

L'OSSATURE MÉTALLIQUE

REVUE MENSUELLE DES APPLICATIONS DE L'ACIER

14^e ANNÉE - N° 9

SEPTEMBRE 1949

E. Dorlet,
Ingénieur (A. I. Br.)
à la S. A. John Cockerill
Professeur à l'Ecole Industrielle
Supérieure de Seraing

Le pont-route de Fragnée à Liège

Le Pont de Fragnée, franchissant la Meuse, a toujours fait l'orgueil de la Ville de Liège. Bel ouvrage de style, aux arcs de belle envolée, ce pont avait été construit en 1905 pour l'Exposition Universelle de Liège. Il a fait l'admiration, non

seulement des Liégeois, mais aussi des visiteurs de la Ville : sa ligne gracieuse rappelait le Pont Alexandre III, à Paris.

Détruit lors des événements de mai 1940 par le Génie militaire belge, le pont-route de Fragnée

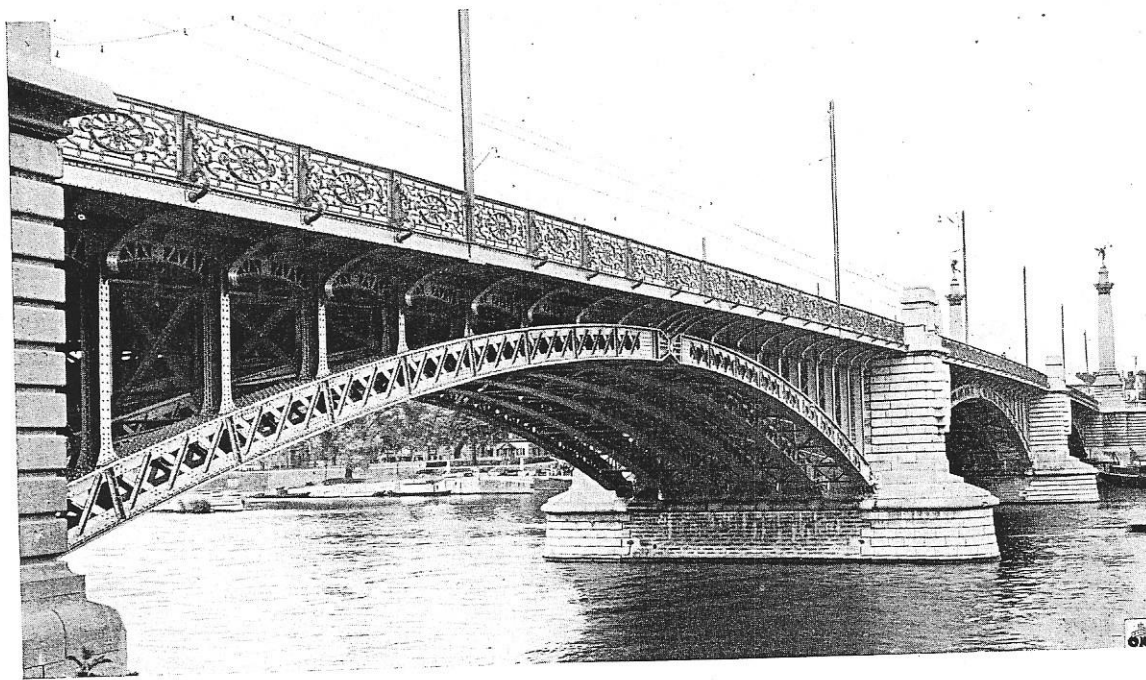


Fig. 537. Vue d'ensemble du nouveau pont de Fragnée à Liège.

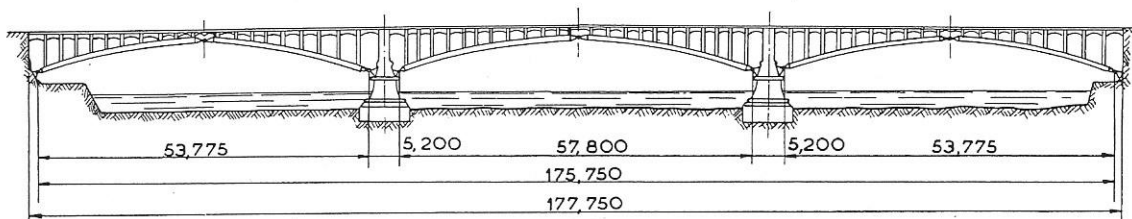


Fig. 538. Elévation du pont de Fragnée sur la Meuse.

fut reconstruit en 1948 ⁽¹⁾. L'inauguration officielle du 4 novembre 1948 a rendu aux Liégeois un de leurs monuments caractéristiques ⁽²⁾.

La figure 537 met en évidence la ligne audacieuse conçue dès 1905 par les constructeurs de cet ouvrage.

L'étude du nouvel ouvrage, ainsi que sa construction avaient été confiées par l'Administration des Ponts et Chaussées, à la S. A. John Cockerill, à Seraing, qui avait d'ailleurs construit le premier pont en 1905.

MM. Honorez, Directeur, et Hormidas, Ingénieur principal des Ponts et Chaussées ⁽³⁾, contrôlèrent, avec un talent auquel il nous plaît de rendre hommage, tant l'étude que la réalisation du nouveau pont.

Dimensions

Le pont-route de Fragnée est constitué de trois arches qui, mesurées d'axe en axe des rotules de retombée, ont respectivement une portée de 53^m775 pour chacune des travées de rive, et de 57^m800 pour la travée centrale.

L'écartement des rotules de retombée de deux travées adjacentes étant égal à 5^m200 d'axe en axe, la longueur totale de l'ouvrage, comptée d'axe en axe des rotules sur culées, est donc égale à 175^m750.

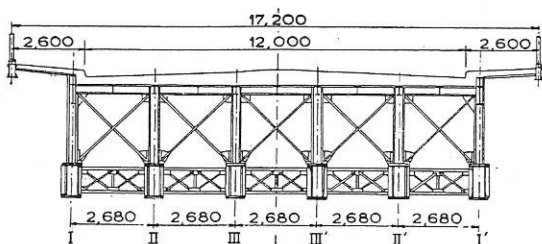


Fig. 539. Coupe transversale du pont de Fragnée.

La largeur de la chaussée, entre bordures des trottoirs, est de 12 mètres, alors que sur l'ouvrage primitif elle était de 10 mètres. Deux trottoirs latéraux, partiellement en porte-à-faux, ont chacun une largeur de 2^m600.

La largeur totale de l'ouvrage est donc de 17^m200 d'axe en axe des garde-corps.

Les figures 538 et 539 donnent les dimensions principales de l'ouvrage.

Constitution

Le pont est du type en arc à tablier supérieur.

Arcs

La structure métallique portante de chaque arche est constituée de six arcs en treillis à trois articulations, de forme parabolique.

Ce type d'ouvrage se prête bien à l'emploi d'arcs à âme pleine; toutefois, pour conserver au pont son caractère coutumier dans le paysage liégeois, le treillis serré prévu sur l'ancien ouvrage fut conservé.

