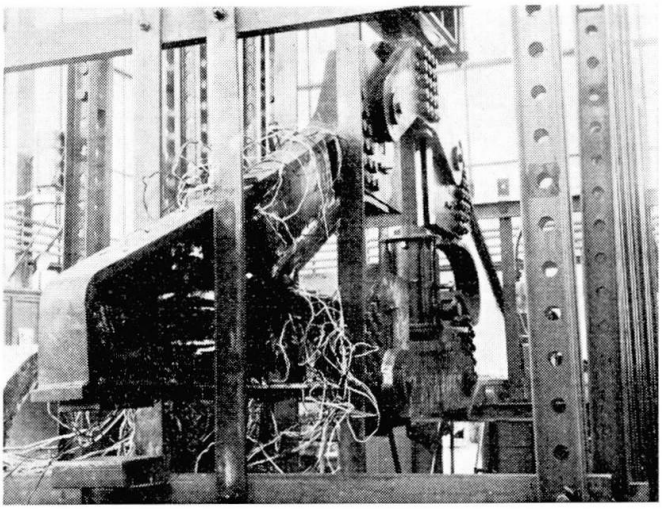


Fig. 13. Vue d'ensemble après l'essai destructif sur l'about de pont recuit et non raidi.

3. Comparaison de ces deux essais et conclusions

Les réseaux d'isostatiques et d'isochromatiques tracés à partir des déformations mesurées à l'aide de jauges et de rosettes ohmiques, montrent que le comportement élastique des deux abouts n'est pas influencé par l'opération de recuit; il en est de même du mode de ruine. Au contraire, la grandeur de la charge de ruine, fortement influencée par l'opération de recuit, met en évidence d'une part l'effet de cette opération sur la limite élastique de l'acier et d'autre part, l'avantage apporté par les tensions résiduelles de traction dues au bridage. Celles-ci jouent en fait un rôle de précontrainte dans l'âme et réduisent l'intensité des tensions de compression qui provoquent la ruine du modèle.

III. Choix du raidissage

Le raidissage doit répondre à un triple but:

1. Uniformiser au mieux la répartition des tensions dans l'étendue de l'about (critère de rupture);
2. Réduire l'intensité des tensions de compression (critère d'instabilité);
3. Réaliser l'économie de matière, faciliter l'exécution et réduire autant que possible le nombre des cordons de soudure.

La répartition des tensions relevée au cours des essais sur les deux premiers abouts non raidis ainsi que l'hypothèse de la conservation de l'orientation des facettes principales durant tout l'essai, conduit (fig. 14):

— d'une part, à prévoir des raidisseurs plus ou moins parallèles aux isostatiques de compression afin de ne pas en perturber l'allure;

— d'autre part, à réunir, par un raidisseur qui prolonge la semelle inférieure de la membrure supérieure, la zone voisine du congé fortement sollicitée à la région centrale soumise à de faibles tensions. On renforce ainsi la zone du congé et on transporte une partie des tensions dont elle est l'objet vers la région centrale.

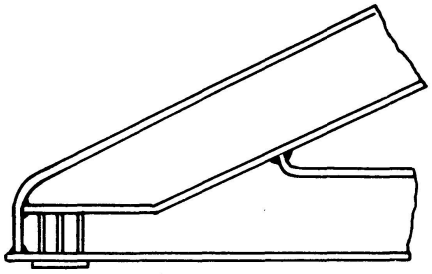


Fig. 14.

Le dispositif est complété dans la zone voisine du point d'application de la réaction par des raidisseurs verticaux prenant appui sur un raidisseur horizontal qui prolonge le raidisseur oblique.

Trois autres systèmes de raidissage peuvent également être évoqués. Leur conception est basée sur le mode de déformation à la ruine des deux premiers modèles non raidis et en particulier sur la tendance de la zone de congé à sortir de son plan moyen et à entraîner la membrure supérieure.

Ces trois systèmes sont les suivants:

1. Relier la zone du congé de la semelle supérieure (fig. 15a); cette solution a pour but d'appeler une partie des surtensions, dont la zone de congé est le siège, vers la partie supérieure où les tensions sont normales. Ce raidisseur constitue toutefois une entrave au cheminement des tensions de compression; par les surtensions qu'il provoque, il augmente le risque d'instabilité de la région comprimée de l'about.

2. Relier la zone du congé à la semelle inférieure tendue (fig. 15b); cette

solution procurerait un appui stable au raidisseur, mais entraînerait la pose de cordons d'angle fortement sollicités par des tensions de traction transversales.

La combinaison de ces deux systèmes peut également être envisagée; elle permettrait d'intéresser une grande partie de l'about aux fortes tensions de la zone réduite du congé mais elle cumule les inconvénients qui viennent d'être signalés.

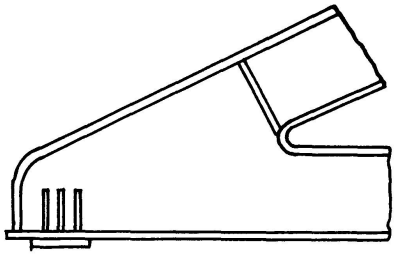


Fig. 15a.

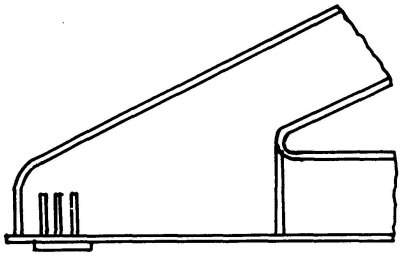


Fig. 15b.

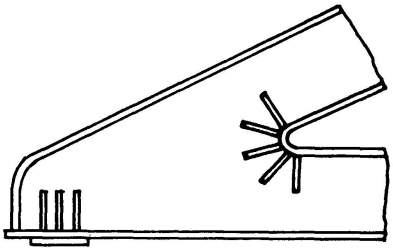


Fig. 15c.

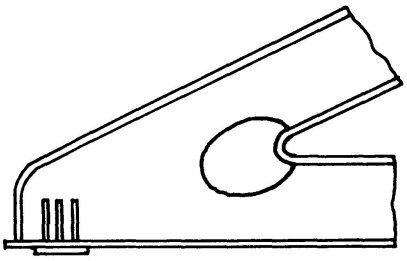


Fig. 15d.

3. Les considérations qui précèdent peuvent conduire soit au choix de raidisseurs rayonnant à partie du centre du congé (fig. 15c), solution qui entraîne une accumulation de soudure dans une région très limitée, soit à l'augmentation de l'épaisseur de l'âme dans la zone du congé au moyen de tôles rapportées (fig. 15d). Cette dernière disposition présente toutefois le double inconvénient d'un manque de support de la partie raidie et du déplacement, à la périphérie de ce renforcement, du danger de voilement.

Ce court exposé comparatif montre la complexité du choix du raidissage. De plus, la multiplication du nombre d'essais sur modèle en acier à l'échelle $\frac{1}{3}$ n'est matériellement pas possible. Ces diverses raisons nous ont conduit à la réalisation d'essais sur modèles en carton, qui ont permis d'obtenir certaines orientations dans le choix de divers modes de renforcement.

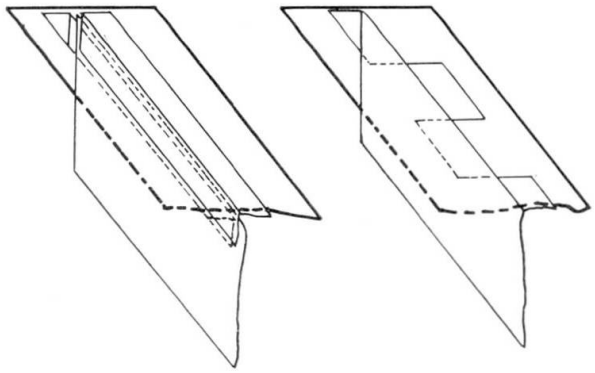
1. Essais sur modèle en carton

a) Description des modèles

Les modèles sont réalisés en carton lisse d'emballage, leurs dimensions sont cinq fois plus petites que celles du modèle en acier. Les semelles ont 1,25 mm d'épaisseur et 26 mm de largeur; deux épaisseurs d'âme, 0,22 mm et 0,37 mm, ont été utilisées; les raidisseurs ont 12 mm de largeur et 1,25 mm d'épaisseur.

Deux types d'assemblage âme-semelle (fig. 16) sont réalisés:

— le type *A* dans lequel les bords des âmes ont été repliés à 90° alternativement à gauche et à droite et collés sur la face interne des semelles;
— le type *B* dans lequel la liaison âme-semelle est assurée au moyen de deux cornières en carton de dimensions $5 \times 5 \times 0{,}37$ mm.



Type B Type A

Fig. 16.

Les extrémités libres des membrures sont renforcées par des raidisseurs transversaux et des surépaisseurs afin de réaliser les mêmes conditions d'attache que la pièce d'essai en acier.

La mise en charge réalisée est la suivante (voir notation à la fig. 3b)

$$e_i = e_s = +12\,\text{mm} \quad \frac{T_i}{P} = 0\,.$$

Le choix de ces excentricités est imposé par l'emploi d'un meccano pour la réalisation de la mise en charge.

b) Dispositif d'essai

Celui-ci (fig. 17 à 19) est similaire à celui décrit au paragraphe I 3, mais la membrure tendue est placée au-dessus de la membrure comprimée, afin de

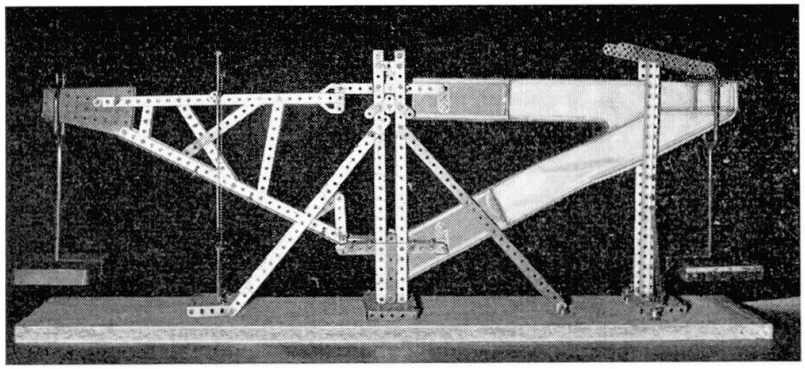


Fig. 17.

