

RÉPARATION ET RENFORCEMENT DU PONT TOURNANT DE BREST,

par M. LECOMTE,

Ingénieur des Ponts et Chaussées.

I. HISTORIQUE.

La ville de Brest est bâtie de part et d'autre de l'embouchure de la rivière La Penfeld, et les fortifications de Vauban enserrent, sur la rive gauche, Brest proprement dit et, sur la rive droite, le quartier populeux de Recouvrance. Le port militaire de Brest, et autrefois le port de commerce s'étendaient sur les deux rives de la Penfeld, et les communications entre les deux parties de l'agglomération n'étaient assurées que par un bac qui traversait la Penfeld en aval du port militaire.

Il est normal que, dans ces conditions, le projet présenté en 1853, par M. OUDRY, Ingénieur des Ponts et Chaussées en congé, au nom de la Compagnie du Creusot, reçut immédiatement l'approbation de la Ville, laquelle s'engagea à concourir à la dépense pour une somme de 700.000 francs. L'Administration des Travaux publics consentit, par une dépêche du 10 octobre 1853, à incorporer le nouvel ouvrage et son prolongement dans Recouvrance dans la voirie impériale.

Finalement, la construction du pont fut décidée par décret du 26 avril 1856, et les travaux confiés à la Compagnie du Creusot (Établissements SCHNEIDER).

L'ouvrage devait être établi au-dessus du port de Commerce, à 30 mètres environ en aval des portes de l'Arsenal.

Suivant le cahier des charges, la Compagnie concessionnaire s'engageait à exécuter à ses risques et périls dans le

délai de trois ans, moyennant le prix à forfait de 2 millions 800.000 francs tous les travaux de construction du pont et de ses abords. Cette somme se décomposait comme suit :

Acquisition de terrains et indemnités.	700.000 francs.
Maçonnerie et chaussées.....	700.000 —
Pont proprement dit.....	1.400.000 —

En fait, la dépense totale s'est élevée à 3.066.000 francs.

Les travaux furent commencés en juillet 1856. Pour diverses raisons, le délai de trois ans ne fut pas observé, et l'ouvrage ne fut terminé qu'en 1861. Les essais prévus au cahier des charges furent effectués du 1^{er} au 10 juin 1861. Ils ont fait l'objet d'un article de M. AUMAITRE, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées publié dans les *Annales des Ponts et Chaussées* de 1867.

Nous reproduisons ci-après les prescriptions du cahier des charges de la concession du pont, relative aux épreuves :

« Lorsque les travaux seront achevés, et avant de livrer le passage au public, le pont tournant sera soumis aux épreuves suivantes de poids morts à raison de 200 kilogrammes par mètre superficiel de tablier compris entre les deux garde-corps du pont, savoir :

« 1° On chargera d'abord, sur toute la longueur du tablier du pont tournant, une moitié seulement de chacune de ses deux volées, l'une depuis l'axe jusqu'au parapet d'amont, l'autre depuis l'axe jusqu'au parapet d'aval;

« 2° On complètera le chargement de la totalité de la surface des tabliers des deux volées;

« 3° On déchargera la totalité de la surface du tablier d'une des volées, en laissant l'autre chargée;

« 4° On déchargera la culasse de cette dernière volée, qu'on laissera chargée sur la partie comprise entre le centre de sa pile de support et le milieu du pont.

« Dans chacune de ces épreuves, le pont restera chargé pendant vingt heures consécutives.

« Il sera ensuite soumis à des épreuves opérées en y faisant circuler des chariots à deux roues pesant chacun quatre tonnes, véhicules compris, sur des taquets installés

« de façon à produire des chutes de 5 centimètres de hauteur.

« Enfin, on vérifiera si la manœuvre du pont satisfait, tant pour la durée que pour le nombre des hommes à y employer, aux conditions prescrites par l'article précédent. »

Cet article porte :

« Article 8. — Chaque moitié du pont tournant sera munie de deux mécanismes de rotation, mais un seul de ces mécanismes devra suffire à la manœuvre de la volée à laquelle il sera adapté. La manœuvre du pont ne devra pas exiger plus de quatre hommes, et elle devra s'effectuer en moins de quinze minutes, soit pour la fermeture, soit pour l'ouverture, y compris tout calage et décalage. »

Ces épreuves furent tout à fait satisfaisantes, et le pont fut livré immédiatement à la circulation. A l'expiration du délai de garantie, qui était de cinq ans, la réception définitive fut prononcée sans réserves.

La vie du pont est ensuite sans histoire, jusqu'à ces temps derniers, à part un accident survenu d'ailleurs peu après sa construction : le pont ayant été ouvert pendant une forte tempête, les hommes préposés à la manœuvre ne purent résister à l'action du vent, et la volée Recouvrance vint buter contre des cheminées et des toits qui n'avaient pas encore été rescindés à la hauteur réglementaire; il en résulta un gauchissement de cette volée consistant en une légère torsion autour d'un axe parallèle à la chaussée.

Par la suite, en dehors de quelques petits incidents survenus au mécanisme de rotation et aux vérins de calage, nous ne relevons rien de particulier.

II. DESCRIPTION DE L'OUVRAGE.

Le pont de Brest est un pont tournant à deux volées, entièrement en fer et en tôle, qui reposent à l'aplomb de leur centre de gravité sur deux piles en maçonnerie (fig. 1).

Le dessus du tablier, au droit des piles est à 20 mètres environ au-dessus de la tablette des quais de la Penfeld, et le

tirant d'air à la jonction des deux volées est de 19 m. 40 environ au-dessus de la cote des hautes mers ordinaires.

Chaque volée comprend une grande volée d'une longueur de 58 m. 325, et une petite volée d'une longueur de 28 m. 60, qui fait contrepoids à la grande volée. L'équilibre est assuré par un contrepoids constitué par un massif de maçonnerie et un ensemble de gueuses de fonte, placé dans une chambre à l'extrémité de la petite volée.

La largeur du tablier entre les garde-corps est de 7 mètres, comprenant une chaussée de 5 mètres et deux trottoirs de 1 mètre. Une voie de tramway emprunte, depuis 1897, le côté amont de la chaussée.

Chacune des volées est constituée par des poutres maîtresses, à treillis en Croix de Saint-André, et montants verticaux. Ces poutres sont espacées de 6 m. 20 d'axe en axe et réunies par un contreventement horizontal et vertical.

La volée repose sur la pile par l'intermédiaire d'une couronne de galets coniques, en fonte, dont les génératrices supérieures sont horizontales. La conicité des rouleaux empêche les tendances au décentrement qui pourraient se produire pendant les manœuvres de l'ouvrage.

La couronne de galets roule, d'une part, sur un plateau supérieur solidaire des fermes principales et, d'autre part, sur un chemin de roulement scellé dans la maçonnerie des piles.

Les galets, au nombre de 50 par volée sont placés sur une circonférence moyenne de 9 mètres de diamètre. La longueur de la génératrice de contact est de 0 m. 60, et le diamètre moyen des rouleaux de 0 m. 55. La couronne portant les axes des galets est composée de dix éléments de fonte, réunis par autant de bras à un moyeu central qui tourne autour de l'axe de rotation.

Le chemin de roulement inférieur est composé d'une couronne de dix éléments de fonte, réunis par autant de bras à un moyeu central qui reçoit l'axe de rotation solidaire de la volée.

Le mécanisme de rotation comprend une crémaillère circulaire rapportée sur la surface latérale extérieure du che-

min de roulement inférieur et qui sert de point d'appui aux dents de deux pignons placés latéralement. Ces pignons sont solidaires du chemin de roulement supérieur et donc des volées qu'ils entraînent dans le mouvement de rotation quand on manœuvre les cabestans de commande. Ceux-ci sont manœuvrés à bras de dessus le tablier et le mouvement transmis à la crémaillère par l'intermédiaire d'arbres et d'engrenages.