La flèche des arcs de la travée centrale a 5^m6122 tandis que pour les travées de rive elle a 5^m0763. Le surbaissement de l'arc est donc de $\frac{1}{10,3}$ environ dans le premier cas, et de $\frac{1}{10,59}$ dans le second cas.

Chaque arc de la travée centrale est constitué d'une poutre en caisson de 988 mm de hauteur, comprenant :

Pour la membrure supérieure :

- 4 semelles de 760 × 11 ;
- 4 cornières de 80 × 80 × 11 ;
- 2 âmes de 230 × 15, écartées de 400 mm.

⁽¹⁾ Voir *L'Ossature Métallique*, n° 3, 1948.

⁽²⁾ Voir *L'Ossature Métallique*, n° 12, 1948.

⁽³⁾ M. Hormidas est actuellement Inspecteur Général à l'Urbanisme.



Pour la membrure inférieure : même disposition.

Ces deux membrures sont écartées verticalement (fig. 542) de telle manière que la hauteur hors cornières des brides est de 900 mm.

Chaque arc des travées de rive a la même composition que ceux de la travée centrale sauf les semelles qui sont constituées de plats de 760×10 au lieu de 760×11 .

Les membrures des arcs sont réunies (fig. 540) par un treillis formé par deux diagonales disposées en croix de Saint-André et constituées de fers T de $130 \times 90 \times 10$ placés de part et d'autre des âmes de 230×15 .

Au droit des montants verticaux supportant le platelage, sont prévus, normalement à l'arc, des diaphragmes de liaison. Ils comprennent une âme de 370×8 placée transversalement à l'arc, entre les quatre âmes de 230×15 du caisson d'arc, et y attachée par des cornières de $80 \times 80 \times 8$ ou de $100 \times 90 \times 8$, avec interposition des fourrures de remplissage nécessaires. Dans le même plan que l'âme du diaphragme, mais à l'extérieur de l'arc, se trouvent des raidisseurs épaulant les brides et donnant l'impression de montants du treillis de l'arc (fig. 540 et 541). Ces raidisseurs sont constitués de deux cornières de $80 \times 80 \times 8$ pinçant un plat de 90×8 .

Entre les arcs, des goussets de 8 mm d'épaisseur remplacent partiellement ce plat de 90×8 des raidisseurs; le contreventement transversal de liaison des arcs y est attaché.

L'écartement entre arcs est de 2^m680 , le porte-à-faux des trottoirs est donc égal à

$$\frac{1}{2} (17^m200 - 5 \times 2^m680) = 1^m900.$$

Les demi-arcs ne comprennent que des joints d'atelier. Le constructeur s'est, en effet, inspiré du principe de la préfabrication en usine pour réduire les opérations de montage sur place et pouvoir expédier chaque demi-arc en une pièce.

En atelier, ces demi-arcs ont été constitués de quatre tronçons. Le joint d'atelier est simple (fig. 542 et 544) :

a) Les semelles des deux membrures ont été débitées en coupes étagées de façon à réaliser un angle aigu s'emboîtant dans l'angle obtus correspondant du tronçon adjacent. Les semelles d'un tronçon jouent donc le rôle de couvre-joint pour les semelles de l'autre tronçon. Le joint des semelles est complété par un couvre-joint extérieur de 760×11 et des couvre-joints partiels intérieurs de 240×10 et deux plats de 85×10 , placés contre les cornières-bridés;

b) Les cornières-bridés de $80 \times 80 \times 8$ sont remplacées par des couvre-joints en cornière de $70 \times 70 \times 13$;

c) Les âmes de 230×15 sont remplacées chacune par deux couvre-joints de 150×16 .

Les éléments des arcs sont assemblés par rivets de 22,5 mm de diamètre, sauf dans les plats couvre-joints de 85 et 240×10 assemblés par rivets de 25,5 mm de diamètre.

Les six arcs de la travée centrale pèsent ensemble 340 000 kg, soit 28 335 kg par demi-arc.

Le poids total des douze arcs de rive est de 602 000 kg, soit 25 100 kg par demi-arc.

Montants

Chaque demi-arc de la travée centrale porte 11 montants verticaux (fig. 537 et 538), écartés de 2^m680 d'axe en axe, tandis que dans les travées de rive, chaque demi-arc supporte 10 montants verticaux écartés de 2^m754 (fig. 538).

Ces montants, dans une même section transversale, sont réunis en tête par une traverse horizontale.

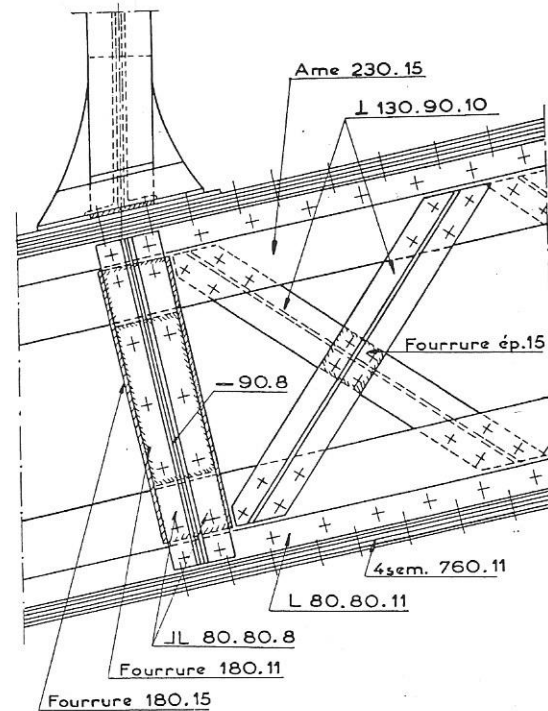


Fig. 540. Détail du treillis des arcs du pont de Fragnée.

La longueur théorique variant d'un montant à l'autre (longueur maximum : 4^m650), il a été admis des profils différents pour chacun d'eux, toutefois, les montants se trouvant dans une même section transversale ont le même profil.

La constitution est la suivante :

- 1 âme de 400 × 8 ;
- 4 cornières d'un profil variant de 80 × 80 × 8 à 90 × 90 × 13 suivant l'élançement (64 à 133) de la pièce.

La fixation des montants à l'arc se fait par cornières tandis qu'un large gousset remplace partiellement l'âme en tête de montant pour y fixer les éléments constitutifs de la traverse horizontale transversale et le contreventement des montants dont il sera question plus loin (fig. 541).

Les deux montants extérieurs dans une même section transversale portent chacun une console extérieure destinée à supporter le platelage des trottoirs. Cette console est profilée en courbe pour laisser à l'ouvrage son esthétique générale (fig. 541).

Platelage de la chaussée et des trottoirs

La chaussée proprement dite, les revêtements des trottoirs et leur fondation reposent sur une surface continue formée de tôles embouties de 8 mm d'épaisseur. Le tablier est étanche.

Les tôles embouties rectangulaires, dont la dimension maximum est de 1 377 mm, doivent reposer sur un quadrillage de poutres.