Dispositif d'essai sur modèle en carton.

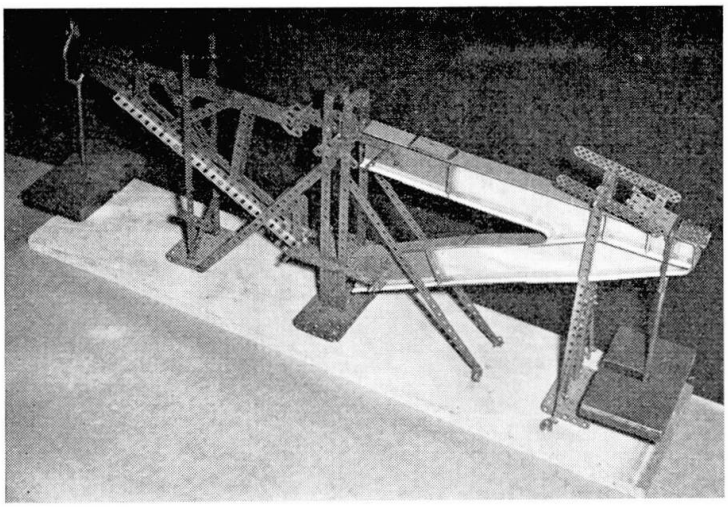


Fig. 18.

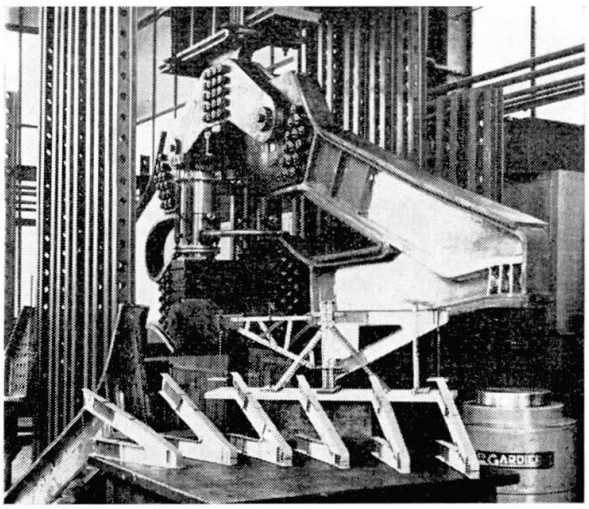


Fig. 19. Vue d'ensemble des dispositifs d'essais sur modèles en acier et en carton.

faciliter la mise en charge. Celle-ci est réalisée en suspendant des poids aux extrémités de l'about en carton et de l'about postiche réalisé en meccano. Un dispositif de guidage, visible sur la fig. 18, est prévu à l'extrémité pour en éviter la torsion.

c) Résultats des essais

Ceux-ci sont rassemblés dans le tableau III.

Les modèles sont raidis au droit du point d'application de la charge; on appellera ci-dessous «about non raidi» un about uniquement garni de raidisseurs verticaux destinés à répartir l'effort localisé à cet endroit.

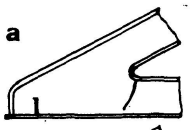
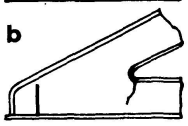
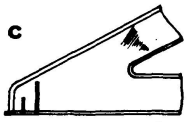
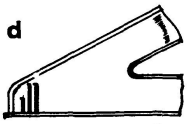
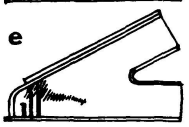
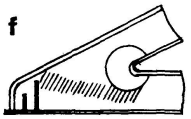
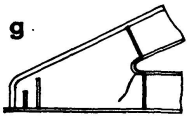
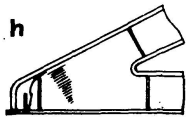
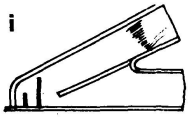
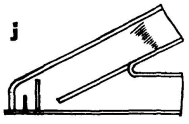
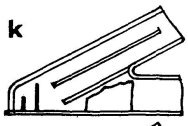
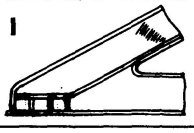
d) Examen des résultats et conclusions des essais

Le tableau III met en évidence:

1. Trois modes de ruine:

Le premier par déchirure de l'âme de la membrure tendue sous le congé, le second par flambement de la membrure comprimée et le troisième par voilement local de la région supérieure de l'âme.

Tableau III

Type de membrure (v. fig. 16)	Epaisseur de l'âme (mm)	Renforcement de la zone la plus tendue	Raidissage	Charge de ruine kg	Mode de ruine
A	0,22	néant	a 	8,0	déchirure de l'âme de la membrure inférieure près du congé
B	0,37	néant	b 	10,5	déchirure de l'âme de la membrure inférieure près du congé
B	0,22	oui	c 	12,0	flambement de la membrure supérieure à 3,5 cm du congé
B	0,37	l'âme entière est toilée	d 	14,0	flambement de la membrure supérieure à 13,0 cm du congé
B	0,22	oui	e 	15,0	cloquage de l'âme au-dessus des raidisseurs verticaux[1])
B	0,22	néant	f 	12,0	cloquage de l'âme depuis le bord inférieur de la surépaisseur jusqu'à la pointe des raidisseurs verticaux
B	0,22	néant	g 	12,5	déchirure de l'âme de la membrure inférieure près du congé
B	0,22	oui	h 	19,0	cloquage puis déchirure de l'âme au voisinage des raidisseurs verticaux[2])
B	0,37	néant	i 	16,0	flambement de la membrure supérieure à 7,0 cm du congé
B	0,22	néant	j 	16,5	flambement de la membrure supérieure à 9,0 cm du congé
B	0,22	néant	k 	17,0	déchirure de l'âme de la membrure inférieure près du congé
B	0,22	oui	l 	21,0	flambement de la membrure supérieure à 4,0 cm du congé

[1]) N.B. Semelle extérieure de la membrure supérieure renforcée par un plat en carton.
[2]) N.B. La moitié inférieure de l'about était toilée.

— *par déchirure* (essais a, b, g, k)

Ces essais montrent que le raidissage amène une redistribution des tensions et en particulier une atténuation des concentrations des tensions de traction en-dessous du congé; en effet, sans raidissage, on obtient respectivement 8,0 kg et 10,5 kg avec une âme de 0,22 et 0,37 mm d'épaisseur; les raidisseurs joignant le congé aux deux semelles extérieures (essai g) relèvent la charge d'environ 50% (12,5 kg au lieu de 8,0 kg), ce qui indique que la tension de traction est abaissée sous le congé.

Le raidissage constitué par le prolongement de la semelle inférieure de la membrure supérieure et par un raidisseur longitudinal à mi-hauteur de la membrure supérieure (essai k) est encore plus efficace car l'augmentation de charge atteint plus de 100% (17,0 kg au lieu de 8,0 kg). Les essais i et j mettent également en évidence le rôle du raidisseur prolongeant la semelle inférieure de la membrure supérieure; en effet, la déchirure qui n'a pu se produire par suite du flambement de la membrure supérieure (respectivement à 16,0 et 16,5 kg), aurait donc lieu pour une charge plus élevée.

Les déchirures perturbent l'analyse car le carton, contrairement à l'acier, a une plus grande résistance à la compression qu'à la traction. Pour éviter ces déchirures, on renforce la zone fortement tendue située sous le congé dans les essais c, e et l, au moyen d'une toile collée sur les deux faces de l'âme. Il faut noter que le toilage est beaucoup plus important dans les essais d et h; dans l'essai d, le toilage couvre toute l'âme de l'about; dans l'essai h, il couvre toute la région située sous le congé sur une largeur de 5 cm.

— *par voilement local de l'âme* (essais e, f et h)

L'âme de ces trois abouts a 0,22 mm d'épaisseur. Le cloquage se produit à partir d'un voilement de l'âme qui s'étend depuis l'extrémité des raidisseurs verticaux jusqu'à la zone située à mi-hauteur de la membrure inférieure. Dans l'essai e, il est dû au fait que la semelle supérieure de la membrure supérieure est renforcée (il s'agit de l'about *c* réparé), la tendance au déplacement du congé hors de son plan ne peut plus se répercuter sur la membrure supérieure renforcée et doit ainsi se propager vers l'extrémité de l'about. Dans l'essai f, il semble que la surépaisseur de l'âme du droit du congé reporte le danger de voilement à sa périphérie. Dans l'essai h, le modèle *g* a été réutilisé après réparation consistant en un toilage partiel appliqué sur les deux faces de l'âme. La zone, qui a voilé localement dans l'essai h, aboutit à l'extrémité de ce toilage, dont la présence explique la charge de ruine élevée (19,0 kg).

— *par flambement de la membrure comprimée*

Ce flambement s'est produit de deux façons différentes:

— *Cas des essais c et d:* un déplacement du congé hors de son plan, observé en cours d'essai, a entraîné le flambement de la membrure supérieure.

— *Cas des essais i et l:* la membrure supérieure a flambé sans déplacement préalable de la zone du congé.

2. La comparaison des effets des divers modes de raidissage:

Surépaisseur de la zone du congé (essai f). Elle a pour effet de déplacer la zone de voilement à sa périphérie; le gain au point de vue charge de ruine est faible.

