

LE
VIADUC DU VIAUR

(LIGNE DE CARMAUX A RODÉZ)

NOTE

DE

M. R. CLODEPHEAUX
Ingénieur des Arts et Manufactures.

EXTRAIT DU 2^e FASCICULE DES
ANNALES DES TRAVAUX PUBLICS DE BELGIQUE
(Avril 1903.)



BRUXELLES
J. GOEMAERE, IMPRIMEUR DU ROI,
21, rue de la Limite.

1903

LE
VIADUC DU VIAUR

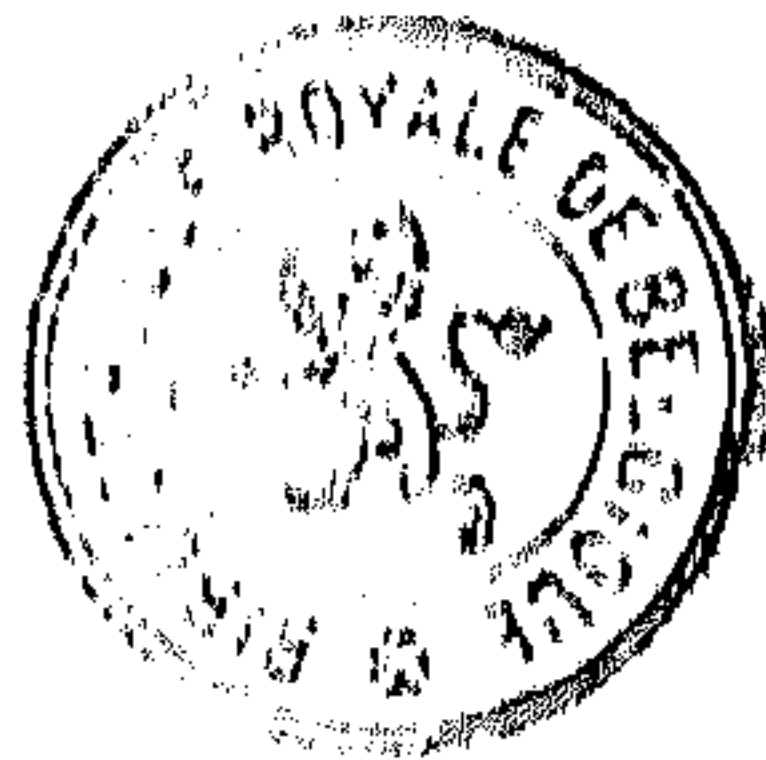
(LIGNE DE CARMAUX A RODEZ)

NOTE

DE

M. R. GODFERNAUX
Ingénieur des Arts et Manufactures.

EXTRAIT DU 2^e FASCICULE DES
ANNALES DES TRAVAUX PUBLICS DE BELGIQUE
(Avril 1903.)



BRUXELLES
J. GOEMAERE, IMPRIMEUR DU ROI,
21, rue de la Limite.

1903

VIADUC DU VIAUR

(LIGNE DE CARMAUX A RODEZ).

NOTE (1)

DE

M. R. GODFERNAUX

Ingenieur des Arts et Manufactures.

AVEC PLANCHE.

PRÉAMBULE.

L'exécution de la ligne de chemin de fer de Carmaux à Rodez, en France, a nécessité, pour la traversée du Viaur, l'établissement d'un ouvrage d'art de dimensions exceptionnelles, qui a été livré à l'exploitation le 18 décembre 1902.

Nous croyons que les lecteurs trouveront quelque intérêt dans les détails que nous donnons ci-après, qui compléteront ceux déjà publiés dans les *Annales des Ponts et Chaussées* de France (2).

Nous ne reviendrons pas sur les différentes phases qui ont précédé l'étude du projet définitif du viaduc du Viaur, car elles ont été résumées dans les *Annales des Travaux publics* de Belgique (3).

Nous ajouterons seulement que le projet envoyé au concours par la Société de Construction des Batignolles, et accepté par l'administration supérieure, différait complètement, comme principe, des autres projets présentés. Il était basé sur le principe des *ares équilibrés* (Planche, fig. 2 et 3), et les motifs qui avaient conduit la Société des Batignolles à admettre ce système peuvent se résumer par les considérations suivantes.

(1) Voir n^{os} de janvier et février 1903 de la *Revue générale des Chemins de fer et Tramways*.

(2) 4^e trimestre 1898, 1^{er} trimestre 1899, 3^e trimestre 1902.

(3) Voir tomes *Annales des Travaux publics* : 1899, p. 366; 1900, p. 120; 1902, p. 723.

Le prolongement des arcs dans les travées de rive, sous forme de console en encorbellement, a pour objet de diminuer la poussée de l'arc central, poussée qui, sans ce contre-poids, serait trop considérable, et permet ainsi de diminuer l'ouverture de cet arc central.

Les travées de raccordement rendent l'encorbellement indépendant des maçonneries des arrière-culées, en lui donnant la liberté de se mouvoir sous l'action des surcharges, de la pression du vent ou des variations de la température.