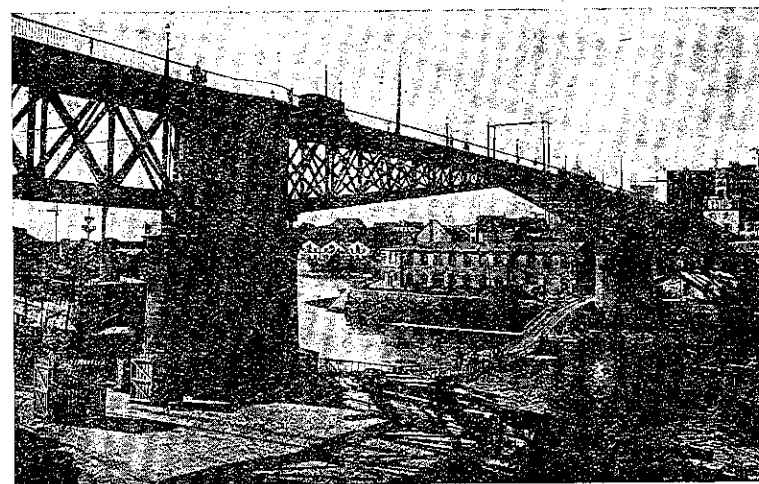


Fig. 1. — Le pont tournant de Brest.

En position de fermeture les deux volées sont rendues solidaires à l'aide de deux verrous horizontaux qui permettent le libre jeu de la dilatation. En outre, deux mâchoires fixées sur la face extrême de chacune des culasses viennent saisir deux crampons en fer scellés dans la culée.

Enfin, deux vérins à vis placés sur chacune des piles du côté opposé au contrepoids contribuent avec la couronne de galets au calage de l'ouvrage. Initialement, il était prévu la mise en place, dans chaque volée, de quatre presses hydrauliques destinées à permettre de soulever l'ouvrage et le maintenir dans cette position pendant tout le temps nécessaire aux réparations des mécanismes. Ces appareils n'ont pas été installés.

Les piles sont de forme circulaire, leur diamètre à la partie supérieure est de 10 m. 25, et les parements présentent un fruit de 0,04. Elles sont évidées intérieurement suivant un cylindre de 6 m. 15 de diamètre.

Elles ont été fondées sur le rocher à l'air libre, à l'aide d'un batardeau. Les fondations de la pile (côté Recouvrance) ont été particulièrement difficiles, eu égard aux moyens dont on disposait à l'époque, car il fallut descendre à 6 mètres sous la cote des plus basses mers.

Les culées présentent des voûtes en plein cintre de 5 m. 85 d'ouverture, donnant passage, sur la rive gauche, au boulevard de la Marine.

Les parements des piles sont en maçonnerie de pierres de taille de granit de Laber et le reste en moellons schisteux. Toutes les maçonneries ont été exécutées au mortier de chaux hydraulique, à l'exception des fondations des piles qui sont faites au mortier de ciment de Vassy. Le cahier des charges de construction imposait à ce sujet l'emploi de « mortier indécomposable à l'eau de mer ».

III. NÉCESSITÉ D'UN RENFORCEMENT.

L'ouvrage avait été calculé en tablant sur une surcharge de 200 kilogrammes par mètre carré et en considérant les sections brutes des pièces. Dans ces conditions, le taux de travail ne dépassait pas 6 kg./mm². Les calculs repris en 1913 montrèrent que l'on pouvait admettre le passage d'essieux de 8 tonnes et de surcharge de 400 kilogrammes par mètre carré sans dépasser un taux de travail de 10 kg./mm² sans tenir compte, évidemment, des effets dynamiques.

Pendant la guerre de 1914-1918, le pont eut à supporter des surcharges anormales; aussi un arrêté préfectoral de 1918 fixa à 8 tonnes le poids maximum des véhicules autorisés à passer sur l'ouvrage et à 5 kilomètres la vitesse maximum de passage.

Les inconvénients qui résultaient de cette limite de charge devinrent de plus en plus sensibles au fur et à mesure du développement de la circulation par camions, d'autant qu'il

faut remonter à plus de 5 kilomètres en amont pour trouver un ouvrage de franchissement de la Penfeld.

Par ailleurs, l'ouvrage se trouvait affaibli par quelques corrosions, ainsi que la visite détaillée de l'ouvrage à laquelle il fut procédé en 1929 le fit reconnaître.

Sur les poutres principales, les corrosions intéressaient spécialement, d'une part, les sections de croisement des diagonales et, d'autre part, les couvre-joints des montants verticaux et, dans une certaine mesure, les semelles des membrures.

Les croisements des diagonales avaient été à l'origine enfermés dans des carters en fonte, lesquels, non étanches, n'avaient pas empêché la corrosion de se développer.

Les couvre-joints des montants verticaux étaient assemblés par des rivets à tête fraisée dont le serrage était insuffisant. Le foisonnement de la rouille entre le couvre-joint et la tôle avait provoqué le décollement du couvre-joint et la rupture de quelques rivets. Enfin, en certains endroits, les paquets de tôle constituant les semelles des membrures avaient gonflé entre les rivets d'assemblage. L'écartement excessif de ces rivets avait permis à la rouille de se former entre les différentes tôles et par suite du foisonnement de la rouille, le phénomène ne pouvait que s'accroître.

Les corrosions étaient beaucoup plus importantes sur les pièces de pont et les entretoises, notamment sur les semelles supérieures de ces pièces en raison de l'humidité que le platelage en bois et corde y entretient. D'autre part, on relevait plusieurs fissures sur les ailes des cornières constituant les semelles supérieures des entretoises. Ces fissures devaient être attribuées au mauvais état de la voie des tramways et à une fixation défectueuse des rails sur l'ouvrage.

Il était donc nécessaire d'y effectuer des travaux de réparations et accessoirement d'établir une passerelle pour faciliter la visite de l'ouvrage.

Saisie du procès-verbal de visite, l'Administration des Travaux Publics estima qu'il convenait de profiter des réparations à effectuer pour renforcer la charpente métallique de façon à permettre le passage des surcharges prévues par le

règlement ministériel du 10 mai 1927. Le Ministre nous invitait, en même temps, à déterminer expérimentalement la limite élastique du métal employé dans la construction, sur des éprouvettes à prélever sur l'ouvrage, le travail limite des pièces conservées, réparées ou renforcées devant être au plus égal aux deux tiers de cette limite élastique.

Le concours ouvert sur ces bases ne reçut aucune suite, en raison de ce que l'offre la mieux étudiée comportait des consolidations excessives et des procédés d'exécution inadmissibles, exigeant des rivetages et des dérivetages très importants, aussi, par décision du 26 mars 1932, le Ministère des Travaux Publics préconisait l'emploi de la soudure pour les réparations et le renforcement de l'ouvrage. Cette décision fut prise après une étude des caractéristiques du métal dont est constitué l'ouvrage.

IV. CARACTÉRISTIQUES DU MÉTAL DONT EST CONSTITUÉ LE PONT DE BREST.

Le cahier des charges de construction ne contenait aucune prescription spéciale au sujet du métal. Il était dit simplement, à l'article 4 : « La Compagnie soumissionnaire s'engage « à n'employer dans tous ses travaux que des matériaux de « bonne qualité ». Dans le devis descriptif dressé par les auteurs du projet il était dit : « Toutes les pièces de fer ou « de fonte employées seront faites au coke, leur qualité, eu « égard à leur destination, ne devra rien laisser à désirer ».

Nous avons retrouvé également dans nos archives un procès-verbal d'essais effectués au Creusot les 12 et 13 février 1858 en présence de l'Ingénieur en chef du Finistère. Il y est dit :

« Les fers pouvant nous intéresser étaient les tôles destinées à former les fermes du pont. Parmi celles récemment travaillées, nous avons choisi deux échantillons, l'un de 0,01 d'épaisseur, l'autre de 0,015 environ. La première pièce éprouvée présentait une section de 2 cm. 5 sur 1 centimètre d'épaisseur, la résistance à la rupture a été de 40 kilogrammes par millimètre carré. Mesurée dans sa situation

« nouvelle, après avoir rapproché les parties, les 10 centimètres étaient devenus 10 cm. 9, soit un allongement de 1/10^e environ. Le dernier échantillon avait 2 cm. 6 de largeur et 1 cm. 47 d'épaisseur. La rupture s'est produite à 36 kilogrammes par millimètre carré. L'allongement mesuré après l'opération était de 12 millimètres pour les 10 centimètres de longueur. »

Nous avons fait procéder également à des essais de résistance à la traction de différentes éprouvettes prélevées sur l'ouvrage :

- sur un fer plat reliant le nœud de deux barres du contreventement transversal à une entretoise supérieure;
- sur un gousset de la tourelle pivotante, rive gauche;
- dans l'aile et les cornières d'une pièce de pont.

Les éprouvettes furent essayées sur une machine Thomasset.