Raidisseurs reliant le congé aux semelles extérieures (essais g et h). Ils ont pour effet de réduire les tensions dans la zone du congé et de les reporter vers l'extrémité de l'about; le gain au point de vue charge de ruine ne peut être apprécié à cause du toilage trop conséquent du modèle *h*.

Raidisseur prolongeant la semelle inférieure de la membrure supérieure (essais i à l). Il réduit les tensions dans la zone du congé et reporte la ruine dans la membrure supérieure. Il donne lieu à un gain appréciable sur la charge de ruine lorsqu'il est prolongé jusqu'aux extrémités supérieures des raidisseurs verticaux.

3. Les conclusions:

— Le raidissage, réalisé sur les modèles en carton en prolongeant la semelle inférieure de la membrure supérieure, donne les résultats les meilleurs, en reportant la ruine dans la membrure supérieure.

D'autre part, aucun des deux modèles (*i* et *j*) n'a péri par déchirure, ce qui montre une atténuation sensible de la concentration des tensions de traction près du congé.

— Le raidissage, par surépaisseur de la zone du congé, semble moins efficace, il déplace seulement la zone dangereuse sans atténuer de manière sensible les fortes tensions localisées.

— Les raidisseurs radiaux empêchent le voilement local de l'âme dans la zone du congé mais ne semblent pas améliorer la distribution des tensions.

— L'épaisseur de l'âme influence la charge de ruine et cela d'autant plus que le raidissage est moins important.

2. Raidissage des modèles en acier

Les essais sur modèles en carton montrent l'avantage du raidissage consistant en un prolongement de la semelle inférieure de la membrure supérieure. Un autre avantage de ce mode de raidissage est sa facilité de réalisation (voir fig. 14): la semelle inférieure de la membrure supérieure peut en effet être prolongée dans le nœud tandis que la semelle supérieure de la membrure inférieure est cintrée perpendiculairement à la semelle-raidisseur et y est soudée par deux cordons d'angle.

Il semble d'autre part, d'après les essais sur modèles en carton, que l'arrêt du raidisseur en un point A de l'âme (fig. 20a) y reporte la zone de surtension. Cette dernière observation conduit à adopter pour le modèle en acier, le raidissage représenté sur la fig. 20b.

Le programme d'essais réalisés sur des modèles n'ayant pas été recuits, est le suivant:

1. Essais sur about non raidi afin d'obtenir une confirmation des résultats obtenus précédemment (dans le domaine élastique).
2. Essais sur about raidi comme indiqué sur la fig. 20a.
3. Essais sur about raidi comme indiqué sur la fig. 20b.

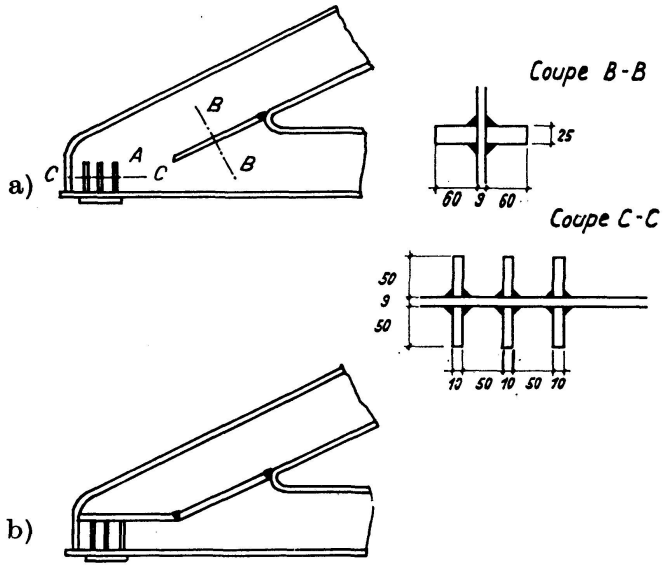


Fig. 20.

Dans le but de réaliser au mieux les conditions de la pratique, schématisées sur la fig. 14, à partir d'un about de pont tel que celui (A) de la fig. 2, on a donné, au raidisseur prolongeant la semelle inférieure de la membrure supérieure, les dimensions de cette semelle. Afin de pouvoir l'adapter au modèle, ce raidisseur est composé de deux plats 60×25 mm fixés par des cordons d'angle de part et d'autre de l'âme (fig. 20a). Ces plats, dans les essais de la phase 2 du programme, ont une longueur totale de 420 mm; un chanfreinage est prévu à leurs extrémités pour réaliser d'une part la jonction avec le congé de raccordement et d'autre part, pour prolonger ultérieurement ces plats vers l'extrémité de l'about.

Six raidisseurs verticaux sont réalisés au moyen de plats 50×10 de 125 mm de hauteur; ils sont munis d'une échancrure en quart de cercle de 15 mm de rayon pour assurer le passage des cordons d'angle fixant l'âme à la semelle inférieure et aux raidisseurs longitudinaux; les raidisseurs verticaux sont écartés de 60 mm d'axe en axe.

IV. Résultats des essais sur les modèles raidis

Le troisième modèle non recuit est d'abord sollicité élastiquement avant raidissage. Seules les mises en charge numéros 1, 4, 5 et 12 (voir tableau II) sont effectuées. D'autre part, l'étude tensométrique est plus poussée que lors des deux essais précédents: des rosettes ohmiques sont ajoutées et des plaques de vernis photoélastique ZANDMAN sont collées sur l'autre face de l'âme dans les zones situées près du congé et au droit de la réaction.

Les réseaux d'isostatiques et d'isochromatiques sont pratiquement identiques à ceux déterminés dans les deux premiers abouts. Le relevé des isoclines par la méthode photoélastique a permis le tracé continu des isostatiques dans les deux zones étudiées. Ce tracé (fig. 21 a et b) confirme l'allure des isostatiques

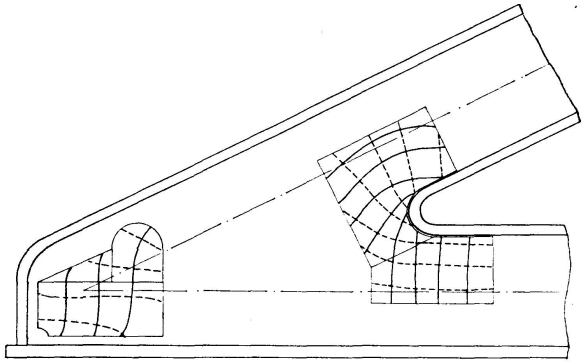


Fig. 21 a. Tracé des isostatiques à partir de l'observation des isoclines. About de pont n° 3 non raidi. Essai n° 1 (voir tableau II).

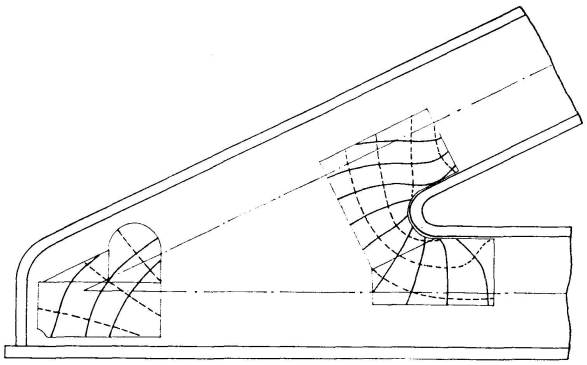


Fig. 21 b. Tracé des isostatiques à partir de l'observation des isoclines. About de pont n° 3 non raidi. Essai n° 4 (voir tableau II).

obtenues à partir des résultats donnés par les rosettes ohmiques.

Les tensions mesurées dans les membrures (fig. 9) et sur les semelles de l'about (fig. 24) sont pratiquement les mêmes que celles mesurées lors des essais précédents.

1. Essai sur modèle non recuit et partiellement raidi

Après avoir été raidie de la manière schématisée sur la fig. 20 a, la troisième pièce d'essai non recuite est soumise élastiquement aux mises en charge numéros 1, 4, 5 et 12 (voir tableau II).

a) Réseaux d'isostatiques

Suivant ce qui a été dit au chapitre III, le premier raidissage est disposé sur les deux faces de telle manière qu'il réalise l'économie, épouse au mieux la forme des isostatiques et uniformise plus ou moins les tensions dans l'âme de l'about. Il relie le point supérieur du congé à la zone centrale de la pièce d'essai.

Comme on pouvait s'y attendre de par le choix du raidisseur, celui-ci ne modifie que légèrement les réseaux d'isostatiques. Les fig. 22a à c montrent en effet que leurs allures sont sensiblement les mêmes que celles qui ont été déterminées sur les abouts non raidis.

b) Réseaux d'isochromatiques

On observe sur les fig. 23a à c que les raidisseurs uniformisent les tensions:
— Ils reportent en effet la zone des tensions élevées, observée près du congé

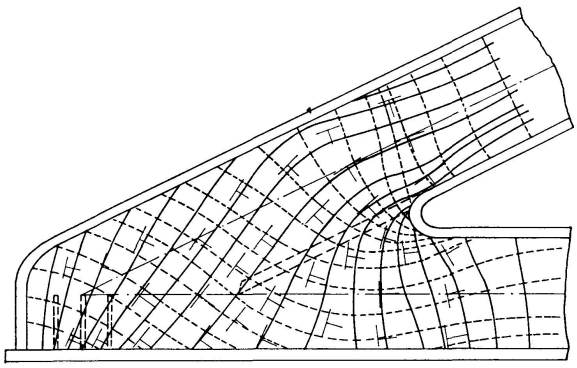


Fig. 22a. Réseau d'isostatiques.
About de pont n° 3 partiellement raidi.
Essai n° 1 (voir tableau II).