Les articulations de la clef et des naissances fixent le point de passage des efforts qui se développent dans la construction, rendent le clavage relativement facile et évitent le développement à la clef d'efforts anormaux d'un calcul assez délicat quand l'articulation n'existe pas; elles rendent les arcs insensibles aux variations de la température.

Le montage de l'arc en porte à faux peut se faire en toute sécurité, car il travaille, pendant le montage, ainsi qu'on peut le calculer à l'avance.

Le projet d'ensemble et ceux de détail ont été étudiés par M. E. Godfernaux, ingénieur, chef du service des Constructions métalliques à la Société des Batignolles, assisté de M. Bodin, ingénieur du même service.

DESCRIPTION DU VIADUC.

Le viaduc du Vaur a une longueur totale, entre les culées, de 410^m (Planche, fig. 2 et 3).

Il se compose d'une travée centrale en arc de 220^m d'ouverture avec flèche de 53^m.73. Cette travée centrale est articulée à la clef et chacun des demi-arcs qui la constituent est équilibré en arrière, par un demi-arc formant culasse, de 69^m.60 de portée.

L'extrémité arrière de cette culasse est rattachée aux culées en maçonnerie par une travée métallique à grandes mailles de 25^m.40 de portée, formant raccordement. L'emploi de trois articulations et le principe de l'indépendance de l'ouvrage avec les culées, ont permis de calculer l'ouvrage par les règles de la statique, sans recourir à des hypothèses, toujours hasardeuses quand il s'agit d'un pont de cette importance.

Les deux travées latérales ont des portées de 60^m.00.

plus grande travée métallique *en arc* construite à l'heure actuelle, (fig. 1).

La photographie ci-après donne une vue d'ensemble de ce bel ouvrage.

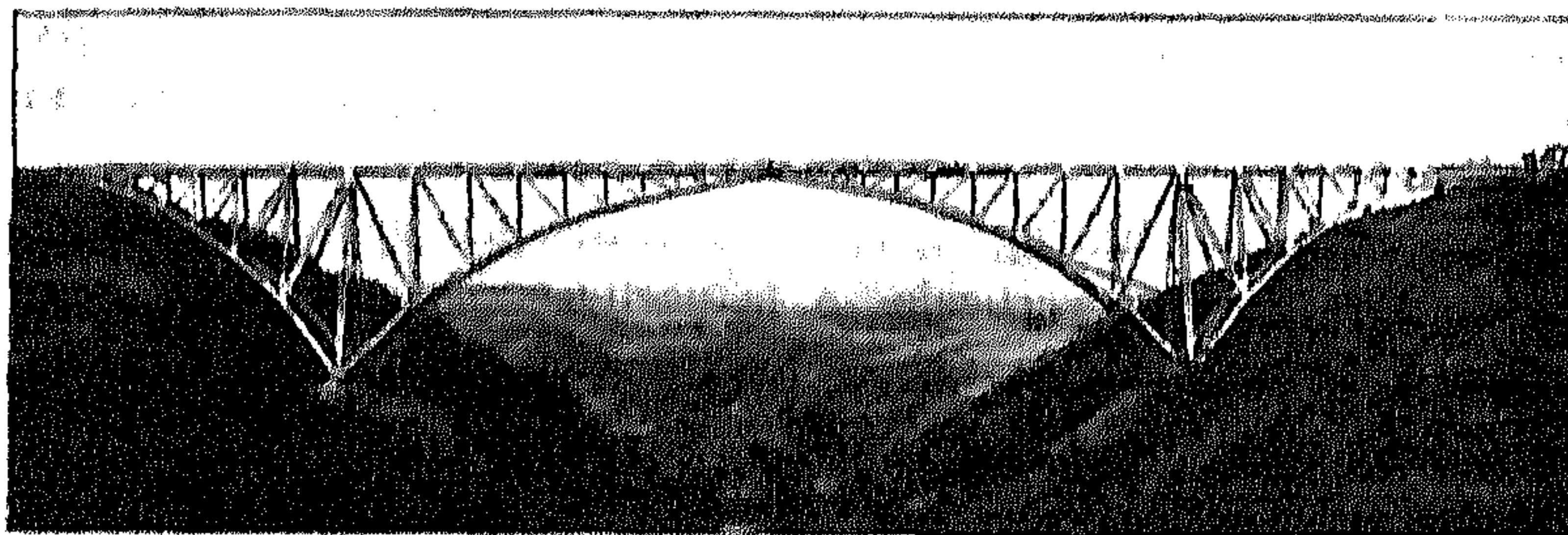


Fig. 1. — Vue d'ensemble du Viaduc du Viaur.

Rappelons que l'ouverture de la travée en arc du viaduc de Garabit est de 165^m, celle du viaduc de Mungstein, de 160^m et celle du pont du Niagara de 168^m.

Le viaduc du Viaur est construit pour une seule voie.