Pour les deux premiers prélèvements on a trouvé une résistance élastique comprise entre 18 kg. 700/mm² et 22 kg. 900/mm², pour une résistance à la rupture de 28 kg. 5/mm² à 33 kg./mm². L'allongement à la rupture, pris sur la longueur normalement admise de $L = \sqrt{66,67} S$, était compris entre 4,2 p. 100 et 7,6 p. 100.

Pour les derniers prélèvements on a trouvé une résistance élastique de 26 kg. 8/mm² à 30 kg. 8/mm² pour une résistance à la rupture de 32 kg. 20/mm² à 35 kg. 400/mm² et un allongement à la rupture de 4,5 p. 100.

Ces essais montrent que le fer est de qualité différente suivant les pièces dans la composition desquelles il entre, celui des pièces de pont étant de meilleure qualité que celui des pièces où avaient été faits les premiers prélèvements.

Nous nous expliquons mal la différence entre le pourcentage d'allongement constaté maintenant et celui relevé lors des essais de 1858. Il est certain que pour que les essais soient comparables, il aurait fallu prendre en 1858 l'allongement sur une longueur supérieure à 10 centimètres, mais comme l'allongement de striction du fer est très faible, ceci n'explique pas la différence constatée.

Quoi qu'il en soit, le peu de constance des résultats trouvés a certainement pour origine l'hétérogénéité du métal. Il s'agit en effet de fer puddlé et par ce procédé on ne pouvait en obtenir que de petites quantités, encore relativement impures.

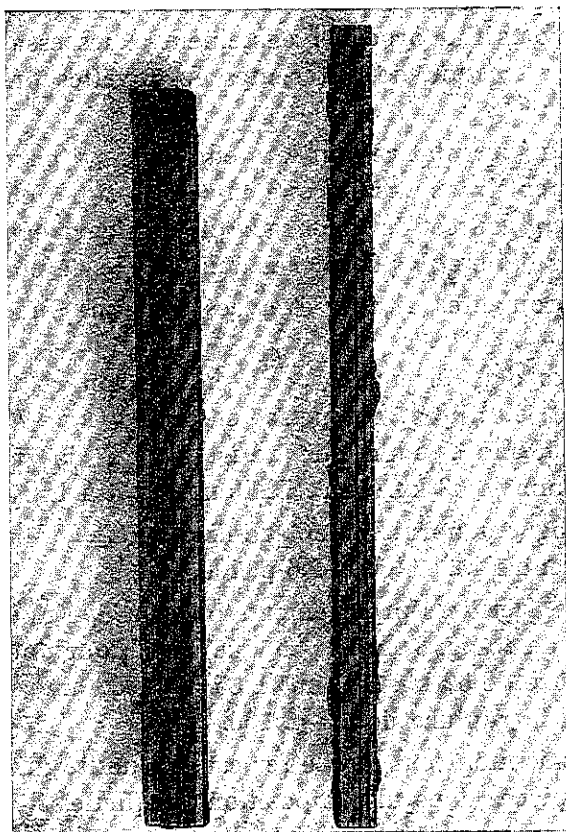


Fig. 2. — Macrographies d'éprouvettes prélevées sur le pont.

Nous avons fait procéder également à des essais de résistance sur des barrettes prélevées sur les cornières d'une pièce de pont. L'essai a été fait au mouton-pendule Charpy, avec des éprouvettes du type UF réduit.

Ces essais ont donné des résultats compris entre 3 kgm. 18 et 3 kgm. 35 pour les éprouvettes prélevées dans le sens du

laminage et 0 kgm. 85 pour les éprouvettes prélevées perpendiculairement au laminage, ce qui montre le peu d'adhérence entre elles des lamelles du fer puddlé.

L'analyse chimique du métal avait donné les résultats suivants :

Phosphore	0,37	p. 100 à 0,41	p. 100.
Soufre	0,06	p. 100 à 0,065	p. 100.
Manganèse	0,09	p. 100 à 0,13	p. 100.
Carbone	0,035	p. 100.	

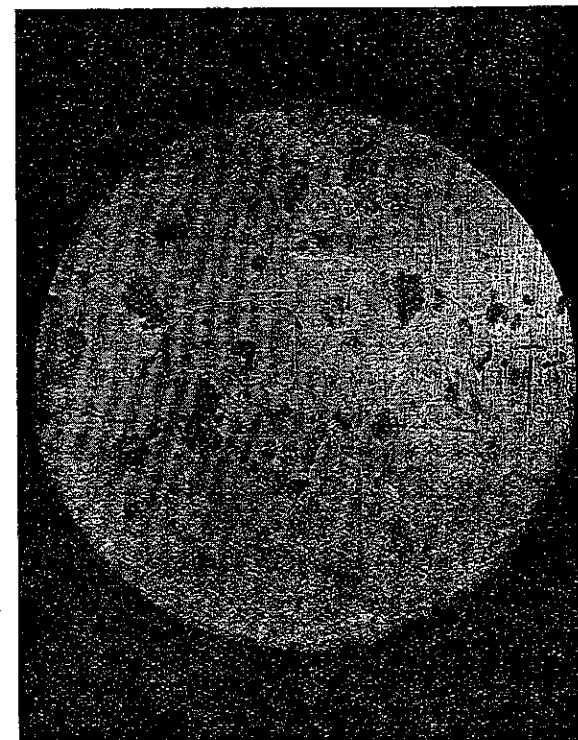


Fig. 3. — Micrographie du métal après attaque à l'acide picrique.
(Grossissement 200).

L'attaque macrographique à l'iode (fig. 2) mettait en évidence des lignes sombres correspondant à des inclusions très nombreuses de scories. Cette attaque montrait la structure lamellaire du fer puddlé, les scories étant laminées en

bandes plus ou moins épaisses incluses dans les lamelles de métal.

L'examen micrographique (fig. 3) révélait également l'existence d'inclusions de scories de très grosses dimensions et très nombreuses.

Avec de telles caractéristiques, notamment de telles proportions de soufre et surtout de phosphore, si on avait eu affaire à de l'acier, le métal aurait été impropre à la soudure; on recommande en effet d'abaisser jusqu'à 0,05 p. 100 la teneur maximum en phosphore dans les aciers doux de construction destinés à la soudure à l'arc. Mais il ne faut pas oublier que le métal du pont de Brest est du fer puddlé. Il serait d'ailleurs intéressant, à ce sujet, de rechercher comment se présente le phosphore dans le fer puddlé, s'il est dissout dans le fer ou s'il se trouve dans les inclusions de scories et suivant quelles répartitions.

Quoi qu'il en soit, le fer possède à un degré plus élevé que l'acier des propriétés de soudabilité à tel point que les compagnies de chemins de fer ont pendant longtemps maintenu l'emploi du fer pour la fabrication des pièces devant être obtenues par soudure comme les arbres de relevage et les cadres de foyer. Dans le même ordre d'idées, nous rappelons que l'on a pu souder à l'arc électrique de grandes plaques d'acier sur des ponts en fonte, et la fonte est un métal beaucoup plus difficile à souder que le fer. La réparation et le renforcement des viaducs en fonte sur le Rhône à la Voulte et à Chasse ont fait l'objet d'articles de M. DE BOULONGNE, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, publiés dans les *Annales des Ponts et Chaussées* de 1924 et 1926.

Nous avons d'ailleurs fait faire par l'Institut de Soudure Autogène une étude sur la soudabilité du métal du pont de Brest. Il résultait de cette étude que le procédé de la soudure à l'arc électrique pouvait être utilisé pour les travaux envisagés. Cependant, les micrographies d'une soudure faite à l'arc électrique (fig. 4) montraient que les scories allongées par laminage tendaient à se rassembler en nodules. On pouvait donc craindre les effets de cette transformation dans la zone de transition entre le métal d'apport et le métal de base.

Pour éviter la formation de nodules importantes, il convenait donc de fondre le moins possible de métal de base et, par conséquent, d'adopter des électrodes de petits diamètres et d'effectuer les cordons de soudure en plusieurs passes.

Si le pont de Brest est le premier ouvrage en fer établi sur une route nationale renforcé par soudure à l'arc électrique, ce procédé a déjà été employé, à notre connaissance, pour le renforcement des ponts suivants, construits également en fer puddlé :

Au Danemark, le pont Christian IX réunissant les îles Lolland et Falster, construit en 1867, a été renforcé en 1933.