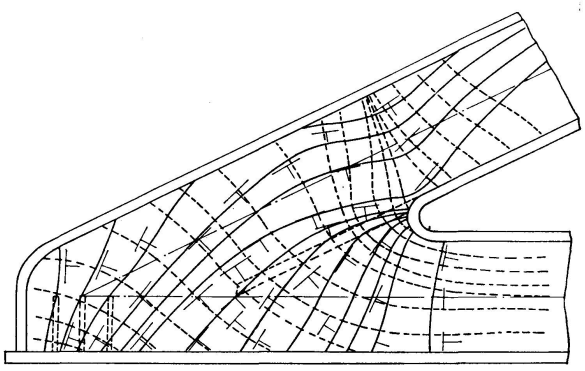


Fig. 22b. Réseau d'isostatiques.
About de pont n° 3 partiellement raidi.
Essai n° 4 (voir tableau II).

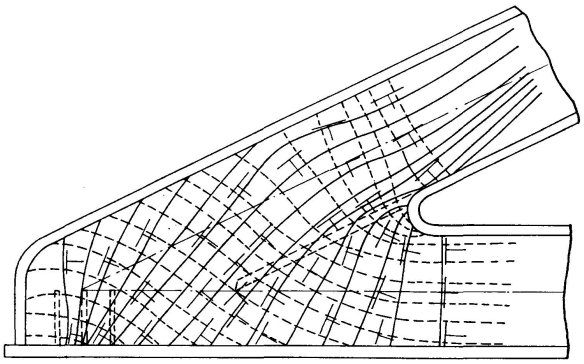


Fig. 22c. Réseau d'isostatiques.
About de pont n° 3 partiellement raidi.
Essai n° 12 (voir tableau II).

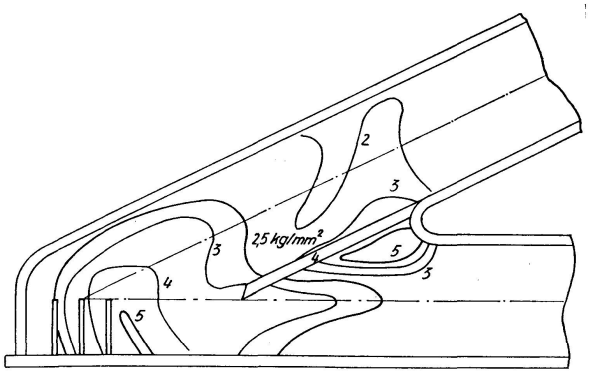


Fig. 23a. Réseau d'isochromatiques
($P = 20$ tonnes).
About de pont n° 3 partiellement raidi.
Essai n° 1 (voir tableau II).

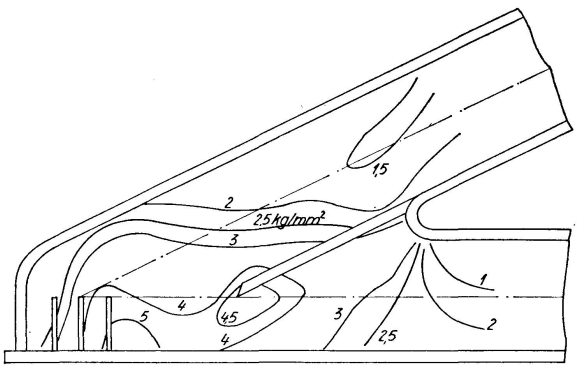


Fig. 23b. Réseau d'isochromatiques
($P = 20$ tonnes).
About de pont n° 3 partiellement raidi.
Essai n° 4 (voir tableau II).

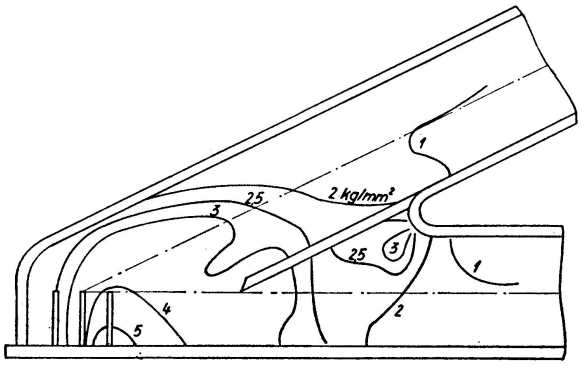


Fig. 23c. Réseau d'isochromatiques ($P = 20$ tonnes).
About de pont n° 3 partiellement raidi.
Essai n° 12 (voir tableau II).

dans les abouts non raidis, vers leurs extrémités libres, tout en diminuant l'intensité de ces tensions; c'est le cas des mises en charge 4, 5 et 12 (fig. 23b et c). Lors de la mise en charge 1 (fig. 23a), les tensions sont diminuées, mais leur répartition conserve la même allure que dans les abouts non raidis, le point où la tension est maximum s'écartant légèrement du congé.

— Ils réduisent le gradient des tensions entre le congé et la zone centrale de l'about.

— Les tensions sont surtout concentrées dans les raidisseurs et dans les zones adjacentes tandis que la région voisine du congé est moins sollicitée.

c) Répartition des tensions dans les membrures et dans les semelles du modèle

Le comportement des membrures et des semelles n'est que légèrement modifié par la présence des raidisseurs. Dans le cas des abouts non raidi et partiellement raidi, les diagrammes des tensions longitudinales le long des semelles extérieures et dans les membrures montrent que (fig. 24):

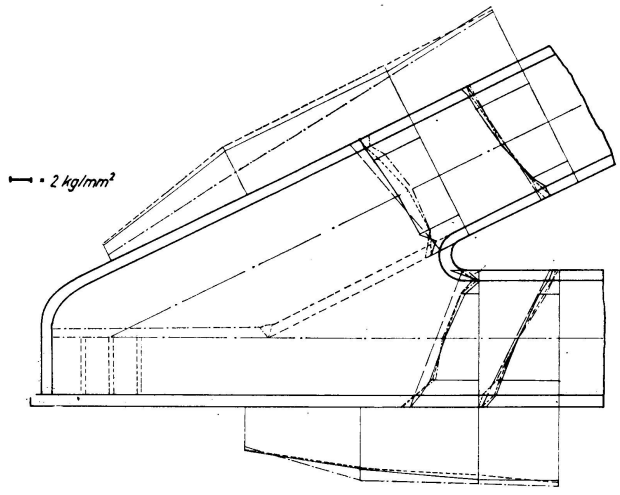


Fig. 24. Essai n° 12. $P = 20$ t.
——— about non raidi
- - - - - - - about raidi partiellement
—·—·—· about totalement raidi
——— diagrammes théoriques

— Les raidisseurs n'ont pratiquement aucune influence dans les membrures, à une distance du congé égale à la hauteur de la poutre.

— La présence des raidisseurs conduit à une légère augmentation des tensions longitudinales sur la face extérieure de la semelle supérieure de l'about

et à une légère diminution de ces tensions sur la face extérieure de la semelle inférieure.

— Les raidisseurs diminuent le gradient de tensions relativement élevé que l'on observait au voisinage du congé suivant l'épaisseur des semelles de l'about non raidi; le couple dû à la présence du congé y est moins important.

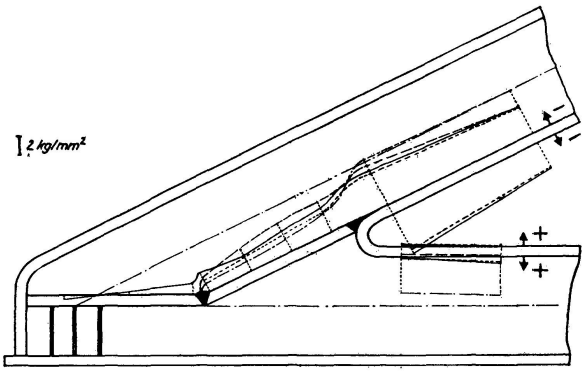
— Les tensions diminuent dans la semelle supérieure de la membrure inférieure, tandis qu'elles augmentent légèrement dans la semelle inférieure de la membrure supérieure.

d) Variation de la tension longitudinale moyenne le long du raidisseur oblique

Cette variation est donnée sur la fig. 25. On donne également sur cette figure les valeurs des tensions longitudinales le long des semelles intérieures des membrures. On observe que la tension longitudinale moyenne dans les raidisseurs est sensiblement égale à la moyenne algébrique des tensions longitudinales agissant à la naissance du congé, dans les deux semelles intérieures.

Fig. 25. About de pont n° 3 ($P = 20$ tonnes).
Variation de la tension longitudinale moyenne le long des raidisseurs et des semelles intérieures.

·—·—·— essai n° 1 } partiellement
——— essai n° 4 } raidi
------- essai n° 12 }
——— essai n° 12 totalement raidi



Autrement dit, les raidisseurs travaillent d'autant mieux que les valeurs algébriques des tensions dans les semelles intérieures sont plus grandes et plus voisines l'une de l'autre. Cette influence a d'ailleurs été mise en évidence sur les fig. 23a à c: la résultante des efforts sollicitant les semelles intérieures est, dans le cas de la première mise en charge, trop faible pour éloigner la zone de surtension du congé de raccordement. Dans le cas des autres mises en charge au contraire, cette résultante est suffisamment grande pour déplacer cette zone de surtension jusqu'à l'extrémité de ces raidisseurs. Les tensions longitudinales décroîssent depuis le congé jusqu'à l'extrémité libre; le rapport des tensions mesurées sur les raidisseurs près du congé et à leurs extrémités ne varie que très peu avec la mise en charge, elle vaut en moyenne 2,42.

e) Répartition des tensions longitudinales dans une section transversale au raidisseur

La fig. 26 donne cette répartition dans la section droite située à 150 mm du congé. Abstraction faite d'une dissymétrie de sollicitation vraisemblablement due à un manque de planéité de l'about, les tensions longitudinales sont

réparties de façon relativement uniforme dans toute la section. Le rapport de la largeur à l'épaisseur est en effet assez faible, $\frac{60}{25} = 2{,}4$, de sorte que sa largeur efficace peut être assimilée à sa largeur réelle.