Celles-ci sont constituées d'une série de traverses, de traversines et de longrines (fig. 545).

a) Les têtes des montants sont réunies dans le plan transversal de l'ouvrage — nous l'avons déjà signalé — par des *traverses* ayant une portée égale à l'écartement entre les axes des arcs (2^m680). Elles sont faites d'une poutre composée de :

- 1 âme de 350 × 8 ;
- 4 cornières de 70 × 70 × 8 ;
- 2 semelles de 170 × 8,

et s'attachent aux goussets de 8 mm d'épaisseur prévus en tête de montant ;

b) Dans le sens longitudinal de l'ouvrage, et dans le même plan vertical que celui contenant l'axe de chaque arc, les têtes des montants sont

réunies par des *longrines* ayant comme portée la distance séparant deux rangées adjacentes de montants d'un même arc (2^m754 pour les travées de rive et 2^m680 pour la travée centrale). Ces longrines ont le même profil que les traverses citées précédemment pour ce qui concerne les montants des arcs intérieurs.

Pour les montants extérieurs directement visibles, ces longrines sont faites d'une poutre en treillis à membrure supérieure (où les tôles embouties s'attachent) horizontale et à membrure inférieure en arc de cercle. La longrine en treillis a une hauteur de 650 mm au montant et de 350 mm au milieu de sa portée; les membrures en sont constituées par deux cornières de 70 × 70 × 8 avec semelles de 200 × 8; les barres du treillis sont en plats de 60 × 8 (fig. 541).

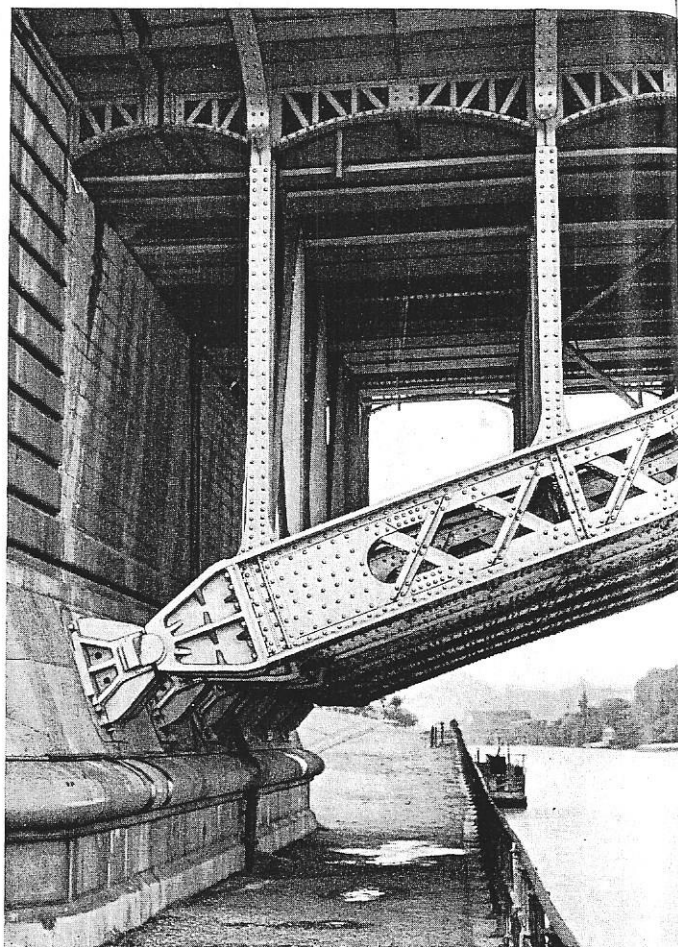


Fig. 541. Détail montrant la retombée de la travée de rive, côté Liège.



Ces longrines en treillis portent, attachée à leur membrure supérieure, une poutre formant longrine du trottoir. Elle est constituée d'une âme de 256×8 et quatre cornières de $70 \times 70 \times 8$; les tôles embouties extrêmes de la chaussée s'attachent à sa bride supérieure tandis que les premières tôles embouties du trottoir sont fixées à sa bride inférieure.

Une deuxième file de *longrines* de même type relie entre elles la partie médiane des traverses;

c) Le tablier de la chaussée est complété enfin par des *traversines* reliant la partie médiane des longrines successives; leur portée est donc égale à un demi-écartement d'arc (1^m340). Elles sont constituées d'une âme de 240×8 et quatre cornières de $70 \times 70 \times 8$.

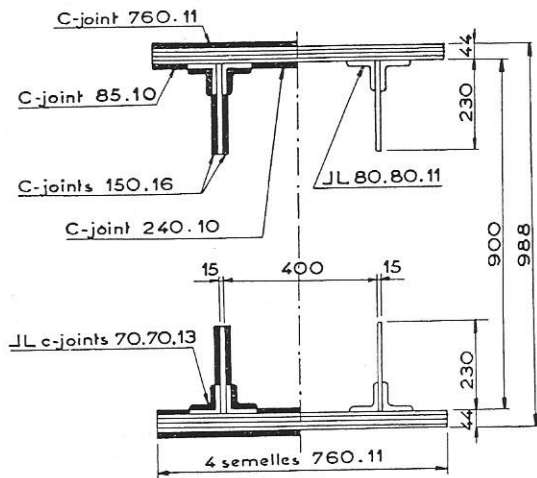


Fig. 542. Section transversale dans un arc de l'arche centrale au droit d'un joint (à gauche) et hors d'un joint (à droite). (Couvre-joints en noir.)

Le tablier des trottoirs comprend :

a) Les *longrines* sur longrines en treillis de la chaussée, envisagées précédemment;

b) Une série de *consols* attachées en tête des montants, donc écartées de 2^m754 pour les travées de rive et de 2^m680 pour la travée centrale. Elles sont constituées d'une âme découpée, suivant un profil harmonieux, de 8 mm d'épaisseur, et de quatre cornières de $70 \times 70 \times 8$;

c) Ces consols sont réunies extérieurement par des *poutres sous garde-corps* en forme de caisson, constituées de :

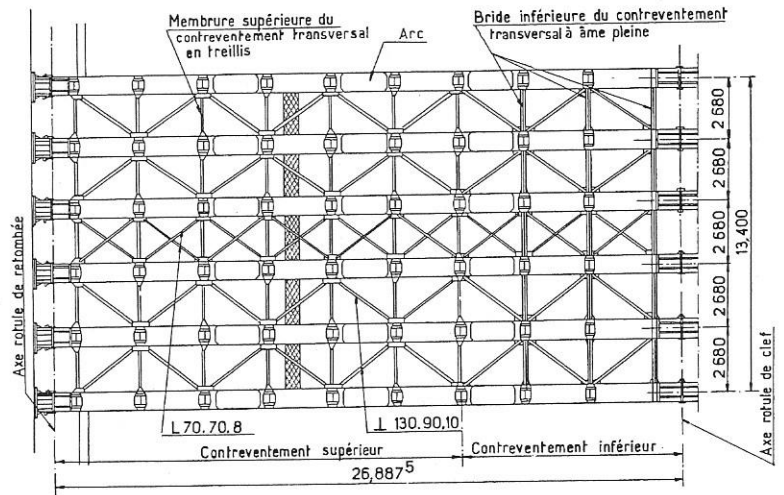


Fig. 543. Système de contreventement des arcs.