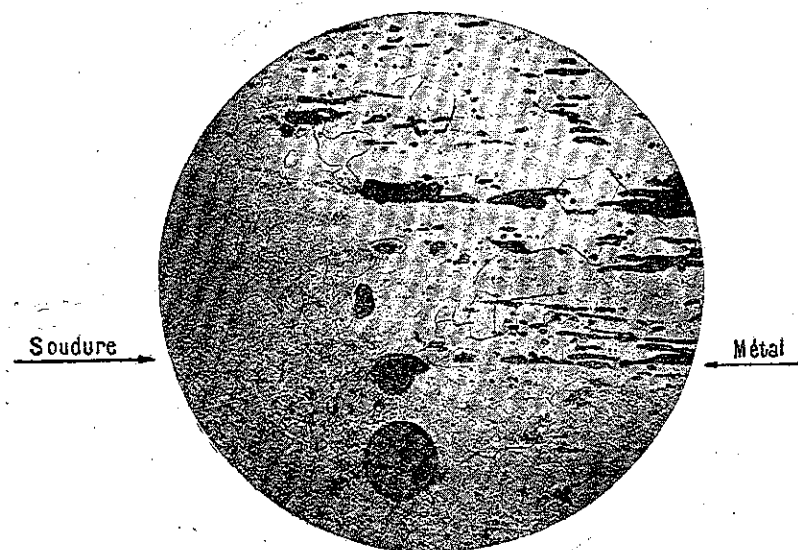


Fig. 4. — Micrographie au voisinage d'une soudure montrant les scories rassemblées en nodules et entourées d'une gaine d'oxyde. (Grossissement 100).

En Allemagne, deux ponts sur l'Oder à Cosel, construits en 1884-1888, ont été renforcés en 1933. Le métal utilisé pour la construction des ponts sur l'Oder était d'ailleurs meilleur que celui du pont de Brest, puisqu'il avait donné aux essais les résultats suivants :

Limite élastique, 25-26 kg./mm²;

Charge de rupture, 34-36 kg./mm²;

Allongement à la rupture, 20 à 29 p. 100.

V. ÉTUDE DU RENFORCEMENT DE LA CHARPENTE MÉTALLIQUE.

a. Principe des calculs.

Le renforcement a été calculé conformément au règlement du 10 mai 1927, en faisant état, par conséquent, des surcharges ci-après par mètre carré :

Chaussée de la grande volée : $820 - 4 \times 58,325 = 586 \text{ kg. 7;}$

Chaussée de la petite volée : $820 - 4 \times 28,60 = 707 \text{ kg. ;}$

Trottoirs : 400 kg.

Ces surcharges ont été multipliées par le coefficient de majoration dynamique.

On a tenu compte, en outre, d'un vent latéral de 250 kilogrammes par mètre carré.

Le calcul du renforcement a été fait suivant les principes suivants :

On a d'abord calculé le taux de travail dans les différentes pièces sous la charge permanente avant renforcement, puis l'effort dû à l'augmentation de la charge permanente. Ce dernier effort a été appliqué à la section renforcée, ce qui constitue une hypothèse favorable, tout au moins pour les premières pièces de renforcement rapportées. On n'a pas tenu compte — il aurait été d'ailleurs impossible de le faire — des surcharges dues à la circulation qui a continué de s'effectuer pendant toute l'exécution des travaux.

On a calculé ensuite le taux du travail sous la surcharge et le vent, en considérant la section renforcée. La petite volée travaille dans les conditions les plus défavorables quand la grande volée est seule surchargée; les calculs ont été faits dans cette hypothèse.

Pour les calculs proprement dits des efforts dans les fermes principales, on a considéré chacune des fermes, suivant la méthode simplifiée de RÉSAL, comme la superposition de deux poutres triangulées isostatiques. Les calculs ont été faits par la méthode graphique en utilisant les diagrammes de CREMONA.

En outre, on a fait intervenir dans le calcul des fermes principales le réseau des longerons de platelage dans toute la

partie centrale de l'ouvrage. Le pont tout entier est alors considéré comme une seule poutre caisson, ce qui est une hypothèse tout à fait légitime, étant donné que la soudure a pour effet de solidariser étroitement le tablier et les fermes principales. Aux deux extrémités de la section dans lesquelles les longerons sont pris en compte, on a d'ailleurs constitué deux chevêtres très rigides pour renforcer cette solidarisation. Cette hypothèse a permis de réduire sensiblement la section des fers de renforcement des membrures supérieures.

Dans ces conditions, le taux de travail maximum pour les pièces conservées ne dépasse pas 12 kilogrammes par millimètre carré, soit les deux tiers du taux minimum constaté pour la résistance élastique du métal des éprouvettes prélevées sur l'ouvrage.

Pour le métal ajouté, le taux du travail respecte largement les limites fixées par le règlement du 10 mai 1927, puisqu'il n'atteint nulle part 7 kg./mm².

La fatigue dans les cordons de soudure ne dépasse pas les taux qui étaient fixés par l'instruction provisoire du 19 juillet 1934 pour soudures effectuées sur le chantier.

En raison du taux de travail relativement faible du métal rapporté, il n'y a eu aucune disposition spéciale à prendre pour les soudures bout à bout ayant pour objet d'établir la continuité entre tronçons d'une même pièce.

Les seules soudures à étudier étaient donc les soudures destinées à fixer sur l'ancien ouvrage les éléments de renforcement, telles que, d'une part, la soudure des aciers de renforcement des membrures supérieures à section rectangulaire et des semelles de renforcement des pièces de pont et entretoises, et, d'autre part, les attaches des cornières et plats de renforcement des diagonales.

Il est certain que, par suite des hypothèses faites pour la répartition des charges, et notamment du poids mort de renforcement, et des hypothèses simplificatrices du calcul, il subsiste une part notable d'incertitude pour le taux de travail de l'ancien métal. Nous ne croyons pas qu'il puisse en résulter d'inconvénients car, en admettant même que, sur une pièce de l'ancien métal le taux de travail atteigne à un

section est insuffisante sont renforcées par l'adjonction de cornières et de semelles de renforcement (fig. 7).

Les membrures supérieures sont renforcées d'abord par l'adjonction par soudure d'une semelle de renforcement à la partie inférieure et par l'adjonction de gros fers rectangulaires dont la dimension va jusqu'à 125×120 , soudés à la partie supérieure entre les têtes de rivets (fig. 7a) et enfin par l'adjonction d'une âme de renforcement, à l'extérieur seulement, du fait de la présence à l'intérieur des pièces de pont et entretoises.

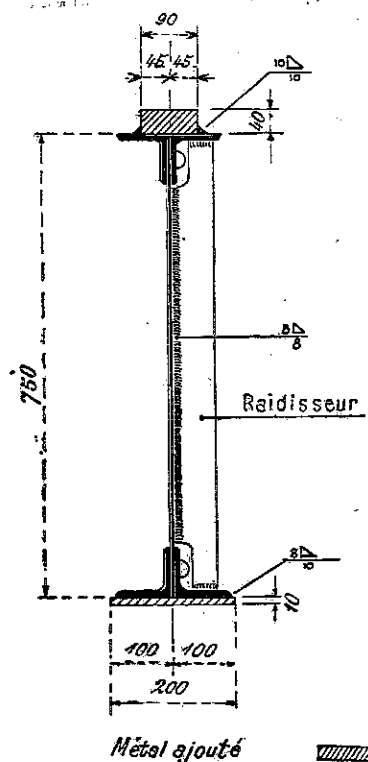


Fig. 6. — Renforcement des pièces de pont.

L'emploi de gros fers rectangulaires choque un peu l'esprit habitué à la charpente métallique rivée où l'épaisseur des pièces est limitée par le poinçonnage. Cependant, la forme rectangulaire, la seule possible en raison de la présence des têtes de rivets, est tout à fait rationnelle en charpente soudée.

Comme la soudure bout à bout de tels fers aurait pu présenter quelques difficultés d'exécution, ceux-ci ne furent adoptés qu'après l'exécution d'essais de rupture à la traction et au choc, d'éprouvettes soudées et non soudées, de dimensions comparables. Bien que ces essais aient été très satisfaisants, nous avons prévu l'exécution d'une surépaisseur de 20 p. 100 pour ces soudures de raboutement.