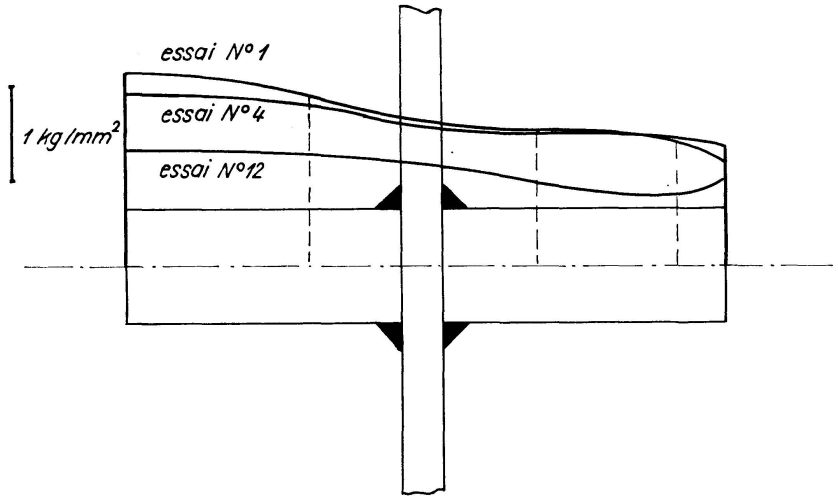


Fig. 26. Répartition des tensions longitudinales moyennes dans les raidisseurs. About de pont n° 3 partiellement raidi. ($P = 20$ tonnes).

f) Essai destructif de l'about non recuit et partiellement raidi (voir fig. 3c)

Les mesures des tensions dont les résultats viennent d'être donnés ainsi que le comportement des modèles en carton font apparaître l'intérêt d'un prolongement du raidissage tel que celui représenté sur la fig. 20b. En effet, le raidisseur uniformise les tensions et reporte la zone de surtensions observée près du congé dans l'about non raidi vers son extrémité libre tout en diminuant l'intensité de ces tensions. L'efficacité des raidisseurs semble d'autant mieux

Répartition des déformations longitudinales le long des raidisseurs en fonction de la charge P

Variation en fonction de la charge P de la tension longitudinale moyenne dans la section XX

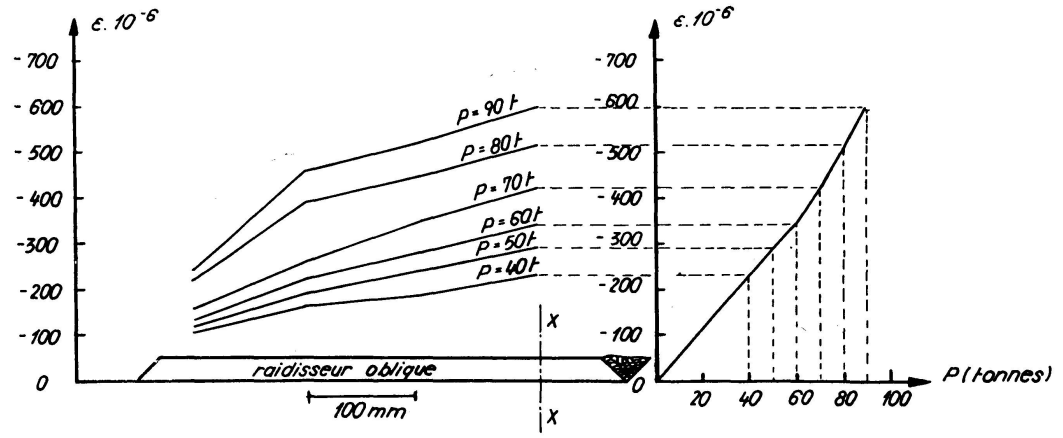


Fig. 27. About de pont n° 3 partiellement raidi. Essai n° 12.

assurée qu'ils intéressent une plus grande partie de l'about. Dans le but de pouvoir étudier le type de raidisseur représenté sur la fig. 20b sans devoir recourir à la fabrication d'un nouveau modèle, l'essai destructif, au stade de la fig. 20a, a été arrêté lorsque la charge P atteint la valeur de 104 tonnes. A ce moment, aucune déformation transversale au plan moyen n'est mesurée.

La fig. 27 donne la répartition des déformations longitudinales dans le raidisseur oblique; tout se passe élastiquement jusqu'à $P = 60$ tonnes (voir diagramme ϵ, P). A partir de cette charge, ces déformations croissent fortement près du congé et elles accusent une décroissance importante près de l'extrémité libre.

2. Essai destructif sur about non recuit et complètement raidi

Les raidisseurs sont continués par des plats horizontaux de mêmes dimensions (fig. 20b). Pour réduire le bridage, la soudure bout à bout est réalisée avant les cordons d'angle fixant les raidisseurs horizontaux à l'âme. Les fig. 24 et 25 donnent, pour $P = 20$ tonnes, la distribution des tensions longitudinales dans les membrures, dans les semelles et dans les raidisseurs, dans les trois cas de l'about successivement non raidi, raidi partiellement et complètement raidi. L'examen de ces figures conduit aux observations suivantes:

a) le prolongement du raidisseur oblique n'a pratiquement aucune influence sur le comportement des membrures;
b) il abaisse le niveau des tensions dans la semelle supérieure de l'about et le relève dans la semelle inférieure; cette influence contrecarre l'effet précédemment observé des raidisseurs partiels;
c) les tensions dans la partie oblique du raidisseur sont plus élevées et mieux réparties lorsqu'il est prolongé horizontalement. Au droit du changement de direction, les tensions longitudinales de compression décroissent rapidement jusqu'à devenir des tensions de traction à l'extrémité du raidisseur horizontal.

Les rosettes placées sur l'âme donnent sensiblement les mêmes indications que celles relevées lors de l'essai de l'about partiellement raidi.

La fig. 28 donne l'évolution en fonction de la charge P de la répartition des déformations longitudinales moyennes le long du raidisseur mi-oblique mi-horizontal; tout se passe élastiquement dans la partie oblique, jusqu'à $P = 90$ tonnes; dans la partie horizontale, la limite élastique correspond à $P = 60$ tonnes. Ceci provient de ce que, lors de l'essai précédent qui a été poursuivi jusqu'à $P = 104$ tonnes, la partie oblique a été soumise à des tensions supérieures à la limite élastique, le palier correspondant à l'acier de cette partie du raidisseur a ainsi été relevé.

Au contraire, la partie horizontale du raidisseur est sollicitée pour la première fois; elle est fixée à une zone de l'about directement influencée par la réaction dont la transmission est en majeure partie réalisée par les raidisseurs

verticaux. L'évolution des tensions met en évidence une tendance à l'uniformisation qui débute dans la zone voisine du congé pour se propager progressivement dans toute l'étendue du raidisseur oblique. La variation brusque de tension, au droit du changement de direction, conserve durant tout l'essai la même intensité.

Contrairement à ce qui se passe dans les raidisseurs obliques pratiquement soumis à compression simple, les raidisseurs horizontaux fléchissent au droit des raidisseurs verticaux. Ils prennent au droit de la section $A\,B$ (fig. 29) une

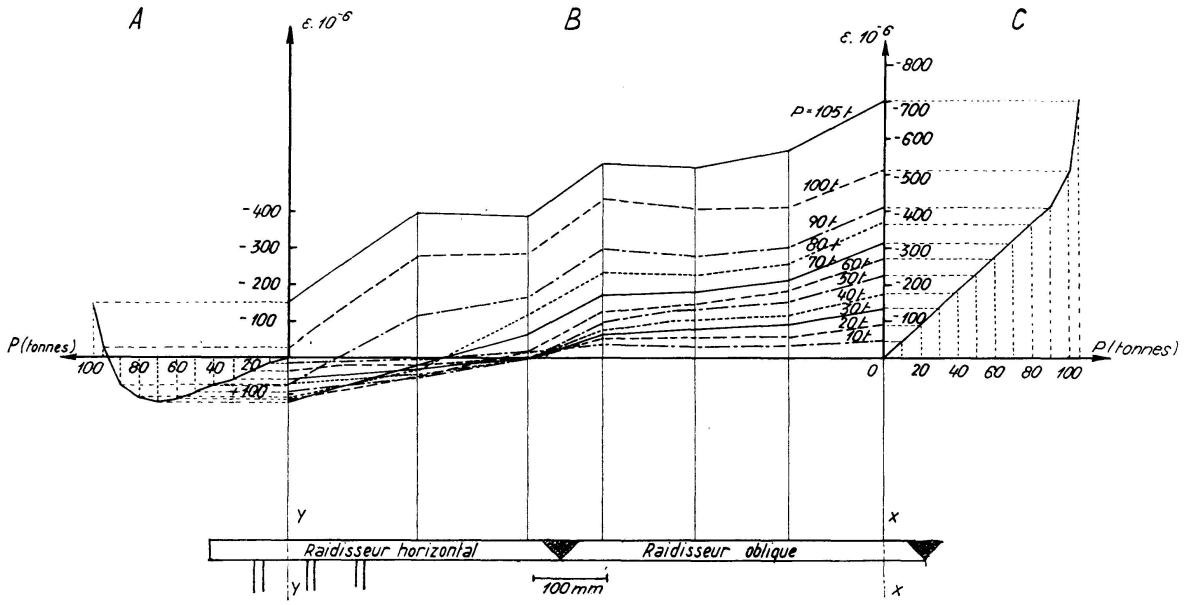


Fig. 28. About de pont n° 3 totalement raidi. Essai n° 12.