- 2 âmes de 350×8 , écartées de 170 mm ;
- 4 cornières de $70 \times 70 \times 8$;
- 2 semelles de 350×8 ;

d) Le rectangle ainsi formé par les poutres précédentes, est à son tour divisé en quatre parties par une *longrine intermédiaire*, reliant la partie médiane des consoles, constituée d'un fer U de $200 \times 75 \times 8,5$ et par deux *traversines*, reliant la partie médiane des longrines sur longrines en treillis de la chaussée à la moitié des poutres sous garde-corps, constituée de deux cornières de $70 \times 70 \times 8$.

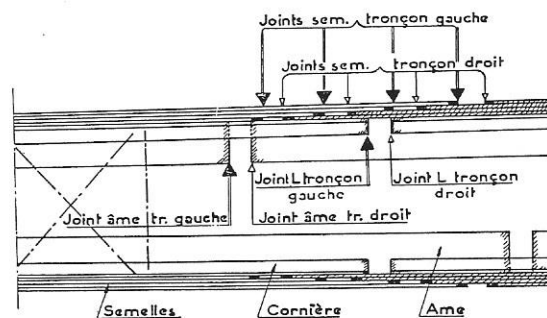


Fig. 544. Principe du joint d'atelier des arcs.

Un entretoisement en cornières de $70 \times 70 \times 8$, disposées en croix de Saint-André, relie ces éléments du trottoir.

Il résulte de l'assemblage de tous ces éléments de la chaussée et des trottoirs, que l'ensemble du tablier est constitué d'une série de rectangles sur lesquels les tôles embouties sont rivées (fig. 545).

Contreventements

Les éléments constitutifs du pont de Fragnée sont fortement entretoisés entre eux.

1. Contreventements transversaux

a) Les arcs sont reliés entre eux au droit des montants par un entretoisement intéressant

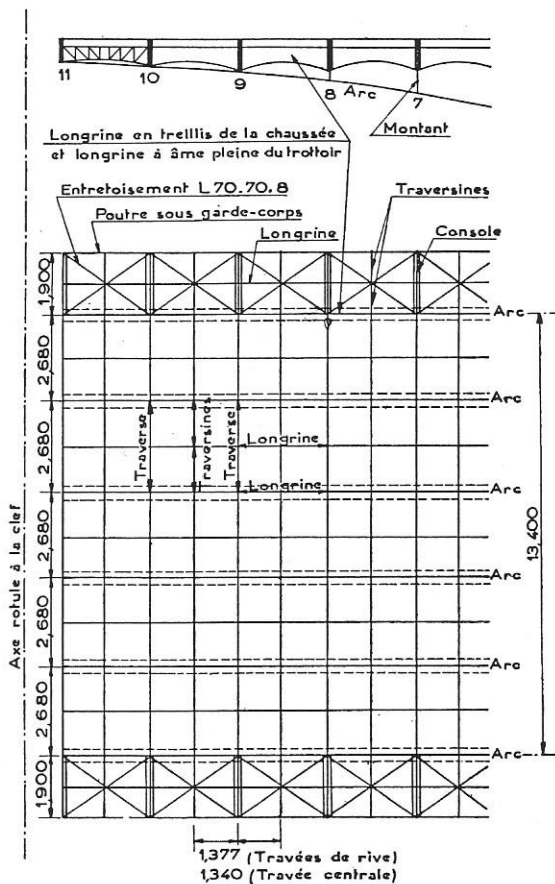


Fig. 545. Vue schématique partielle du plateau.

la hauteur des caissons; il est constitué d'une poutre en treillis à deux panneaux avec diagonales en croix de Saint-André en cornières de $70 \times 50 \times 8$. Les membrures de ce contreventement sont des cornières de $100 \times 75 \times 8$ (fig. 543). Toutefois, au droit des derniers montants, l'entretoisement en treillis est remplacé par une poutre à âme pleine (fig. 547).

b) Les panneaux rectangulaires formés par deux montants adjacents, les traverses du plateau et le contreventement précédent sont entretoisés par une croix de Saint-André dont les deux diagonales sont constituées de fers T de $130 \times 90 \times 10$, attachées sur goussets de 8 mm d'épaisseur (fig. 539).

2. Contreventements longitudinaux

Les six arcs d'une travée sont réunis entre eux par un contreventement supérieur, sauf dans les

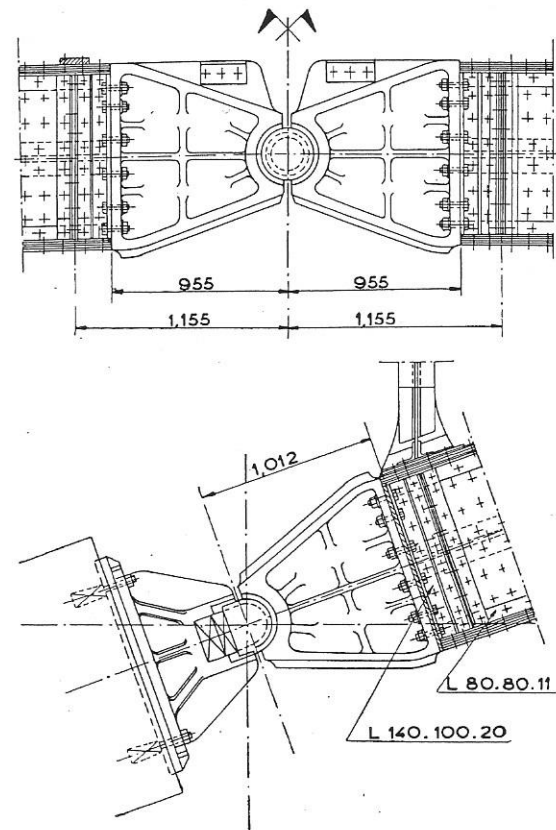


Fig. 546. Appuis de clef et de retombée d'un arc d'une travée de rive.