Dans son ensemble, l'arc et les culasses sont formés de deux fermes principales supportant la voie à leur partie supérieure et butant à leur partie inférieure, au moyen d'articulations, contre des piles-culées en maçonnerie fondées sur le rocher. Chacune de ces fermes principales est divisée en deux parties symétriques par l'articulation de clef.

Chaque demi-ferme est formée d'une semelle supérieure rectiligne et d'une semelle inférieure polygonale, reliées entre elles par des barres obliques et des montants formant tympan. Il n'existe aucune barre surabondante. De plus, tous les axes se réunissent, à chaque nœud, en un même point et ces axes correspondent aux fibres neutres des barres.

Les figures 3 et 6 donnent l'élévation d'un des panneaux de cette ferme.

Les semelles supérieures et inférieures sont à âme double en forme U, dont l'ouverture est dirigée, pour l'une, vers le bas, et, pour l'autre, vers le haut. L'espacement des âmes est constant et de 0^m.80; quant aux sections, elles sont variables, suivant la position et l'effort qu'elles ont à supporter. Pour les semelles supérieures, les âmes ont une hauteur qui va en croissant de l'articulation de clef ou de l'extrémité de la culasse vers le montant qui se trouve à l'aplomb de la pile culée.

Les barres obliques et les montants ont, suivant leur longueur et les efforts à supporter, des sections en forme I ou en forme de caisson, à parois en treillis.

Dans le but de résister au flambement, les barres obliques et les montants verticaux ont leurs faces longitudinales allant en s'élargissant des extrémités vers le milieu; en élévation, l'aspect ressemble à celui d'un fuseau.

En coupe transversale (fig. 5, 7, 8) les fermes principales sont inclinées de 25 % sur la verticale. A la partie supérieure, elles sont écartées de 5^m.89 d'axe en axe et, aux retombées des piles-culées, de 53^m.89.

Pour assurer la solidarité des fermes principales, les montants et un certain nombre des barres obliques sont reliés par un système de contreventement composé de croix de Saint André et d'entretoises, ainsi que par la pièce de pont correspondante. Le système triangulé, ainsi constitué, est indéformable.

Quant aux semelles inférieures des arcs, leur liaison est assurée par un système de contreventement à croix de Saint André qui, avec les entretoises reliant la partie inférieure des montants verticaux, forme un système triangulé très rigide, permettant de résister aux efforts du vent et de reporter cet effort sur les retombées des piles-culées (fig. 6).

Le tablier (fig. 4, 5) est formé de pièces de pont fixées aux montants verticaux des fermes principales. Ces pièces de pont sont simples ou doubles, suivant que les montants sont en forme I ou de caisson. Elles sont reliées, dans le sens longitudinal, par des longerons principaux et des longerons secondaires, comme il est indiqué sur la figure et c'est sur cet ensemble, formant le tablier, que repose le platelage, composé de fers zorrés transversaux rivés aux longerons principaux et secondaires et raidis, à leur partie inférieure, par trois cours de fers zorrés longitudinaux, placés au-dessous des premiers et rivés sur chacun d'eux.

Des tôles striées de 0^m.80 de largeur, placées de chaque côté de la voie, assurent la circulation des piétons.

La voie, à double champignon et à coussinets, est posée sur longrines reposant sur les zorrés transversaux au moyen de semelles continues. Les longrines sont fixées aux fers zorrés au moyen d'équerres en fer, rivées sur ceux-ci et munies de boulons et d'étriers boulonnés sur ces équerres.

De chaque côté du viaduc (fig. 4 et 5) et, sur toute sa longueur, est établi un garde-corps en acier de 1^m.80 de hauteur au-dessus du platelage et suffisant pour résister aux locomotives et aux wagons en cas

de déraillement. Ce garde-corps est composé de montants principaux, de montants secondaires et de plusieurs lisses.

L'articulation de clef est formée d'un cylindre en acier coulé et tourné de 0^m.95 de longueur et de 0^m.20 de diamètre, sur lequel roulent deux demi-coussinets également en acier coulé, fixés aux extrémités des arcs, dont le diamètre de 0^m.205 est un peu plus grand que celui de l'articulation, pour faciliter le mouvement de rotation.

A chacune des extrémités du cylindre d'articulation sont fixées, au moyen d'aillots, des tiges d'ancrage, rivées, à leur autre extrémité, sur les extrémités de l'arc. Ces ancrages ont pour but d'assurer la sécurité de l'ouvrage, en cas de diminution de poussée de l'arc à la clef, quoique cette crainte ne soit guère admissible, ainsi que l'indiquent les chiffres suivants, qui donnent la poussée à clef dans les différentes circonstances de surcharge :

Dans le cas le plus défavorable, avec surcharge, y compris le vent, de 170 kilogrammes par mètre carré.	Tonnes 421.2
Dans le cas moyen. Charge permanente.	227.6
----- le plus favorable, sans vent	153.7

La poussée minimum de 153^k.7 par ferme, semble bien suffisante pour assurer la stabilité de l'ouvrage. Toutefois, l'ancrage apporte un supplément de résistance de 155^k.4, ce qui donne une sécurité par ferme de 153.7 + 155.4 = 309.1.