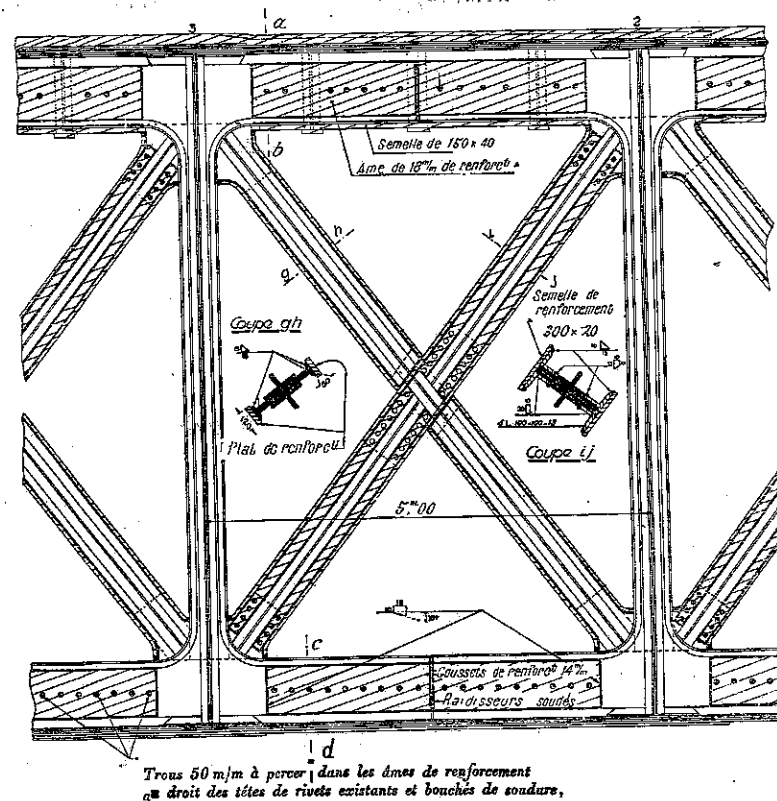


Fig. 7. — Renforcement des formes principales (petite volée, panneau 2-3).

Les dessins de renforcement des différents éléments de la charpente montrent que l'on s'est efforcé, d'une part, d'avoir le plus possible à effectuer des soudures à plat pour la fixation des pièces rapportées, puisque ce sont en effet celles qui s'effectuent dans les meilleures conditions et, d'autre part, d'obtenir après renforcement un profil aussi symétrique que possible.

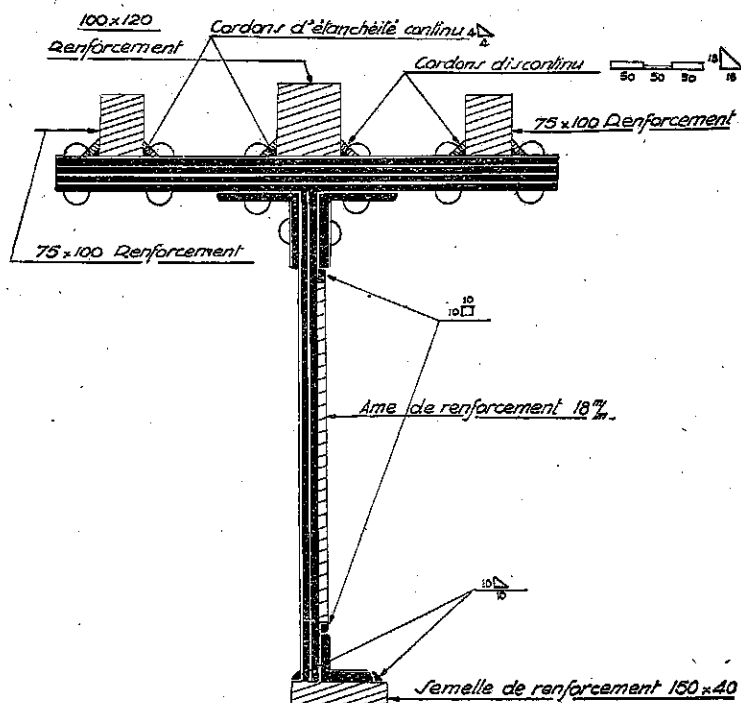


Fig. 7 a. — Renforcement de la membrure supérieure. — Coupe suivant a-b.

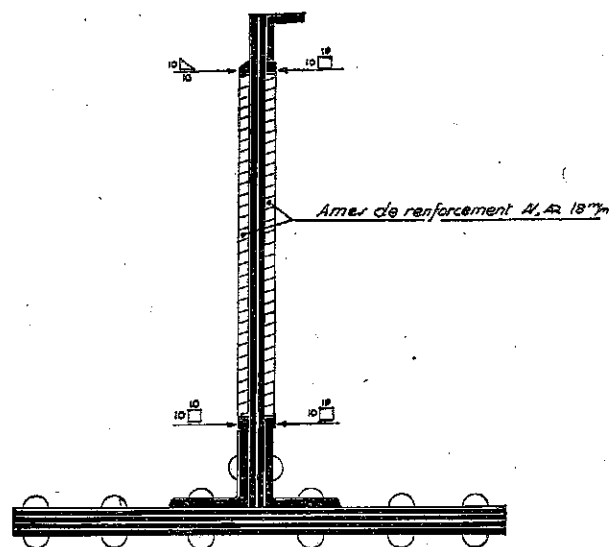


Fig. 7 b. — Renforcement de la membrure inférieure. — Coupe suivant c-d.

Contrepoids. — L'équilibre du pont après renforcement est réalisé par une augmentation du contrepoids telle que la résultante des charges verticales sous poids mort après renforcement continue à passer dans l'axe de la pile.

Le contrepoids existant reposait sur des traverses en fonte qui ne pouvaient être surchargées; il a donc fallu établir un plancher intermédiaire accroché aux parois de la chambre pour supporter le supplément de contrepoids.

VI ÉTUDE DU RENFORCEMENT DU MÉCANISME DE MANŒUVRE.

Le projet de renforcement de la charpente métallique nécessitait l'emploi de 283 tonnes d'acier et de 120 tonnes de fonte pour l'augmentation des contrepoids. Le poids d'une volée devant passer de 742 à 980 tonnes après renforcement, il convenait d'examiner si le mécanisme existant permettrait la manœuvre du pont après renforcement.

De plus, pendant l'exécution des travaux, on devait pouvoir manœuvrer l'ouvrage; il fallait tenir compte également du poids de l'échafaudage, de telle sorte que le poids à considérer par volée était en réalité de 1.060 tonnes, ce qui représentait une augmentation totale de $1.060 - 742 = 318$ tonnes.

La charge sur un galet passait ainsi de 14.840 kilogrammes avant renforcement à 19.600 kilogrammes après renforcement et à 21.200 kilogrammes, compte tenu de l'échafaudage.

En réalité, du fait notamment du verrouillage sur les culées et du calage à l'aide des vérins à vis, la charge est inégalement répartie sur les galets, et comme les galets sont creux, il est assez difficile de se rendre compte de la façon dont ils travaillent.

La résistance au roulement passait en même temps de 8.600 kilogrammes avant renforcement à 11.270 kilogrammes après renforcement et à 12.100 kilogrammes compte tenu de l'échafaudage.

Comme la manœuvre de l'ouvrage ne nécessitait que des efforts très modérés, elle devait donc rester très possible après exécution des travaux.

De l'examen auquel il fut procédé, il résultait que la grande

crémaillère circulaire, les galets et le chemin de roulement étaient en bon état et pouvaient être conservés et que, par contre, les pignons de commande et les roues et pignons de renvoi du mouvement des cabestans devaient être changés, les dents présentant un jeu et une usure appréciables, et certaines d'entre elles étant d'ailleurs cassées. Les mécanismes de verrouillage des volées entre elles et sur les culées pouvaient être également conservés.