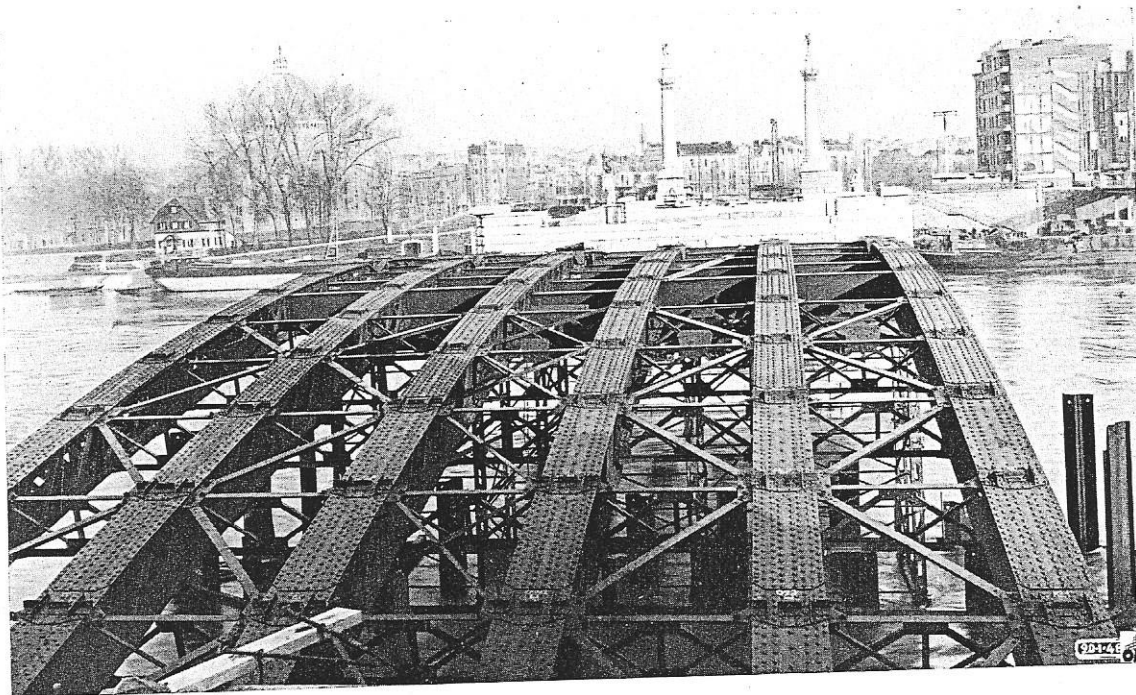


Fig. 547. Vue du pont de Fragnée prise en cours de construction, montrant le montage de la travée de rive, côté Liège.

trois derniers panneaux (chaque panneau ayant une longueur égale à l'écartement entre montants adjacents) où existe un contreventement inférieur (fig. 543, p. 381, et 553, p. 386).

Les diagonales de ces contreventements, disposés en V, sont réalisées par des fers T de $130 \times 90 \times 10$, tandis que les montants sont constitués par les membrures supérieures (ou les brides supérieures des poutres à âme pleine) des contreventements entre arcs.

Dans l'axe longitudinal du pont, le contreventement de chaque panneau est constitué de deux cornières de $70 \times 70 \times 8$ placées en croix de Saint-André.

L'assemblage des éléments se fait par rivets de 22,5 mm de diamètre (sauf pour les cornières de $70 \times 70 \times 8$ qui sont attachées par rivets de 19,5 mm de diamètre) sur goussets de 11 mm d'épaisseur.

Appuis

La figure 546 montre clairement l'appui de la retombée d'un arc d'une travée de rive et l'appui de la clef.

Ces appuis comprennent une rotule en acier forgé insérée entre deux forts sabots en acier moulé.

A la retombée des arcs, un réglage est possible par le fait que la demi-rotule repose sur deux coins obliques (fig. 546).

Montage

Comme on l'a déjà fait remarquer, le constructeur s'est inspiré du principe de la préfabrication en usine pour diminuer le temps de montage. Les demi-arcs d'une arche ont été complètement terminés en usine; ils pesaient jusqu'à 33 tonnes, y compris divers éléments y rivés. Amenés par voie d'eau depuis les usines de Seraing, ils furent levés, par une bigue flottante et mis en place directement en les appuyant, à une extrémité, sur les rotules de retombée, et à l'autre extrémité, sur une palée de montage établie dans l'axe de la passe. Ceci fut rendu possible par les puissants moyens de fabrication et de montage mis en œuvre (fig. 547 et 552).

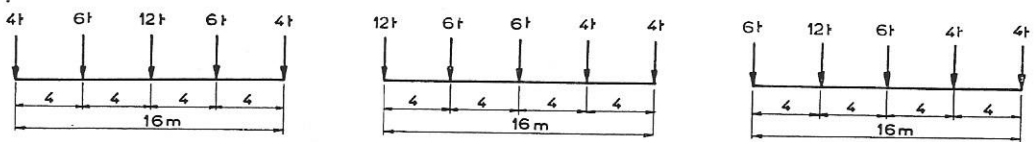


Fig. 548. Sollicitation du pont de Fragnée. Chaque zone étudiée porte un convoi défini comme ci-dessus. Écartement des zones : $1^{\text{m}}700$. Largeur de la zone : $2^{\text{m}}500$.

Par ce procédé, il fut possible de mettre un demi-arc en place en 35 minutes. On procéda ensuite au réglage par positionnement de la rotule de clef.

Les montants, les entretoisements, les éléments du platelage, y compris les tôles embouties, furent ensuite montés sur les arcs.

Le montage sur place, entrepris par la firme A. Janssens, de Hoboken, pour le compte et sous la direction de la S. A. John Cockerill, a nécessité la mise en place, sur chantier, de 140 000 rivets.

Poids de l'ouvrage

Le pont de Fragnée a nécessité la mise en œuvre de :

- 1 977 tonnes d'acier laminé rivé et de tôles embouties;
- 216 tonnes d'acier moulé pour appuis;
- 29 tonnes d'acier forgé pour appuis;
- 8 tonnes de plomb.

Le poids total de la partie métallique, compte non tenu des garde-corps, poteaux d'éclairage, canalisations est donc de 2 230 tonnes.

L'ouvrage a demandé l'emploi de 552 300 rivets dont le poids des têtes (93 000 kg) représente 4 % du poids des éléments rivés.

L'acier laminé est du type courant de l'Administration des Ponts et Chaussées, il présente une résistance à la rupture de 38 à 44 kg/mm^2 , un allongement à la rupture de 20 à 25 %.

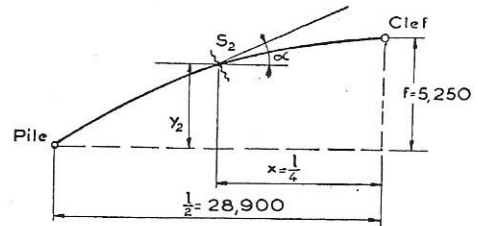


Fig. 550. Localisation des sections étudiées par les lignes d'influence.

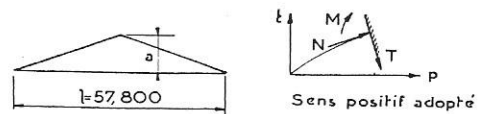


Fig. 551. Ligne d'influence de la poussée horizontale.

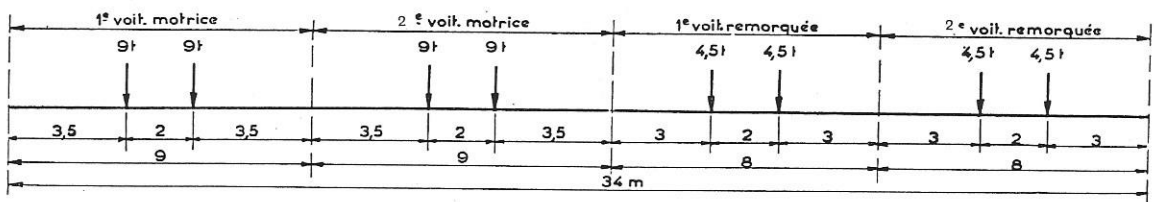


Fig. 549. Sollicitation du pont de Fragnée. Le convoi de tramway envisagé comprend deux voitures motrices et deux voitures remorquées.





Fig. 552. Vue des arcs à trois rotules d'une travée de rive du pont de Fragnée sur la Meuse. La portée des travées de rive est de 53^m775 .