Le travail maximum de la rotule d'articulation est de 353 kilogrammes par centimètre carré de section diamétrale.

Les appuis sur les culées sont constitués par :

1^o Une plaque inférieure en fonte de deux épaisseurs, à rainures recevant des coins de réglage qui permettent de faire varier légèrement la position des articulations, suivant les nécessités de la mise en place du pont;

2^o Deux plaques en acier coulé armées de nervures, l'une inférieure reposant sur les plaques en fonte, l'autre supérieure supportant la charpente métallique. Ces deux plaques se touchent par une partie cylindrique formant l'articulation, creuse pour la plaque inférieure et saillante pour la plaque supérieure, avec un rayon de 0^m.30.

La face supérieure de la maçonnerie qui sert d'appui aux retombées est disposée en pente, suivant la normale à la direction moyenne des réactions sur la culée. Une partie est horizontale, pour éviter le glissement du pont sur la maçonnerie, pendant le montage. La résultante maximum des pressions agissant normalement à la surface de roule-

ment de chaque articulation étant, en chiffres ronds, de 1,800 tonnes et la section de l'articulation étant de $0^m.45 \times 1^m.56$, il en résulte que la pression, par centimètre carré, est de $384^k.6$.

Sous l'influence d'une pression du vent de 270 kilogrammes par mètre carré, agissant sur l'ouvrage, le coefficient de stabilité transversale est de 1.23 et, sous l'influence d'une pression du vent de 170 kilogrammes, il est de 1.60. Ce coefficient de stabilité est donc largement suffisant et les ancrages des appuis avec les maçonneries qu'on a cru devoir ajouter à chacune des piles et qui sont indiqués sur la figure, ne devront jamais fonctionner. Ce n'est qu'un supplément de sécurité qui porte le coefficient de stabilité à 1.71 et 2.5, suivant l'intensité du vent par mètre carré.

La travée de raccordement est formée de deux poutres en treillis en N à larges mailles, avec contre-diagonales dans les panneaux du milieu. La hauteur de la poutre est de $3^m.10$ et la longueur d'axe en axe des appuis de $26^m.40$. L'espacement d'axe en axe des poutres est de $3^m.10$. Elle ne présente rien de particulier.

Les figures 4 et 5 montrent la disposition de la passerelle destinée à permettre l'accès des différentes parties de l'ouvrage pour la visite et l'entretien.

Cette passerelle, installée sur toute la longueur de l'ouvrage, y compris les travées de raccordement, et dans son axe longitudinal, a une largeur de $1^m.14$. Le plancher de cette passerelle est formé de tôles striées de 6 millimètres d'épaisseur, et sur ce plancher court une petite voie de $0^m.40$ de largeur, pour la circulation des wagonnets de l'entretien. Des garde-corps de $1^m.00$ de hauteur complètent cet ensemble.

De place en place, au droit de certains montants, des chaînes transversales métalliques réunissent ceux-ci avec la passerelle et permettent l'accès de ces montants qui, de leur côté, peuvent être visités au moyen de petites échelles placées le long de ces montants.

Des échelles semblables sont installées le long des barres obliques et des membrures inférieures de l'arc.

Le métal employé pour la charpente métallique du pont est l'acier doux, sauf pour les travées de raccordement, les rivets et quelques autres pièces accessoires où le fer a été préféré.

Les calculs de résistance et les coefficients de travail du métal ont été établis en se basant sur les conditions édictées par le règlement du 29 août 1891.

Le poids permanent a été déterminé par plusieurs calculs succes-

sifs et appliqué, pour partie, aux nœuds supérieurs et, partie, aux nœuds inférieurs.

Le train qui doit produire la surcharge et qui est celui prescrit par le règlement, a été disposé de la manière la plus défavorable pour chaque barre des fermes, et les efforts ont été déterminés par la méthode de Ritter, après avoir calculé les réactions à la clef et aux naissances pour chaque cas de surcharge.

Après avoir déterminé les efforts dans les différentes parties de l'ouvrage, on a fixé les sections en divisant l'effort par le travail permis.

Les limites maximum du travail permis, pour les pièces en acier des fermes, sont de 11^k.50 par millimètre carré, à la section nette, avec réductions importantes pour les pièces comprimées ou les pièces alternativement tirées ou comprimées.

Le travail des pièces de pont et longerons est limité à des efforts moindres, soit 7^k.50 par millimètre carré.

La circulaire de 1891 donne encore, à titre d'indication, les formules suivantes comme limite du travail.

Le signe + s'applique aux efforts toujours dirigés dans le même sens et le signe — aux efforts alternativement positifs et négatifs.