A = Variation en fonction de la charge P de la déformation longitudinale moyenne dans la section YY

B = Répartition des déformations longitudinales le long des raidisseurs en fonction de la charge P

C = Variation en fonction de la charge P de la déformation longitudinale moyenne dans la section XX

déformée concave vers le bas tandis qu'un moment d'encastrement se développe dans la section $C\,D$ où la déformée est concave vers le haut. Ce moment d'encastrement reste constant quelle que soit la charge tandis que le moment au droit des raidisseurs verticaux (section $A\,B$) croît avec elle. Ce léger accroîssement du moment de flexion combiné à la hausse sensible de la compression donne lieu à des diagrammes (P, ϵ), où les déformations subissent une inversion (fig. 29a, b, c).

La fig. 30 donne la répartition des tensions verticales relevées dans une section horizontale $A\,A$ voisine de l'appui.

Cette répartition est exactement la même que le raidissage soit partiel (fig. 20a) ou total (fig. 20b). On mesure une tension moyenne qui vaut, pour $P = 20$ tonnes, dans l'âme ($\Omega = 350 \times 9\,\text{mm}^2$) 1,7 kg/mm^2, dans les six raidisseurs

($\Omega = 6 \times 50 \times 10\,mm^2$) 3,3 kg/mm² et dans la semelle verticale ($\Omega = 130 \times 25\,mm^2$) 1,4 kg/mm², cette dernière valeur étant déterminée par extrapolation.

L'effort total dans ces éléments vaut: $3150 \times 1{,}7 + 3000 \times 3{,}3 + 325 \times 1{,}4 =$ 19 800 kg soit une valeur sensiblement égale à celle de la réaction $P = 20$ tonnes.

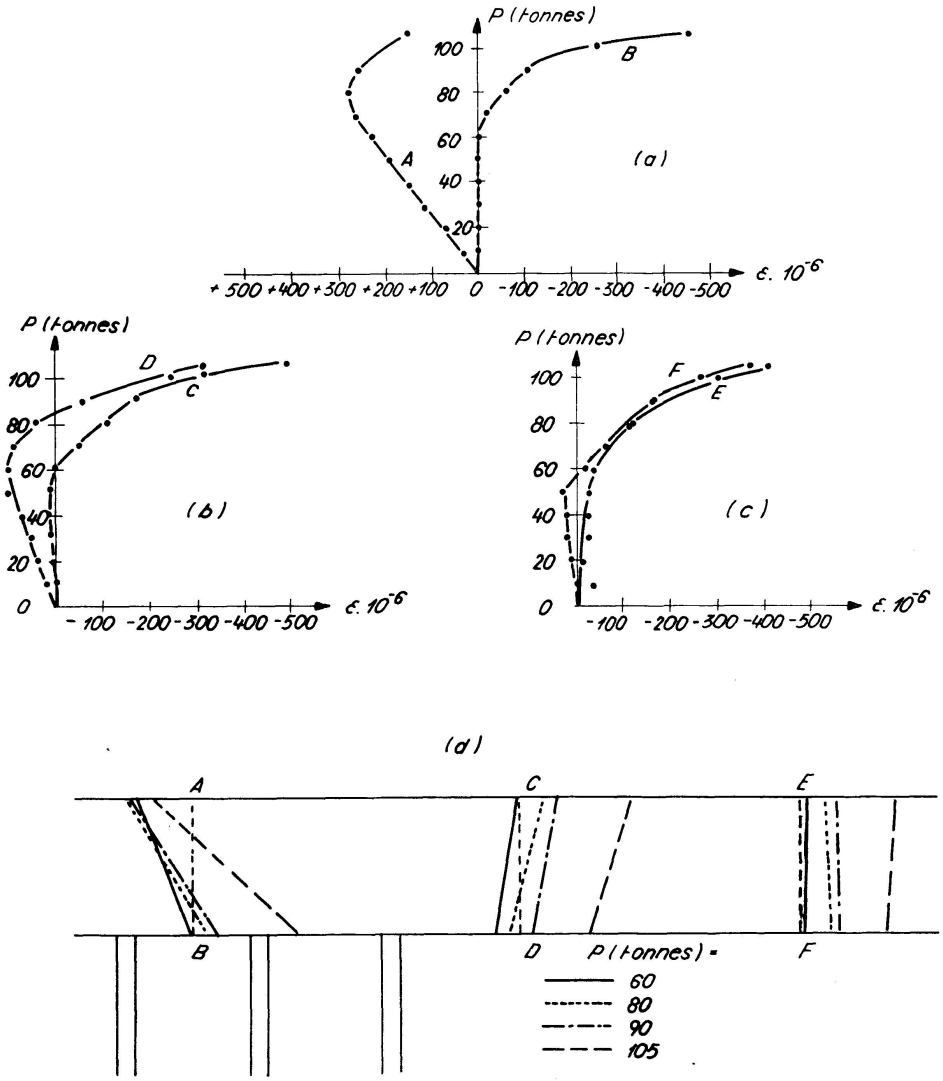


Fig. 29.

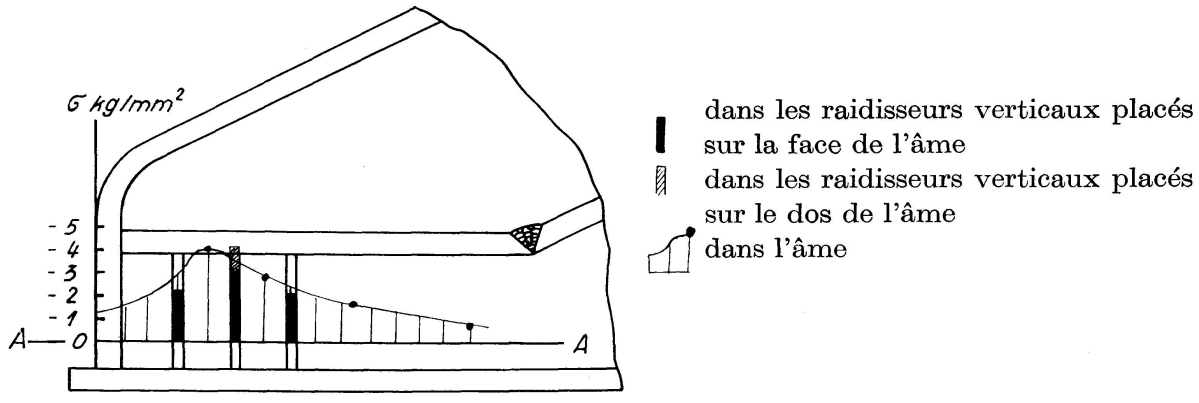


Fig. 30.

Le diagramme des tensions longitudinales dans une section transversale au raidisseur située à 150 mm du congé, est donné sur la fig. 31.

Ainsi qu'il a été expliqué ci-dessus, l'allure de ce diagramme diffère peu de celle relevée lors du raidissage partiel, la grandeur des tensions étant évidemment différente.

Lors de l'essai, quand la charge P atteint la valeur de 90 tonnes, un début de déformation apparaît dans la semelle inférieure du modèle: la partie située

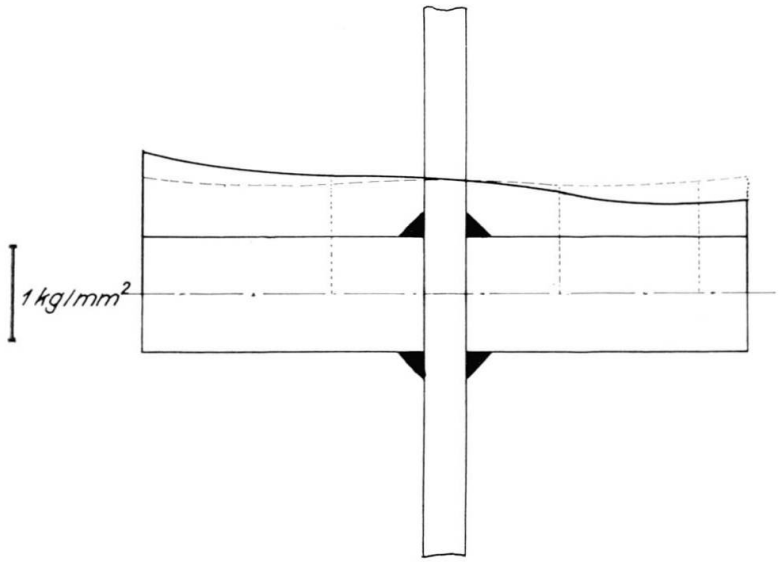


Fig. 31. Répartition des tensions longitudinales moyennes dans les raidisseurs. About de pont n° 4 renforcé complètement raidi ($P = 20$ tonnes).

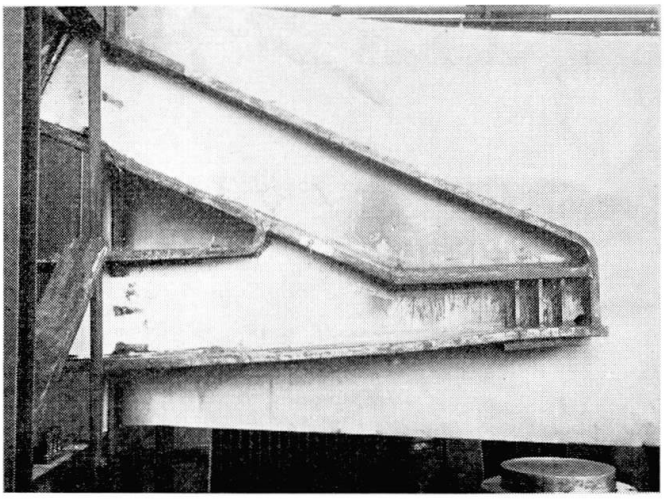


Fig. 32.