L'acier moulé donne 45 à 55 kg/mm² de résistance à la rupture, 20 % d'allongement, tandis que l'acier forgé répond aux conditions suivantes : 45 à 55 kg/mm² de résistance à la rupture, 20 % d'allongement, 30 kg/mm² de limite élastique.

Décoration

La riche décoration de l'ouvrage est à noter : pylônes d'entrée, statues de bronze, garde-corps remarquable (fig. 537) le tout complétant harmonieusement un ouvrage métallique parfaitement adapté au paysage des alentours.

L'Administration des Ponts et Chaussées et le Constructeur peuvent, à juste titre, être fiers d'avoir rendu à la ville de Liège une œuvre magnifique.

Calcul de l'ouvrage

Il est intéressant de donner quelques détails relatifs à certaines particularités de la détermination des éléments du pont, et notamment d'insister sur la souplesse de la méthode de calcul par les lignes d'influence.

1. CONDITIONS

Les calculs de la structure de l'ouvrage ont été établis en se basant sur les conditions de la circulaire n° 304 de l'Administration des Ponts et Chaussées.

Les tensions admissibles ont été limitées pour tous les éléments, à :

12 kg/mm² sans vent, et
13 kg/mm², en tenant compte de l'action du vent.

Les effets dus aux surcharges mobiles ont été multipliés par un coefficient d'impact uniforme égal à 1,5.

La sollicitation de l'ouvrage a été définie par les données suivantes :

a) Chaque zone étudiée porte un convoi défini à la figure 548.

Ecartement des zones : 1^m700 .

Largeur de la zone : 2^m500 .

b) Le tramway envisagé comprend deux voitures motrices et deux voitures remorquées (fig. 549);

c) Les trottoirs, ainsi que les parties de la chaussée non sollicitées par les convois, reçoivent une surcharge mobile de 500 kg par m².

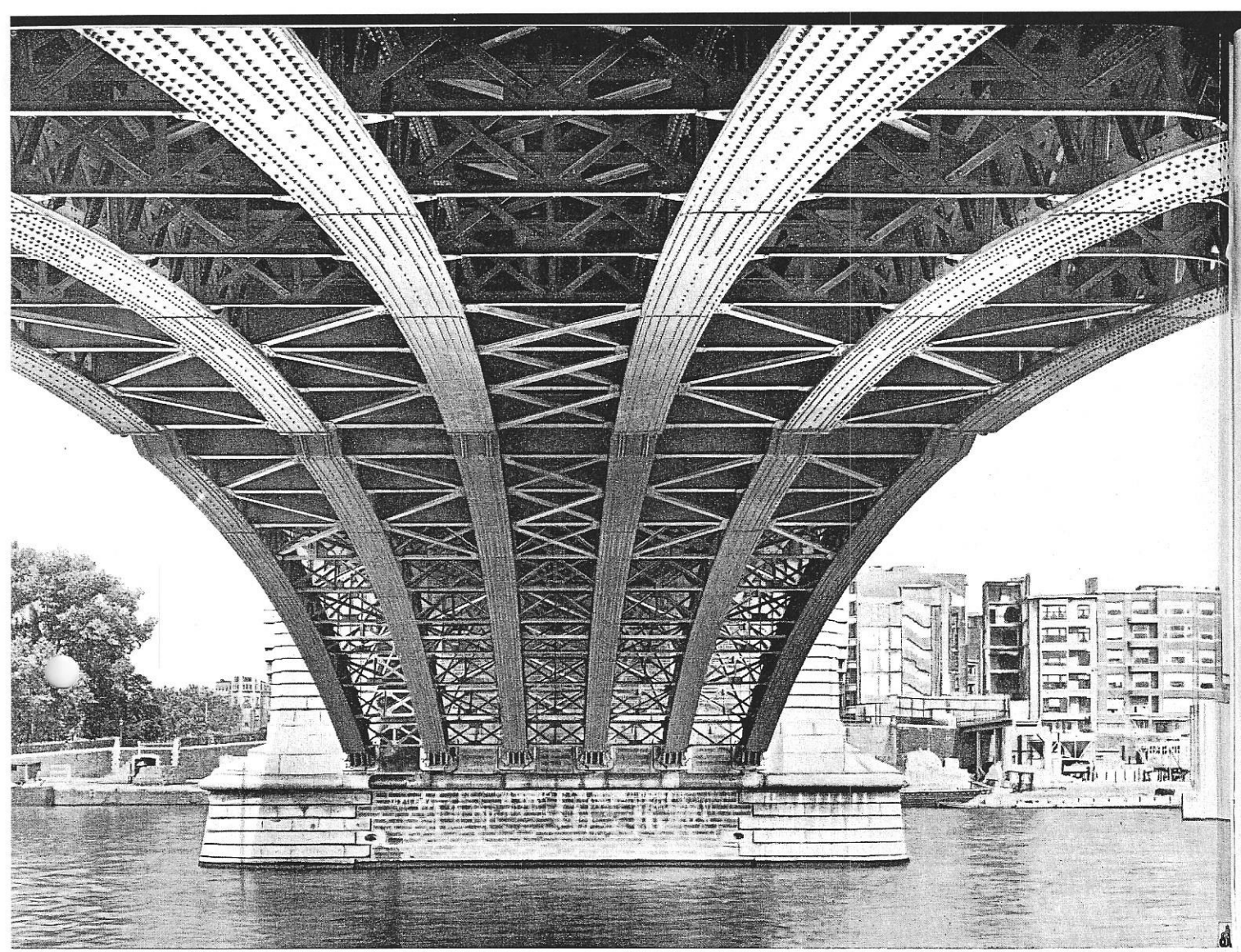


Fig. 553. Vue d'enfilade du pont de Fragnée sur la Meuse montrant les arcs et le contreventement.

2. DÉTERMINATION DES ÉLÉMENTS DE L'OUVRAGE

a) La détermination des éléments du *platalage* ne présente rien de particulier. Notons que le poids mort de la chaussée est de 970 kg/m^2 et celui du trottoir 325 kg/m^2 ;

b) Les efforts et les contraintes dans les arcs ont été déterminés au moyen de lignes d'influence.

Tous les arcs sont de forme parabolique.

On trouvera ci-dessous quelques aspects des lignes d'influence des éléments sollicitants de l'arc de la travée centrale dans a) la section S_2 , située à la moitié de la portée d'un demi-arc; b) à la naissance de l'arc et c) à la clef de l'arc.