Si A et B (A < B en valeur absolue) sont les valeurs extrêmes qu'une barre peut avoir à supporter, le coefficient de travail sera :

$$R = 8 \text{ kilogrammes } \pm 4 \frac{A}{B}$$

si le vent ne fait pas partie des charges agissantes, et :

$$R = 9 \text{ kilogrammes } \pm 4 \frac{A}{B}$$

si le vent fait partie de ces charges.

Pour les barres comprimées, on a, en vue du flambage, diminué le coefficient de travail dans les sections milieu de ces pièces.

Si les efforts extrêmes sont de même sens et, par suite, tous de compression, le coefficient réduit R' est donné par la formule :

$$R' = \frac{R}{1 + 0.00008 \frac{\omega l^2}{I}}$$

ou R est le coefficient de travail applicable aux extrémités de la barre, ω la section et I le moment d'inertie.

Si les efforts extrêmes sont de sens contraire, on calcule séparément

les sections nécessaires pour résister aux efforts de tension et de compression, en adoptant pour la tension :

$$R = 8 \text{ ou } 9 + 4 \frac{\Lambda}{B}$$

et pour la compression :

$$R' = \frac{8 \text{ ou } 9}{1 + 0.00008 \frac{\omega l^2}{I}}$$

On a adopté le coefficient minimum donné par ces deux formules.

Les flèches que pourrait prendre le pont sous l'action des surcharges et du vent, ont été calculées avec soin par la formule du travail virtuel d'un système matériel en équilibre. Les flèches probables, soit verticales, soit horizontales, ont paru devoir rester dans des limites tout à fait satisfaisantes.

Voici les principaux résultats obtenus par le calcul :

1° Déplacements dus au poids permanent :	
A la clef (abaisssement)	50 m/m.
A l'extrémité de l'encorbellement (abaisssement)	39 —
2° Déplacements dus à la surcharge :	
a) La travée centrale couverte sur toute sa longueur.	
Abaisssement à la clef.	30 —
b) La travée centrale couverte sur la moitié de sa longueur, les deux locomotives étant à la clef. (Abaisssement de la clef)	
	37 —
c) Deux locomotives à la clef, nez à nez. (Abaisssement à la clef)	
	65 —
d) La surcharge couvre la travée de rive. (Abaisssement de l'extrémité de l'encorbellement)	
	88 —
3° Déplacements dus au vent :	
a) A la clef, horizontalement.	133 —
b) A l'extrémité de l'encorbellement, horizontalement.	47 —
4° Déplacements dus à la température.	
Pour une variation de température de 30° :	
Relèvement ou abaisssement à la clef	90 —
Relèvement ou abaisssement à l'extrémité de l'encorbellement	29 —

Le poids total du métal ayant servi à la construction du viaduc est d'environ 3,800 tonnes, ce qui, pour un mètre courant de pont, représente environ 9,300 kilogrammes.

Les dépenses totales, y compris les maçonneries, sont estimées à 2,700,000 francs.

Montage. — Les travées de rive, encorbellement et pont de raccordement, ont été montées au moyen d'un échafaudage en bois représenté