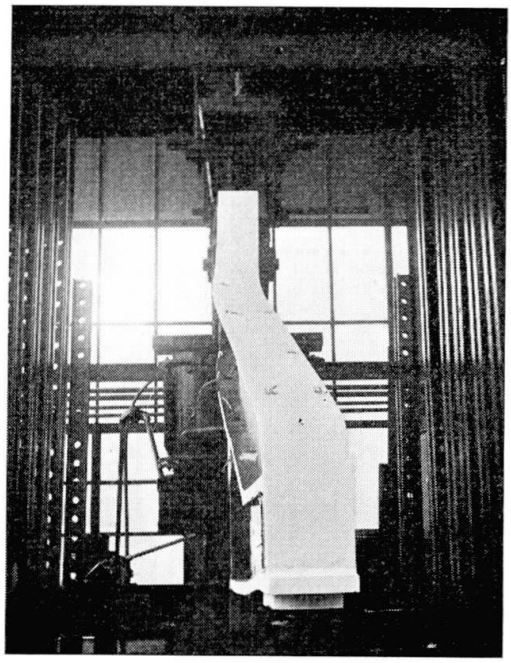


Fig. 33.

About de pont complètement raidi après la ruine.

sous les raidisseurs verticaux subit une translation vers le haut, tout en restant horizontale; la partie située sous le raidisseur oblique et sous la membrure inférieure demeure également horizontale, la partie intermédiaire de la semelle prend une légère inclinaison qui s'amplifie avec la charge (fig. 32 et 33).

L'accroissement de la charge ne donne lieu à aucun déplacement transversal. Le flambement de la membrure supérieure s'amorce en dehors de l'about lorsque la charge atteint 105 tonnes et s'amplifie jusqu'à la charge ultime de 110 tonnes. L'essai est arrêté car la charge décroît et la déformation de flambement s'amplifie fortement; la déformée finale de la membrure est visible sur la fig. 33.

La ruine étant reportée dans la membrure supérieure, l'efficacité du raidissage ainsi réalisé dans l'about semble pouvoir être admise.

Cependant, vu la différence relativement faible entre les charges des abouts raidi et non raidi (110 tonnes et 91,3 tonnes), il a été décidé de renforcer par un plat 180×25 soudé sur les semelles de l'about à l'exclusion de l'extrémité verticale peu sollicitée (fig. 34) et de diminuer ainsi la section relative de l'âme afin de mettre mieux en évidence l'efficacité du raidissage.

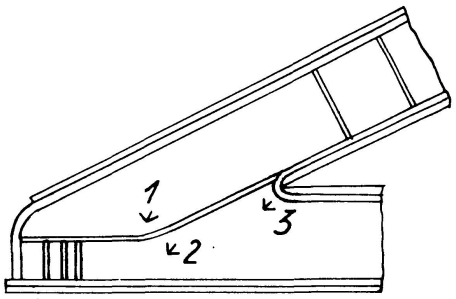


Fig. 34.

La section initiale des membrures est ainsi portée de 89 cm² à 179 cm² tandis que le I/v des membrures par rapport à l'axe médian de l'âme passe de 900 cm³ à 2130 cm³. Le raidissage est évidemment conservé.

3. Essai sur about non recuit à semelles renforcées et complètement raidi

La mise en charge n° 12 (voir tableau II) a été seule réalisée.

a) Appareils de mesure et résultats

Des jauges ohmiques sont placées sur le raidisseur principal ainsi que sur la semelle inférieure de la membrure supérieure.

En outre, trois rosettes sont collées sur l'âme de l'about (fig. 34); la rosette n° 2 n'a toutefois pas fonctionné lors de l'essai.

Les directions principales sont pratiquement les mêmes que celles déterminées sur les trois modèles précédents.

Les tensions tangentielles correspondant à $P = 20$ tonnes et mesurées aux points 1 et 3 (fig. 34), varient en fonction du raidissage comme le montre le tableau IV.

Tableau IV

About de pont	$\tau_{max.}$ pour $P = 20$ t (kg/mm²)		P ruine (tonnes)
	en 1	en 3	
N° 1 recuit et non raidi	4,0	4,6	72,8
N° 2 non recuit et non raidi	3,8	4,1	91,3
N° 3 non recuit et non raidi	3,8	4,0	—
N° 3 non recuit et partiellement raidi . .	2,8	2,9	104
N° 3 non recuit et raidi	—	2,9	110
N° 4 non recuit, renforcé et raidi	2,4	3,3	166

Le raidissage réduit donc de 25 à 40% environ l'intensité des tensions en ces endroits 1 et 3 de l'âme.

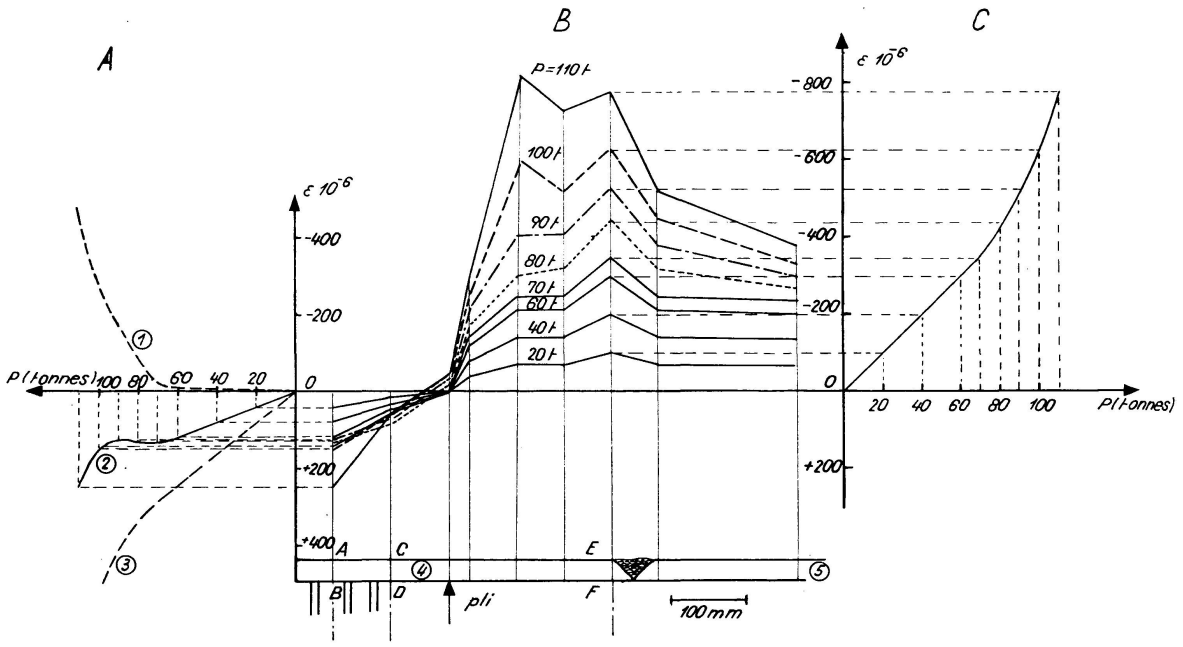


Fig. 35. About de pont n° 4 renforcé totalement raidi. Essai n° 12.

A = Variation en fonction de la charge P de la déformation longitudinale moyenne dans la section AB

B = Répartition des déformations longitudinales le long des raidisseurs en fonction de la charge P

C = Variation en fonction de la charge P de la déformation longitudinale moyenne dans la section EF

1 = à la face inférieure
2 = déformation moyenne
3 = à la face supérieure
4 = raidisseur mi-horiz. mi-oblique
5 = semelle inférieure de la membrure supérieure

b) Comportement des raidisseurs

La variation de la déformation longitudinale moyenne dans les raidisseurs et dans la semelle inférieure de la membrure supérieure est donnée à la fig. 35.

Le comportement est élastique jusqu'à la charge $P = 70$ tonnes, la répartition des tensions est analogue à celle observée lors de l'essai précédent. Ici encore l'extrémité des raidisseurs horizontaux subit une flexion concave vers le bas dans la section AB et vers le haut dans la section CD; dans la phase ultime, les allongements l'emportent nettement sur les contractions, contrairement à ce qui avait été constaté dans le modèle précédent. La ruine s'est en effet produite dans ce dernier cas par amplification, dans l'extrémité de l'about, des déformations initialement engendrées dans la phase élastique. Dans l'about raidi non renforcé, la ruine s'est au contraire produite par surcroît de compression de la membrure comprimée. Cette observation illustre l'appel des efforts vers les zones les plus renforcées, c'est-à-dire les raidisseurs obliques dans le cas de l'about raidi non renforcé et les semelles dans le cas de l'about raidi renforcé.

c) Mode de ruine

L'essai a été poursuivi jusqu'à ce que la charge P atteigne 166 tonnes, valeur pour laquelle la déformation d'ensemble devient trop conséquente. A ce moment d'ailleurs, la charge ne croît plus que très faiblement. Aucune déformation normale au plan moyen de l'about n'est observée, seule la semelle inférieure se déforme de la même manière que celle du troisième about complètement raidi (fig. 36 à 38); elle entraîne avec elle les raidisseurs verticaux, l'extrémité des raidisseurs horizontaux et, dans une mesure moindre, la semelle supérieure.

La couche de lait de chaux s'est uniquement écaillée à l'extrémité de l'about (fig. 36 et 37), la zone du congé est donc soulagée par la présence des raidisseurs.

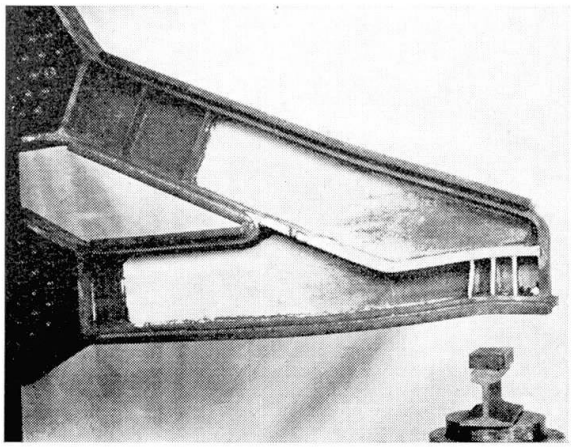


Fig. 36.