Caractéristiques de localisation des sections (fig. 550) :

$$\text{tg } \alpha = \frac{8f}{l^2} \cdot x.$$

	Sections		
	Naissance	S_2	Clef
Inclinaison . . . α	$19^\circ 59'$	$10^\circ 18'$	0
$\cos \alpha$	0,93979	0,98389	1
$\sin \alpha$	0,34175	0,17880	0
flèche m	0	3,9375	5,250

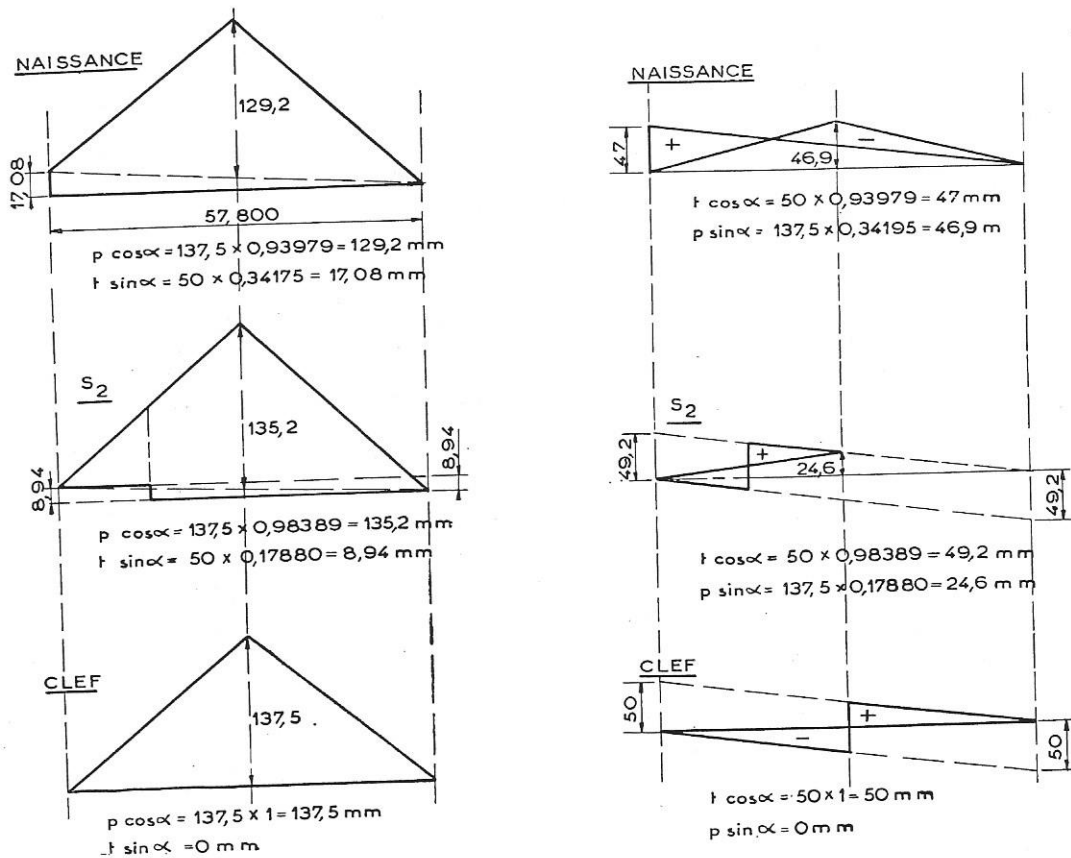


Fig. 554. A gauche : schéma montrant la construction des lignes d'influence des efforts de compression à la naissance, à la section S_2 et à la clef. A droite : ligne d'influence des efforts tranchants à la naissance, à la section S_2 et à la clef.

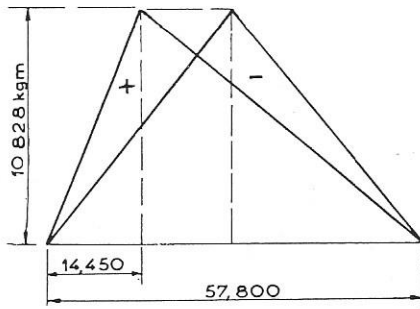


Fig. 555. Ligne d'influence des moments fléchissants dans la section S_2 :

$$m_2 = \frac{1t \times 14,450 \times 43,350}{57,800} = 10,828 \text{ tm.}$$

$$py_2 = \left(\frac{137,5}{50}\right) \times 3,9375 = 10,828 \text{ tm.}$$

Ligne d'influence de la poussée horizontale

Sous le passage d'une charge de 1 tonne, l'ordonnée a , médiane, en admettant par exemple une échelle $1 \text{ t} = 50 \text{ mm}$, aura pour valeur

$$p = \frac{l}{4f} \times 1 \text{ tonne} = \frac{57,80}{4 \times 5,250} \times 50 = 137,5 \text{ mm.}$$

Cette ligne d'influence est employée pour la détermination des autres éléments (fig. 551).

L'aspect des lignes d'influence présentées n'est pas rendu à l'échelle dans le texte, car elles sont purement exemplatives.

Ligne d'influence des efforts normaux de compression (fig. 554)

On a

$$N = p \cos \alpha + t \sin \alpha$$

dans laquelle t = l'effort tranchant au droit de la section considérée en supposant une poutre droite sur deux appuis, soumise aux mêmes charges.

La construction des lignes d'influence se déduit facilement de l'examen de la figure 554.

Ligne d'influence des efforts tranchants (fig. 554)

On a

$$T = t \cos \alpha - p \sin \alpha.$$

Ligne d'influence des moments fléchissants (fig. 555)

On a

$$M = m - py$$

dans laquelle

m = le moment fléchissant au droit de la section considérée en supposant une poutre droite sur deux appuis, soumise aux mêmes charges;

y = la distance du centre de la section considérée à la ligne horizontale joignant les deux appuis.

Echelle de nos épures : $1 \text{ mm} = 100 \text{ kgm.}$

On constate facilement que dans l'arc à trois rotules, le moment m , au droit de la section considérée en supposant une poutre droite, a la même valeur que le moment py de la poussée par rapport au centre de la section considérée

$$m = 1t \cdot \frac{l-x}{l} \cdot x,$$

$$p = 1t \cdot \frac{l}{4f} \quad \text{et} \quad y = \frac{4f(l-x)x}{l^2},$$

$$py = 1t \cdot \frac{l-x}{l} \cdot x.$$

Ligne d'influence des contraintes

a) Pour les fibres de l'extrados, la partie positive du diagramme se rapporte à la compression et la partie négative à la traction

$$R = \frac{N}{S} + \frac{M}{I};$$

b) Pour les fibres de l'intrados (même remarque):

$$R = \frac{N}{S} + \frac{M}{I}.$$

Section S_2 (fig. 556).

Echelle : $1 \text{ mm} = \frac{1}{1000} \text{ kg/mm}^2$, admise pour nos épures.



En effet, pour les valeurs de a et de A ; par exemple :

$$1^{\circ} \text{ Section} = 81\,236 \text{ mm}^2$$

65,2 mm de la ligne d'influence des

$$N = 65,2 \times 20 \text{ kg}$$

d'où

$$a = \frac{65,2}{81\,236} = \frac{65,2}{4\,061,6} \text{ kg/mm}^2$$

à porter à l'échelle $\frac{1}{1\,000}$: $a = 16,08 \text{ mm}$;

$$2^{\circ} \quad \frac{I}{V} = 32\,900 \text{ cm}^3$$

54 mm de la ligne d'influence des

$$M = 54 \times 100\,000 \text{ kgmm}$$

d'où

$$A = \frac{54 \times 100\,000}{32\,900\,000} \times \frac{1}{1\,000} = \frac{54}{0,329} \text{ mm}.$$

3. FLÈCHE DU PONT

Formule générale de la flèche d'un arc à trois rotules

La flèche z à la clef est due à la variation de la longueur des cordes des demi-arcs.