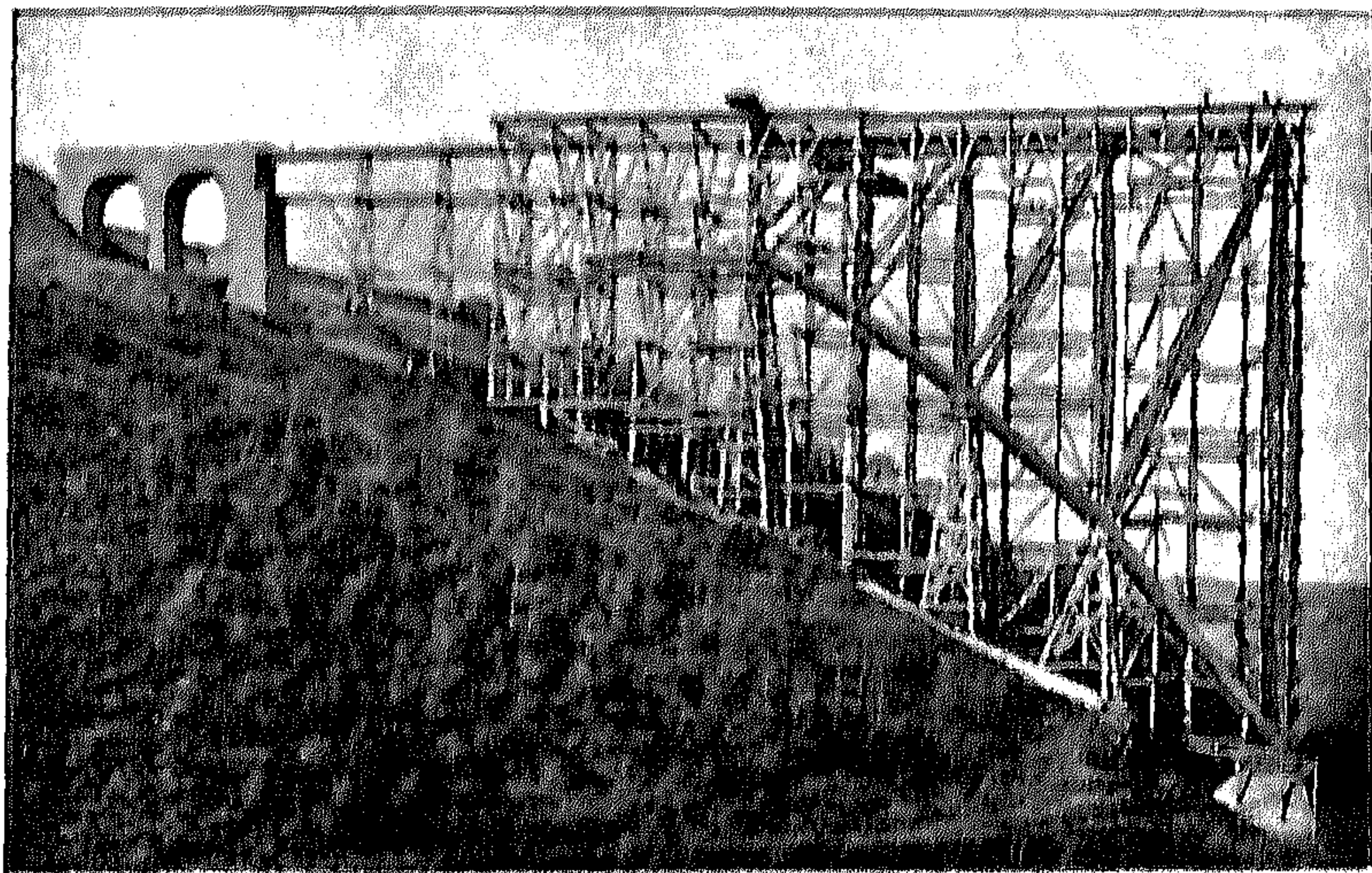


Fig. 9. — Montage d'une travée de rive.

par la figure 9. Cet échafaudage, qui enveloppe la partie métallique, donne les points d'appui ou les amarrages nécessaires pour le levage ou la mise en place des pièces. Une grue roulante, placée à la partie supérieure, aide au travail.

L'échafaudage se compose, en réalité, de cinq pylônes isolés, reliés seulement à leur partie supérieure.

Comme, pendant un certain temps du montage, malgré l'équilibre produit par l'avancement de la travée centrale, la résultante des pressions doit rester entre la pile-culée et l'arrière-culée et que la travée de rive a tendance à s'incliner vers le sol, on a installé, indépendamment des pylônes, de fortes palées d'appui destinées à supporter l'encorbellement pendant cette période du montage.

Quant à la travée centrale, elle a été montée en porte à faux (fig. 10) et, pour maintenir l'équilibre, lorsque la résultante des pressions passe entre la pile-culée et la clef, on a relié chaque extrémité de

l'encorbellement à des massifs maçonnés dans ce but, au moyen de tirants amarrés à la partie supérieure du pont sur les axes des