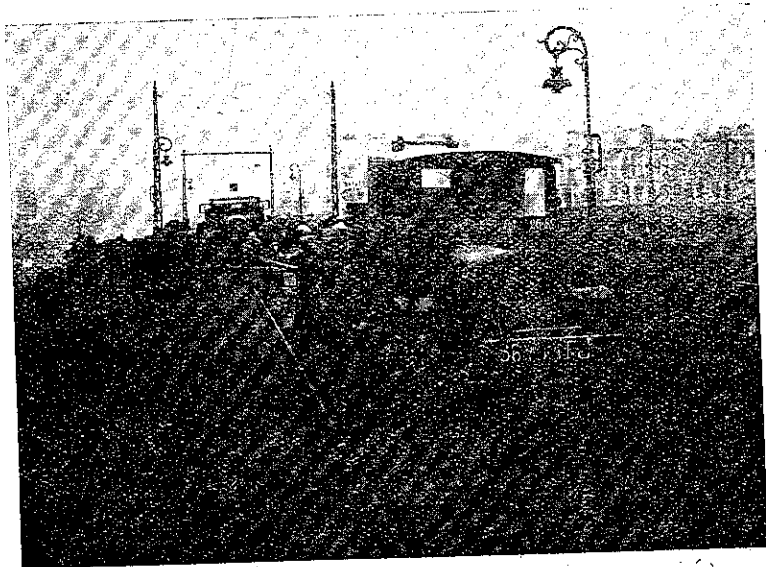


Fig. 8. — Essais de manœuvre de l'ouvrage avec surcharge égale au poids mort de renforcement.

D'ailleurs, pour donner tous apaisements en ce qui concerne la possibilité de manœuvre du pont renforcé, nous avons fait procéder à des essais de manœuvre de l'ouvrage sous des surcharges progressivement croissantes, appliquées sur le tablier au droit des piles. Ces essais, effectués les 18, 19 et 20 décembre 1932, ont été pleinement satisfaisants.

La volée côté Brest a été manœuvrée sous 100 tonnes, 150 et 250 tonnes de surcharge.

La volée Recouvrance a été manœuvrée sous 250, 330 et 380 tonnes (fig. 8).

La manœuvre sous la surcharge maximum a été effectuée sans la moindre difficulté avec le même nombre d'hommes aux cabestans qu'à l'ordinaire (4 à chaque cabestan, soit 8 hommes par volée). L'examen du mécanisme à la suite de ces essais ne révéla rien de particulier.

VII. EXÉCUTION DES TRAVAUX.

Installation de chantiers. — L'entreprise ne disposait pour ses installations de chantiers que des trottoirs situés sur les deux rives à l'amont de l'ouvrage. Elle n'eut cependant pas trop à souffrir de l'exiguïté des emplacements ainsi mis à sa

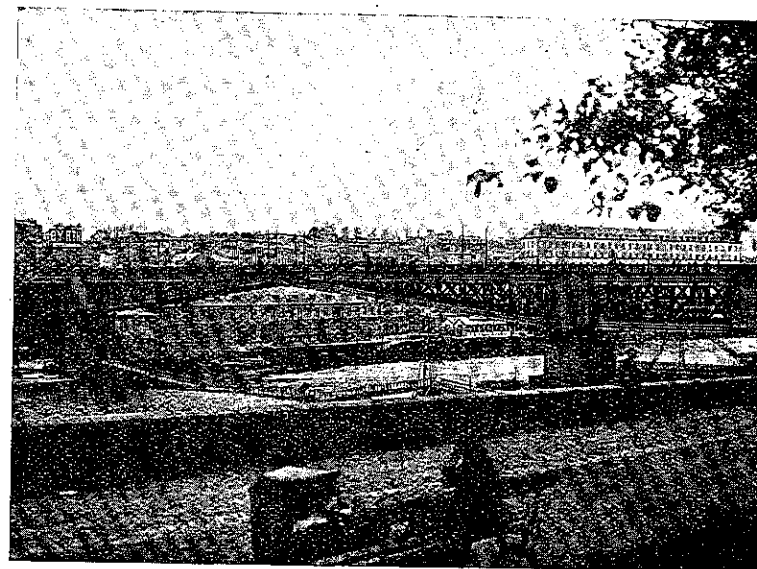


Fig. 9. — Vue d'ensemble de l'ouvrage et de l'échafaudage.

disposition, en échelonnant les livraisons des pièces de renforcement. Il était possible d'opérer ainsi car le programme d'avancement des travaux avait été minutieusement étudié par l'entreprise.

Echafaudage. — L'échafaudage comportait essentiellement deux planchers, le premier situé en dessous des membrures supérieures des fermes principales, le deuxième suspendu au

premier par des tirants et situé en dessous des membrures inférieures. Les figures 9 et 22 montrent d'ailleurs comment il était constitué.

L'échafaudage dont le poids par volée s'élevait à 64 tonnes auquel il faut ajouter le supplément de contrepoids pour équilibrage, était accroché à la charpente métallique, ce qui venait augmenter la fatigue du métal conservé. Il n'était d'ailleurs pas possible d'opérer autrement en raison des manœuvres d'ouverture de l'ouvrage, ni d'apporter aucun allègement compensatoire, si ce n'est dans une faible mesure en démolissant le béton des trottoirs et en le remplaçant par des panneaux mobiles en bois, ce qui fut fait.

Cet échafaudage permit tout d'abord de relever exactement la dimension des pièces de renforcement. Ce travail fut effectué avec beaucoup de soin, car la soudure exige une correspondance très précise des pièces à réunir. Nous prendrons à titre d'exemple le cas des âmes de renforcement des membrures inférieures, dont il fallut relever exactement les dimensions pour que les cordons de soudure qui les assemblent sur tout leur pourtour à l'ancienne membrure ne soient ni trop larges ni trop étroits. De même, la position des rivets dûnt être exactement repérée puisque ces âmes devaient être percées de trous pour le passage des têtes de rivets.

Renforcement des mécanismes. — Ces travaux ont été effectués du 27 mai 1935 au 31 août 1935. Chacune des volées comportait deux mécanismes; ceux-ci furent remplacés successivement; la manœuvre s'effectuant à l'aide d'un seul mécanisme pendant toute la période de remplacement. Les essais de manœuvre effectués avec un seul mécanisme furent tout à fait satisfaisants et pendant toute la durée du travail de remplacement, le pont put être ouvert à toutes les demandes de la Marine. Le seul incident qui se soit produit est, au cours d'une ouverture, la rupture, le 24 juin 1935, sur la volée Recouvrance, de la pièce en fonte qui supporte l'arbre du pignon qui engrène avec la grande circulaire dentée. Le deuxième mécanisme qui était en cours de démontage fut remonté rapidement et, en même temps, l'arbre du pignon

fut coupé au chalumeau oxyacétylénique. Après une interruption de la circulation de six heures, le pont qui était immobilisé en position d'ouverture, put être refermé.

Équipement électrique. — L'obligation où l'on se trouvait de pouvoir manœuvrer le pont imposa l'établissement d'un circuit distinct sur chacune des volées. Le courant triphasé 190 volts fourni par le secteur était transformé sur chaque rive par un groupe convertisseur en continu à 60 volts et distribué tout le long de chacune des volées. Des jonctionneurs flexibles établis à l'extrémité des petites volées permettaient le débranchement au moment des ouvertures du pont.

Les pinces des soudeurs étaient branchées sur des résistances réglables reliées aux fils de distribution.

Les soudeurs travaillaient en principe par équipe de deux, l'un après l'autre, l'un piquant et brossant la soudure qu'il venait d'effectuer pendant que l'autre fondait son électrode. Ils étaient branchés sur le même plot d'une résistance, et s'ils travaillaient à des postes éloignés, le dispositif suivant leur permettait de savoir si leur coéquipier avait fondu son électrode : le masque du soudeur comportait une petite lampe témoin branchée d'un côté à la pince du soudeur de l'autre à la masse; pendant l'exécution d'une soudure la différence de potentiel tombant à 20-22 volts, la lampe s'éteignait et se rallumait sitôt la fusion de l'électrode terminée.

Chaque groupe convertisseur permettait d'alimenter trois équipes de deux soudeurs travaillant dans ces conditions.

Agrégation des électrodes. — Les clauses du marché relatives à l'agrégation des électrodes étaient celles prescrites par l'instruction provisoire du 19 juillet 1934 du Ministère des Travaux Publics.

Toutes les soudures ont été effectuées avec des électrodes Safer spécial C 40 de 3 mm, 25, 4 mm. et 5 mm. de diamètre. Il a été utilisé très peu d'électrodes de 5 mm.

Les essais effectués au Laboratoire de l'Institut de Soudure Autogène montrent que ces électrodes ont satisfait très largement aux prescriptions de l'instruction précitée. Ils ont donné pratiquement les résultats suivants :

Essais de traction.

	CHARGE DE RUPTURE.	LIMITE ÉLASTIQUE.	ALLONGEMENT.
	Kg/mm ² .	Kg/mm ² .	
Éprouvettes cylindriques en métal d'apport.....	42 à 52	28 à 32,8	20 à 29 p. 100
Assemblages soudés après surépais- seurs usinées.....	38 à 42,25	Rupture en dehors de la soudure.	