Notons x et y ces variations de longueur (supposées positives s'il s'agit d'allongement), ε et η les accroissements angulaires des angles α aux naissances (fig. 557).

On a

$$(a+x) \sin(\alpha+\varepsilon) = (a+y) \sin(\alpha+\eta) = f+z,$$

$$(a+x) \cos(\alpha+\varepsilon) + (a+y) \cos(\alpha+\eta) = l.$$

En considérant les quantités très petites x , y , ε , η et z comme des différentielles, on a

$$x \sin \alpha + \varepsilon \cdot a \cos \alpha = y \sin \alpha + \eta \cdot a \cos \alpha = z,$$

$$x \cos \alpha - \varepsilon \cdot a \sin \alpha + y \cos \alpha - \eta \cdot a \sin \alpha = 0.$$

D'où l'on tire

$$\varepsilon - \eta = \frac{y-x}{a} \operatorname{tg} \alpha$$

$$\varepsilon + \eta = \frac{y+x}{a} \operatorname{cotg} \alpha$$

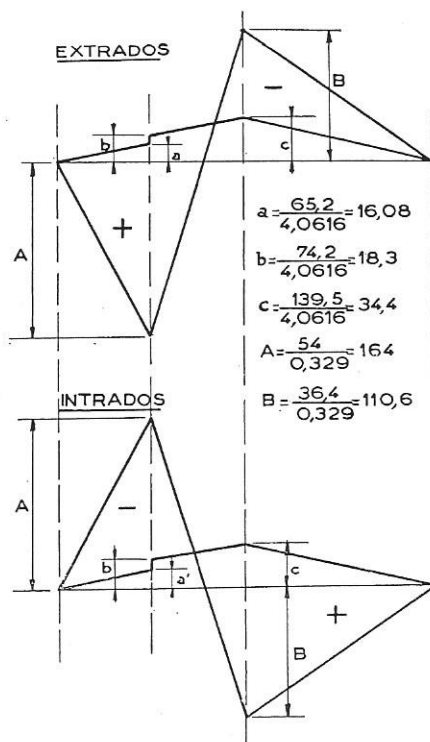


Fig. 556. Ligne d'influence des contraintes dans la section S_2 .

enfin

$$\varepsilon = \frac{(y-x) \operatorname{tg} \alpha + (y+x) \operatorname{cotg} \alpha}{2a}$$

et

$$z = \frac{1}{2} \left[2x \sin \alpha + (y-x) \sin \alpha + (y+x) \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha} \right]$$

$$z = \frac{x+y}{2 \sin \alpha}$$

On a, en outre,

$$x = - \int \frac{N}{ES} ds \cos \beta + \int \frac{M}{EI} ds y$$

Sous l'effet du poids mort

$$x = y \quad \text{et} \quad z = \frac{x}{\sin \alpha}.$$

Puisque $M = 0$

$$x = - \frac{1}{ES} \int N ds \cos \beta = \frac{-N(\text{moyen}) \cdot a}{ES}$$

La ligne d'influence de N permet de résoudre facilement le problème.

La flèche z trouvée est 31,3 mm pour la travée centrale, soit $\frac{1}{1846}$ de la portée de l'arc.

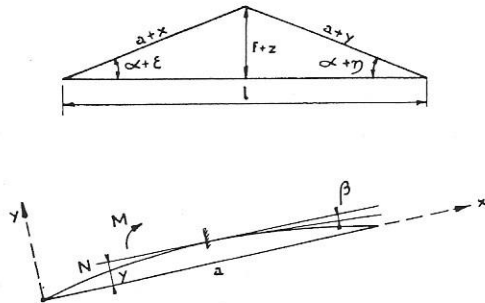


Fig. 557. Croquis se rapportant à la formule générale de la flèche d'un arc à trois rotules.

Sous l'effet des *charges mobiles*.

Considérons le moment négatif pour que les deux termes de x s'ajoutent en valeur absolue.

Comme le moment est nul à la naissance et à la clef, et qu'il varie le long de l'arc d'une façon sensiblement parabolique, on peut se contenter, dans un tel calcul, de déterminer la position des charges pour laquelle le moment dans la section S_2 la plus sollicitée est maximum.

En outre

$\int M \cdot y \cdot ds$ vaut sensiblement $(M \cdot y)$ moyen $\cdot a$.

Les lignes d'influence sont à nouveau d'une application simple.

La flèche z trouvée sous l'action des charges mobiles est de 35,2 mm. La flèche totale, compte non tenu des effets de variation de température, est de 66,5 mm, soit $\frac{1}{870}$ de la portée de l'arc.

Une variation de température de $\pm 25^\circ$ donne une flèche de ± 41 mm.

E. D.

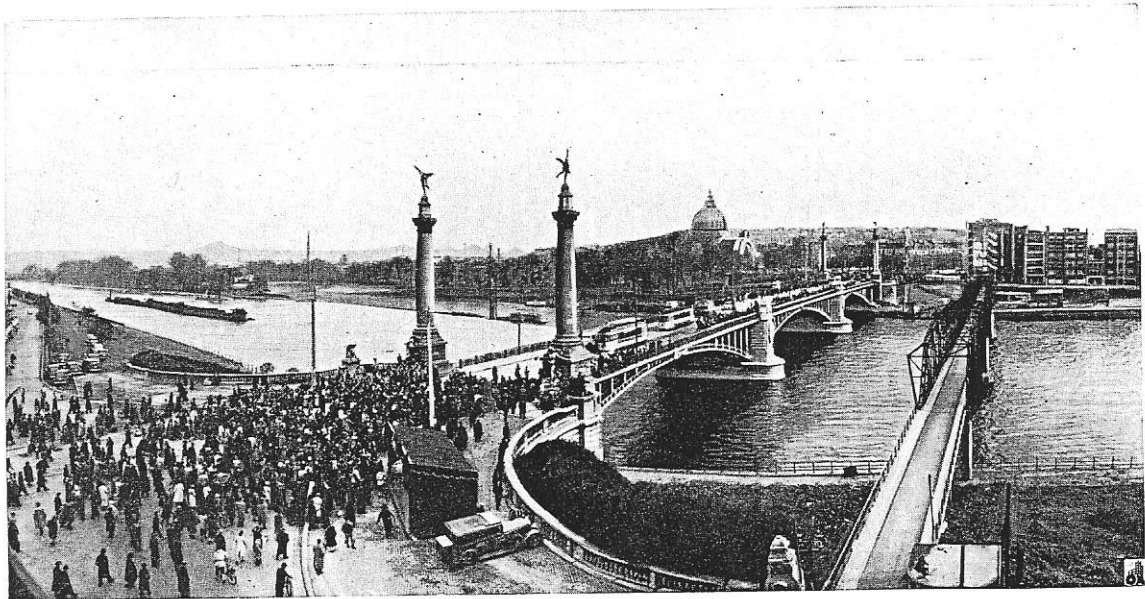


Fig. 558. Vue du pont de Fragnée à Liège, prise le jour de son inauguration par le Ministre des Travaux Publics de Belgique.