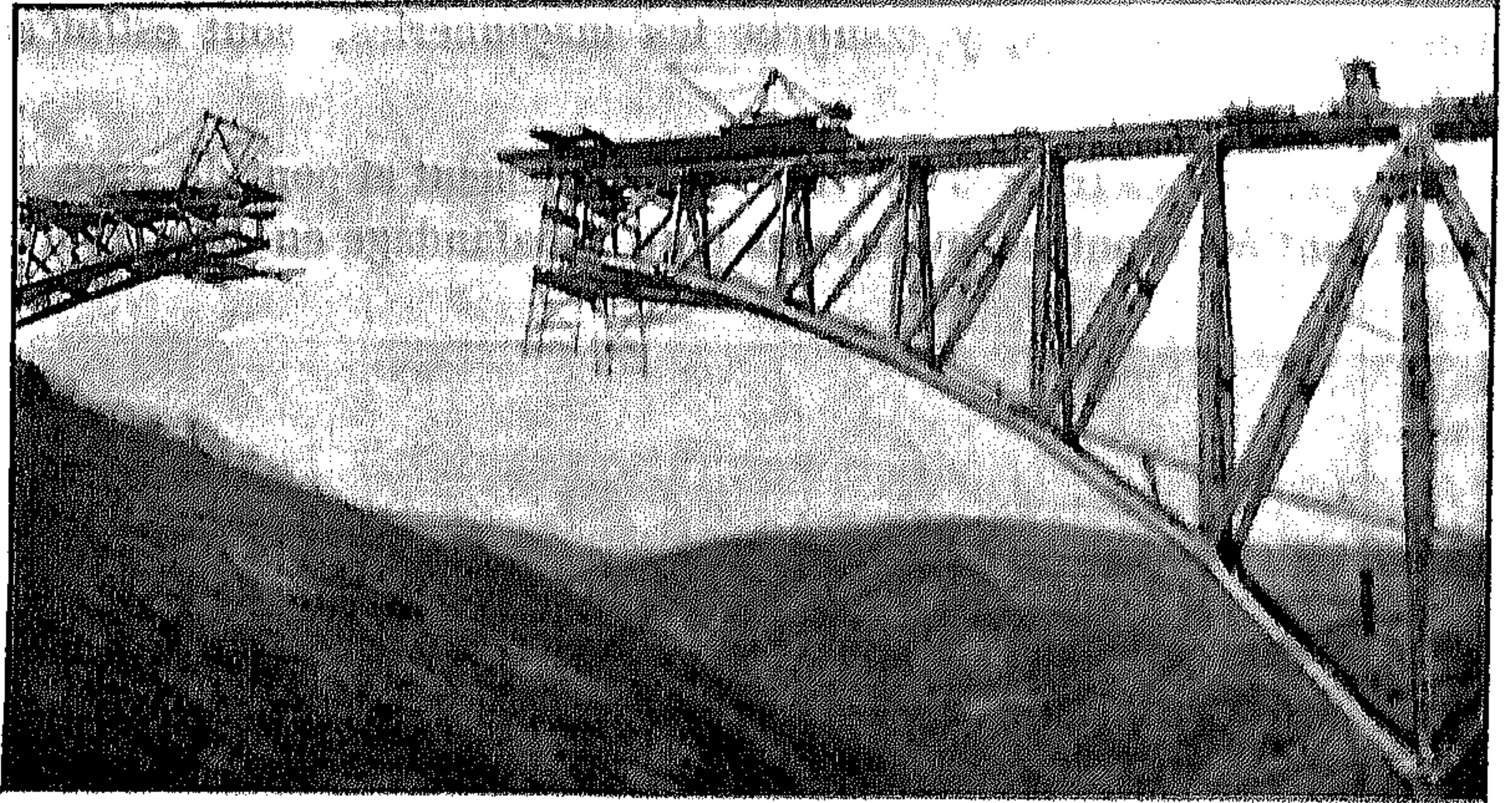


Fig. 10. — Montage du grand arc central.

fermes. Ces massifs se trouvent au niveau du sol à l'aplomb arrière de l'encorbellement.

Un filetage avec écrous, ménagé à l'extrémité de ces tirants d'amarrage, permettait de faire varier leur longueur, de manière à élever ou abaisser les extrémités des deux fermes, suivant les besoins.

Direction des travaux. — Les travaux de construction de la ligne de Carmaux à Rodez qui ont été exécutés par l'État, ont été dirigés par M. de Volontat, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, et par MM. Théry et Jacquerez, comme ingénieurs ordinaires.

Épreuves. — Le viaduc du Vaur a été soumis, à la fin de décembre 1902, aux différentes épreuves réglementaires.

La charge d'épreuve se composait de deux des plus lourdes locomotives de la Compagnie des chemins de fer du Midi, pesant 73 tonnes, de leur tender pesant 26^t,4 et d'un nombre de wagons variable suivant la longueur de la travée à charger, et pesant chacun 22 tonnes.

Ce train d'épreuve avait un poids notablement supérieur à celui prévu dans le règlement de 1891. Pour les locomotives et le tender, cette augmentation de poids était d'environ 13 % et pour les wagons de 11 %.

Nous donnons ci-contre les résultats obtenus pendant les épreuves par poids mort, et ceux résultant du calcul, augmentés proportionnelle-

Travée centrale couverte sur la moitié de sa longueur, les deux locomotives étant à la clef. Abaissement à la clef	42 m/m	30 m/m	71.5 %
Travée centrale couverte sur toute sa longueur. Abaissement à la clef	33 m/m	25.7 m/m	78 %
Deux locomotives à la clef nez à nez. Abaissement à la clef	73 m/m	41.6 m/m	57 %
Surcharge couvrant la travée de rive. Abaissement de l'extrémité de l'encorbellement	100 m/m	59 m/m	59 %

Il résulte de cette comparaison que les résultats des épreuves ont été inférieurs aux indications du calcul, dans un rapport variant entre 57 et 78 %. Cette différence trouve son explication dans ce fait, qu'en réalité les différentes pièces constitutives de l'ouvrage sont solidaires l'une de l'autre, tandis que, dans le calcul, on admet l'articulation de ces pièces aux différents nœuds.

Paris, février 1903.

Viaur

Fig. 3 - Plan (1/1500)