Le métal de base pour les assemblages soudés était l'acier doux utilisé pour le renforcement de l'ouvrage.

Essais de pliage à froid.

Le pliage s'est fait à bloc, sans aucune crique.

Essais de résilience sur éprouvettes UF.

8 kgm. à 10,95 kgm.

On voit ainsi que les électrodes utilisées ont satisfait aux prescriptions de la circulaire du 25 juillet 1935, modifiant l'instruction provisoire du 19 juillet 1934.

Contrôle de la main-d'œuvre. — Les clauses du marché étaient celles prescrites par l'instruction provisoire du 19 juillet 1934.

Tous les soudeurs employés aux travaux ont subi, avant leur embauchage, les essais prescrits par l'instruction précitée sous le contrôle de l'Institut de Soudure Autogène.

Ces essais ont été répétés plusieurs fois en cours de travaux, notamment un mois après l'arrivée des ouvriers sur le chantier. Tous les essais ont été effectués sur l'échafaudage du pont dans les conditions strictes du travail habituel. Chaque soudeur était muni d'un poinçon portant une lettre particulière. En plus des essais réglementaires effectués avec l'acier doux de renforcement, nous avons fait procéder à des essais de traction sur des éprouvettes fer et acier et à des essais de soudure d'angle sur des assemblages en croix, fer et acier, sur lesquels nous reviendrons plus loin.

Consécutivement à ces derniers essais, nous avons été amenés à demander à l'entreprise de congédier deux de ses

soudeurs, bien qu'au cours des essais réglementaires ils eussent satisfait aux prescriptions du marché.

Renforcement de la charpente métallique. — L'obligation de pouvoir ouvrir à chaque instant le pont imposait que l'exécution des travaux soit faite dans un ordre strictement

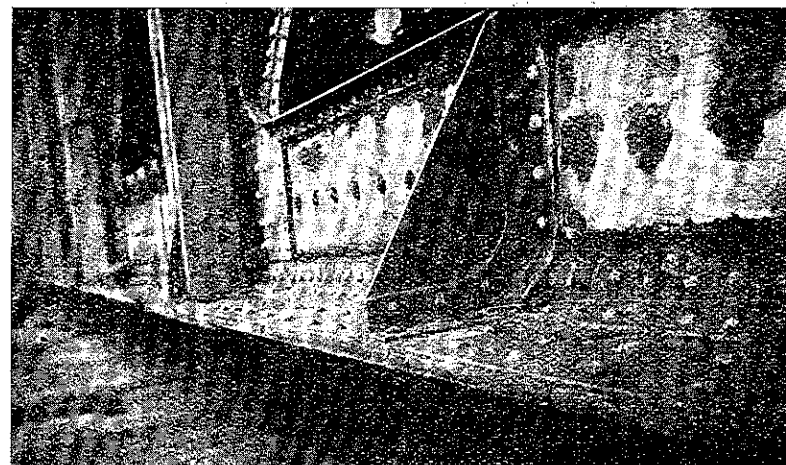


Fig. 10. — Renforcement des membrures inférieures (avant renforcement).



Fig. 11. — Renforcement des membrures inférieures. (Ame de renforcement mise en place et non soudée).

déterminé, de façon qu'à chaque instant l'équilibre longitudinal et transversal du pont soit assuré.

L'équilibre transversal était facilement assuré en exécutant les travaux de renforcement simultanément et avec le même avancement sur chaque côté des fermes principales.

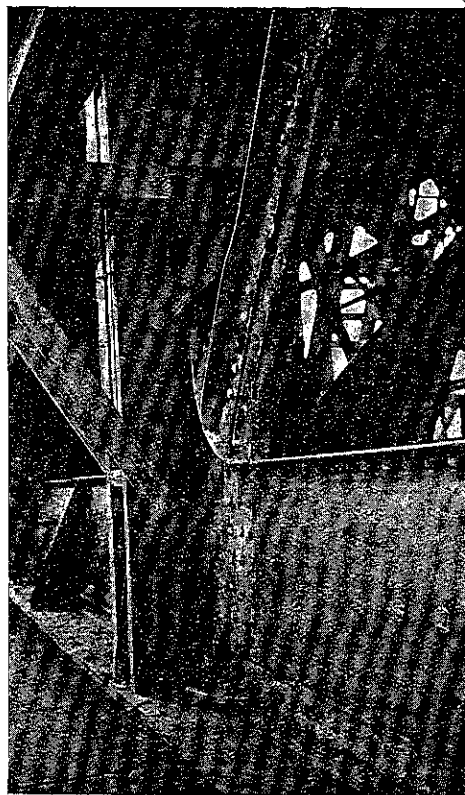


Fig. 12. — Renforcement des membrures inférieures.

L'équilibre longitudinal était assuré, d'une part, en exécutant les travaux en même temps à partir de la pile dans la grande volée et dans la petite volée, et, d'autre part, en réglant le contrepoids placé à l'extrémité de la petite volée.

Les travaux proprement dits de renforcement de la charpente métallique ont commencé à la fin du mois de mars 1935, par l'adjonction des âmes de renforcement des membrures inférieures des poutres maîtresses.

Antérieurement, une passerelle métallique destinée à faciliter la visite ultérieure de l'ouvrage avait été posée au niveau des membrures inférieures sur le contreventement horizontal.



Fig. 13. — Renforcement des diagonales.

Les figures 10, 11 et 12 montrent la membrure inférieure avant renforcement, puis après enlèvement des raidisseurs extérieurs et mise en place d'un dispositif pour résister au flambement, et enfin après renforcement. La dernière photographie montre la soudure effectuée sur les têtes des rivets des anciennes âmes.

Les plats et cornières de renforcement des diagonales de la petite volée ont été fixés sur les pièces par une série de

points de soudure. Pour aucune pièce, on n'a eu besoin d'utiliser de boulons de montage.

Les blooms de renforcement des membrures supérieures étaient fixés avant soudure à l'aide de cavaliers en forme de $\sqcup$ soudés sur les plate-bandes de la membrure.

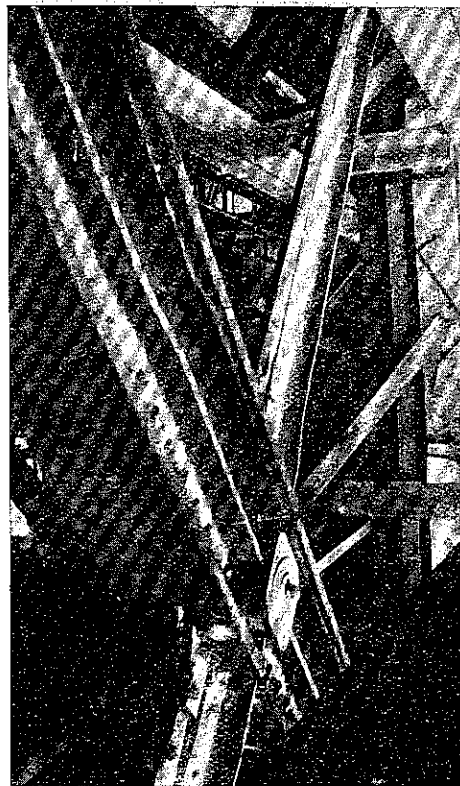


Fig. 14. — Renforcement des diagonales.

La longueur maximum des blooms qui purent être livrés par les forges fut de 8 mètres en raison des difficultés d'usinage. Ils devaient en effet être placés à peu près sans jeu entre les files de rivets unissant les semelles des membrures supérieures et chacun d'eux devait être épaulé au droit des nombreux couvre-joints de semelles ou changement de section. Il était donc nécessaire que les flancs de ces blooms soient parfaitement rectilignes et leurs plans de portage sur

semelle bien dressés. Le raboutement de ces blooms nécessita l'exécution de quatre-vingt quatre soudures en X, qui furent effectuées sans difficulté.