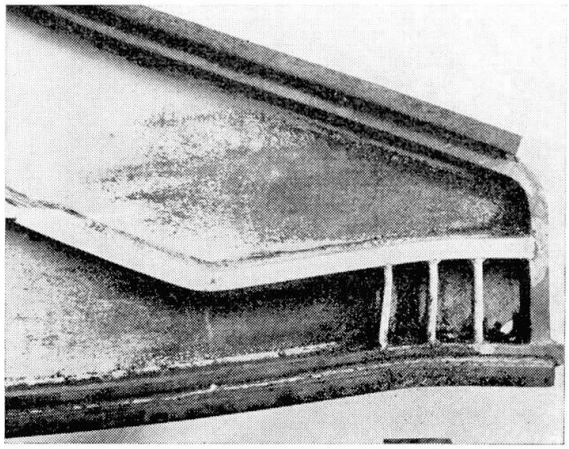


Fig. 37.

About de pont renforcé et complètement raidi après la ruine.

Comme on craignait que la partie inférieure de l'âme du modèle ne soit insuffisante pour résister à l'effort de compression résultant du changement de direction des raidisseurs, deux pièces d'acier verticales ont été placées à frottement doux entre le pli des raidisseurs et la semelle inférieure (fig. 39).

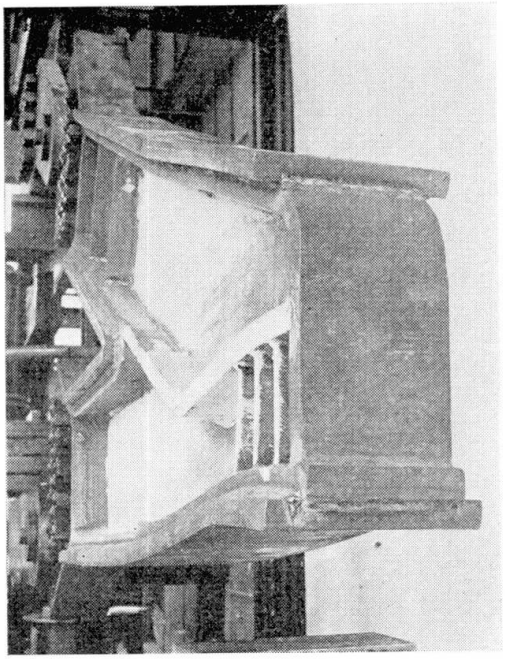


Fig. 38. About de pont renforcé et complètement raidi après la ruine.

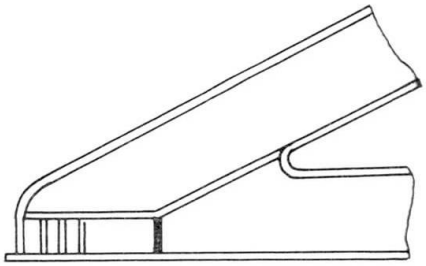
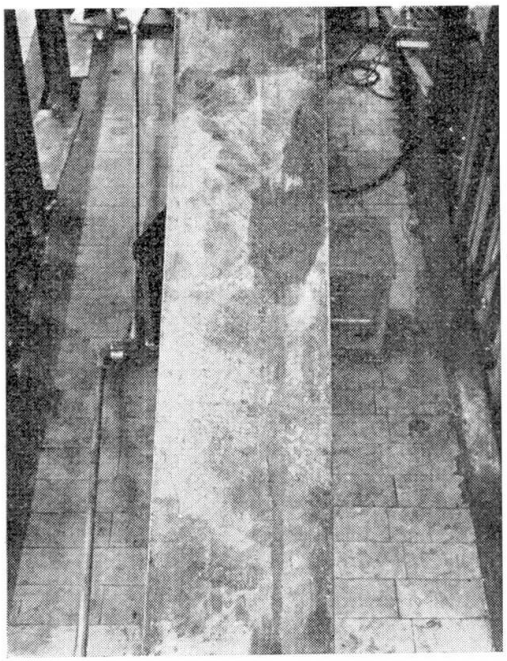


Fig. 39.

Ces pièces n'ont coincé à aucun moment, ce qui montre que dans le cas de l'expérience, des raidisseurs verticaux en cet endroit ne sont pas nécessaires, encore que leur présence ne nuirait en rien à la stabilité de l'about et n'entraînerait aucun danger dû au soudage.



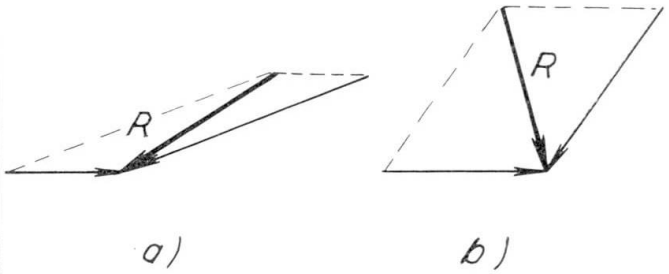


Fig. 40.

Fig. 41. Semelle supérieure de l'about de pont renforcé et complètement raidi après la ruine.

Les mesures tensométriques montrent qu'au droit du changement de direction, l'effort comprimant la partie oblique des raidisseurs, s'annule rapidement de sorte que la résultante des efforts agissant de part et d'autre du pli est faible et a une direction plus horizontale que verticale (fig. 40a). Au contraire; dans l'about non renforcé, les efforts de compression agissant dans les parties oblique et horizontale tendent à s'égaler de sorte que leur résultante acquière une direction proche de la verticale (fig. 40b). Les fig. 38 et 41 montrent que le plan moyen de l'about est resté vertical. La fig. 41 montre un écaillage de la calamine à la surface de la semelle supérieure: les deux réseaux orthogonaux de stries inclinées à 45° sur l'axe longitudinal de la semelle donnent l'orientation des facettes suivant lesquelles se sont produits les glissements maxima.

L'absence de tout voilement de l'âme montre l'efficacité du raidissage adopté.

V. Conclusions

1. Les essais sur les abouts de pont non raidis recuit et non recuit, dont les charges P à la ruine sont respectivement égales à 72,8 et 91,3 tonnes, mettent en évidence le rôle favorable des tensions résiduelles de traction, de soudage et de laminage, sur le voilement d'une âme d'élancement de l'ordre de 60. Ce rôle serait probablement moins favorable pour des élancements d'âme élevés suite à l'influence plus grande des tensions de membrane. Cet écart résulte aussi partiellement de l'abaissement du niveau de la limite élastique de l'acier dû à l'opération de recuit.

2. L'allure des isostatiques reste pratiquement la même, que l'about soit non raidi, raidi partiellement ou complètement, l'introduction des raidisseurs orientés suivant les isostatiques de compression ne perturbe donc pas leur allure.

3. L'étude tensométrique montre que les raidisseurs et particulièrement leurs extrémités libres, concentrent les tensions dans leur voisinage. Ils réduisent et, dans une certaine mesure, uniformisent les tensions dans l'entièreté de la zone raidie. Leur influence est concrétisée dans le tableau IV qui donne la comparaison des intensités des tensions de cisaillement dans l'âme correspondant à $P = 20$ tonnes et mesurées aux points 1 et 3 repérés sur la fig. 34.

4. Le raidissage, éprouvé lors de ces essais, est simple et rationnel; son exécution pratique peut s'inspirer du croquis de la fig. 14. Il y a intérêt à renforcer l'âme le long de la ligne de transmission des efforts, ce qui peut se réaliser en prolongeant jusqu'à l'appui, la membrune comprimée et en fixant à celle-ci la membrure tendue. Ce principe a reçu une bonne confirmation lors des essais sur modèles réduits en carton.

5. L'essai sur le dernier modèle montre l'efficacité du raidissage, d'une part, lorsque l'inertie de l'âme est réduite par rapport à celle des semelles, et d'autre part, lorsque le raidisseur prolonge la semelle inférieure de la membrure comprimée, sa section pouvait être une partie seulement de celle de la semelle.

6. Les résultats de cette étude expérimentale permettent d'aboutir à une conception saine des nœuds d'abouts de maîtresses-poutres Bowstring ou Vierendeel; ils peuvent être étendus à toutes les pièces métalliques qui réalisent, au droit d'un effort concentré, la jonction de deux poutres, l'une tendue et l'autre comprimée: abouts de poutres en treillis, consoles évidées supportant par exemple le chemin de roulement d'un pont roulant.

Résumé

Le but de cette étude expérimentale est d'aboutir à une conception saine des abouts de maîtresse-poutre de pont du type Bowstring ou Vierendeel. Elle conduit à un mode de raidissage rationnel et strictement nécessaire au bon comportement de ces pièces d'extrémités.

La position des raidisseurs a été adoptée à partir de mesures des tensions sur éléments non raidis en acier et d'essais sur modèles en carton. Des essais sur des abouts raidis en acier ont ensuite montré le bon comportement de la solution adoptée.

Zusammenfassung

Die Versuche bezwecken die Entwicklung einer besseren Ausbildung der Endknotenpunkte von Parabelträger- und Vierendeel-Brücken. Es wird eine zweckmäßige Verteilung der Aussteifungen beschrieben, die auch sicherheitsmäßig das gute Verhalten dieser Brückenteile gewährleistet.

Die Anordnung der Aussteifungen wurde zunächst durch Spannungsmessungen an nicht versteiften Elementen sowie durch Versuche an Kartonmodellen ermittelt. Abschließende Versuche an Endknotenpunkten aus Stahl haben die Zweckmäßigkeit und das gute Verhalten der gewählten Lösung gezeigt.

Summary

The purpose of this study is the development of a safe design of the ends of Bowstring or Vierendeel girders. It leads to a rational method of stiffening, required for the adequate behaviour of these members.

The position of the stiffeners was determined from stress measurements on members without stiffening and tests on cardboard models. Then, tests on stiffened steel members confirmed the proposed solution.