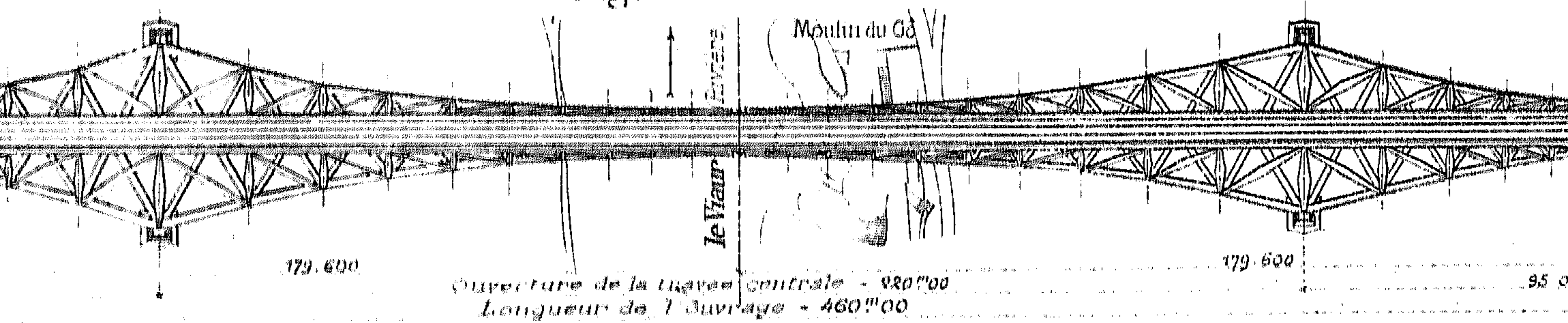


Fig. 5. - Coupe

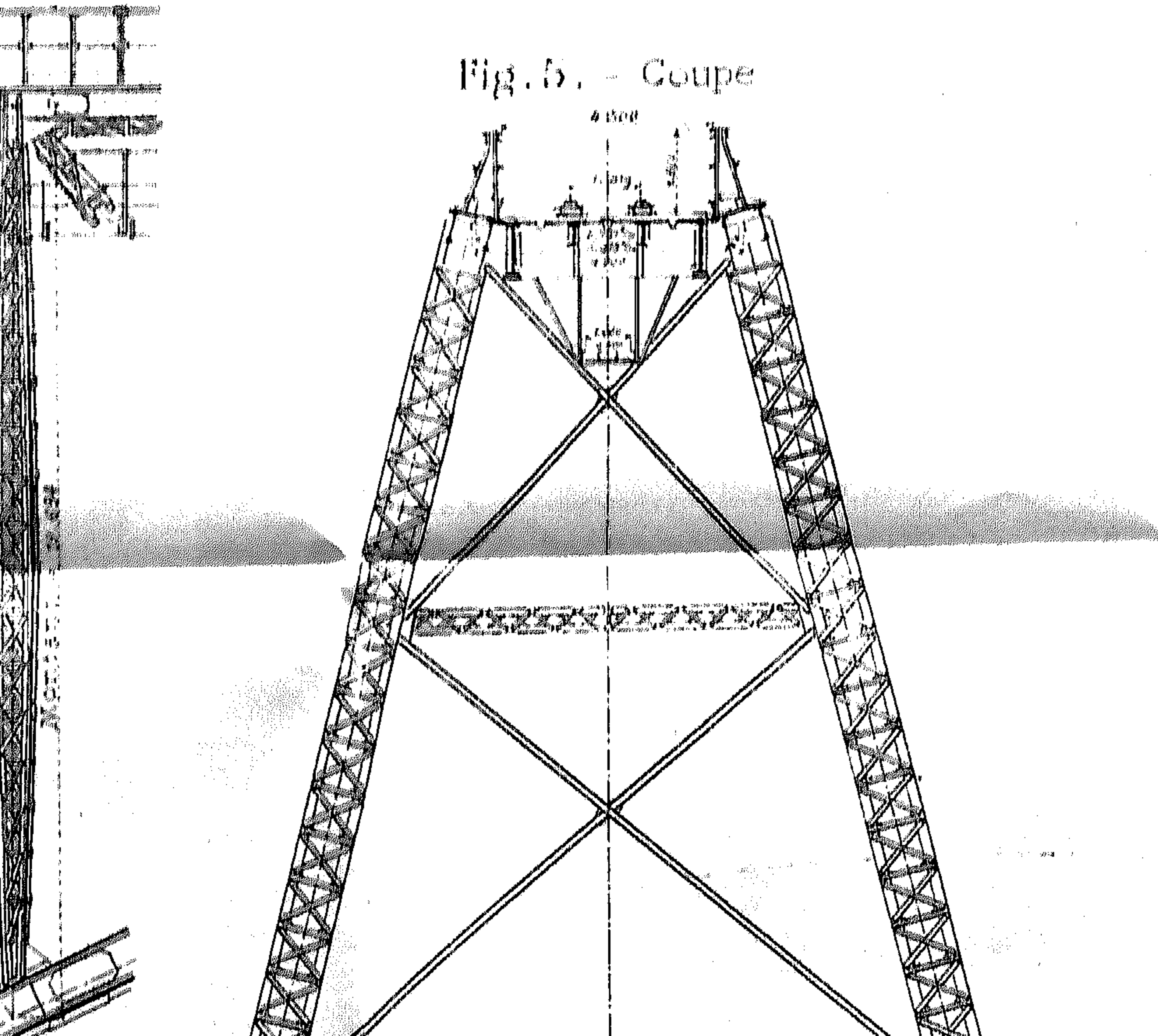


Fig. 6. - Plan