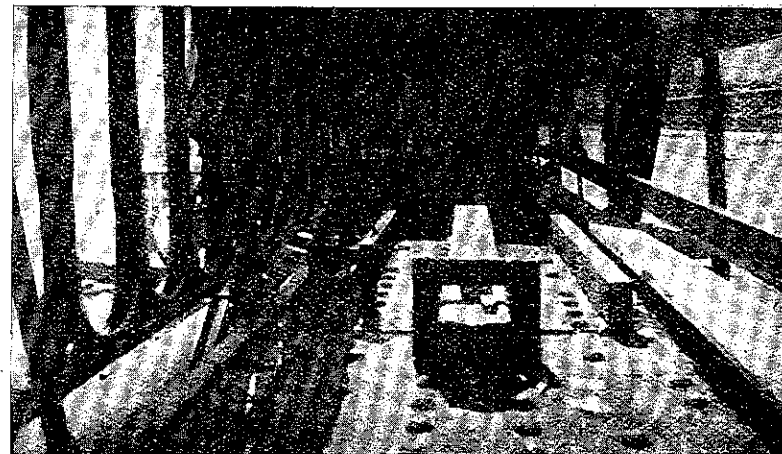


Fig. 15. — Renforcement des membrures supérieures.

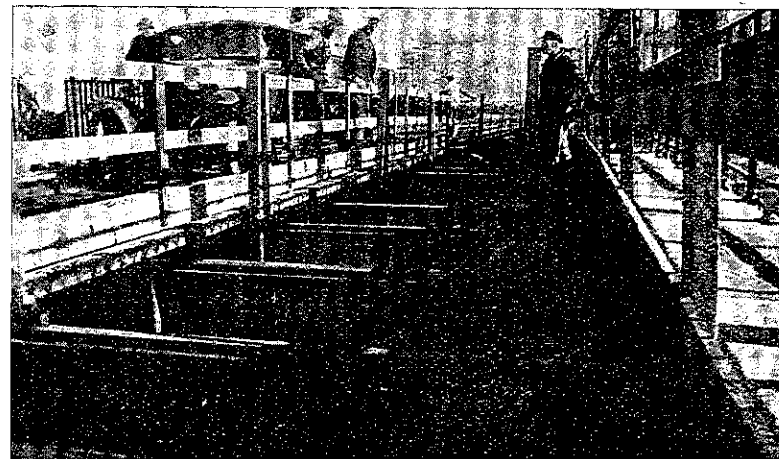


Fig. 16. — Renforcement des pièces du pont et entretoises.

Pendant l'exécution des travaux de renforcement du tablier, soit du début de janvier à la fin de mai 1936, la circulation des véhicules a dû se faire sur une demi-largeur de l'ouvrage, la

largeur de chaussée disponible était de 2 m. 35. La circulation s'effectuait alternativement dans un sens, puis dans l'autre par pilotage à l'aide d'un bâton pilote pendant le jour; la nuit, la chaussée était en principe fermée, et un gardien livrait passage aux véhicules à la demande, le passage restant libre pour les piétons. Les tramways effectuaient un service jusqu'à chacune des extrémités du pont et les



Fig. 17. — Pose de longerons pour le renforcement du tablier.

voyageurs passaient le pont à pied. Pour la traversée des voitures des tramways le matin et le soir, on fut obligé d'établir une voie provisoire, lors du renforcement du côté amont. Grâce à ces dispositions, la circulation a pu s'effectuer dans des conditions satisfaisantes pendant toute l'exécution des travaux.

Pour remédier aux corrosions des paquets de tôles formant les membrures, nous avons fait piquer la rouille et effectuer un cordon de soudure entre les tôles. On réalise ainsi l'étanchéité absolue de la tranche de tôle, ce qui la met à l'abri de toute corrosion ultérieure. Nous avons fait faire de nombreuses soudures de ce genre, puisque le développement des soudures d'étanchéité atteint 8.000 mètres.

Le platelage a été constitué en madriers d'azobé de 9 centimètres d'épaisseur, recouverts d'un tapis en vieux câbles de mine imprégnés de goudron végétal.

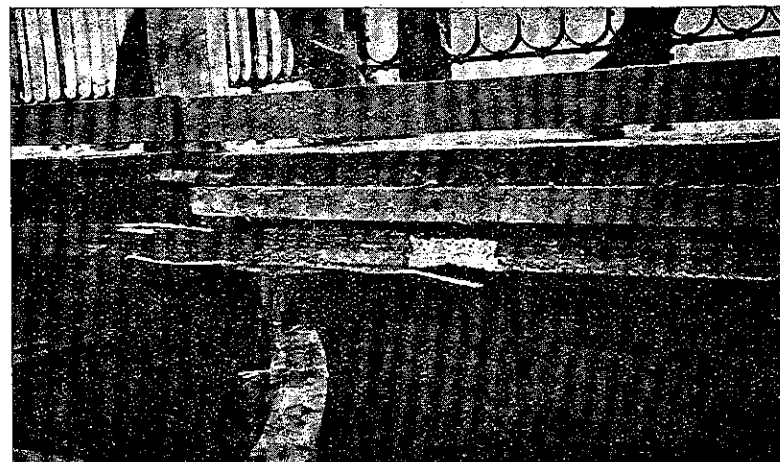


Fig. 18. — Corrosions de la membrure supérieure.

Du fait du relèvement de la cote de la chaussée, les trottoirs ont dû également être surélevés. La surélévation a été obtenue en coulant entre deux petites murettes en béton armé du béton cellulaire pour éviter d'alourdir l'ouvrage (densité 0,3 à 0,4). L'aire du trottoir est constituée par une dalle en béton armé reposant sur les deux murettes latérales, recouverte d'une chape de rocasphalte (fig. 5).

Parallèlement, le relèvement de la culée et de la chaussée aux abords du pont a été effectuée.

La charpente métallique a été protégée par deux couches de minium de plomb, puis deux couches de peinture aluminium.

Préparation des pièces. — Les éléments de renforcement ont été livrés sur le chantier tout préparés et chanfreinés. Nous avons déjà parlé de la précision qu'il était nécessaire d'apporter à cet usinage.

Par contre, pour la réparation des pièces corrodées (éléments de cornières des entretoises à remplacer, couvre-joints des montants verticaux à remplacer, réfection des nœuds de diagonales, etc.), les éléments de renforcement devaient être préparés à la demande et ont été découpés et usinés sur le chantier au chalumeau oxyacétylénique. Ce procédé d'oxycoupage à main, qui ne saurait être admis pour la préparation des pièces essentielles du renforcement s'est révélé particulièrement commode pour la préparation des pièces accessoires comme les couvre-joints, et des pièces nécessaires pour les réparations de corrosions dont il était impossible de fixer par avance les dimensions; c'est le cas des cornières supérieures des entretoises qui n'ont pu être examinées qu'après le démontage de la chaussée.

Mode d'exécution des soudures. — Ainsi que nous l'avons dit plus haut en examinant les caractéristiques du métal dont était constitué le pont de Brest, il était nécessaire d'employer des électrodes de petits diamètres et d'opérer par passes successives.

Pour l'exécution des soudures, on s'est en outre conformé aux principes suivants :

Pour la fixation d'une pièce de renforcement sur un élément de l'ouvrage, les soudures ont été effectuées en plusieurs passes, par fraction de n centimètre correspondant à la fusion d'une électrode : chaque passe commençant à n centimètre environ de la passe terminée pour venir s'y raccorder, de façon à diminuer, dans la mesure du possible, les tensions de retrait. La longueur n varie avec le diamètre de l'électrode utilisée (50 centimètres pour $\varphi = 3,25$); c'est la soudure dite « à pas de pèlerin ».

Pour la soudure bout à bout d'une pièce rapportée en acier à une pièce de fer (âme de renforcement des membrures supérieures et inférieures par exemple) on commençait par

faire un léger rechargement de soudure sur la lèvre de la pièce en fer. Ce rechargement a pour effet de solidariser entre elles les différentes lamelles constituant le fer puddlé et permet ensuite d'exécuter la soudure acier sur acier dans de meilleures conditions.

Un procédé analogue a été utilisé pour l'exécution des soudures de fixation de fers rectangulaires de renforcement des membrures supérieures. Il était effectué d'abord un rechargement de 20 à 25 mm. de large avec des électrodes de 3 mm. 25 sur le fer avant l'exécution de la soudure proprement dite, de façon à accrocher entre elles sur une plus grande surface les lamelles de fer.

Les soudures des chanfreins en X pour la jonction entre eux de gros fers rectangulaires, étaient évidemment exécutées après achèvement des soudures d'un des fers et avant exécution des soudures du deuxième, de façon à permettre le retrait provoqué par la soudure.

Pour nous rendre compte de l'efficacité des dispositions prises, nous avons fait procédé aux essais suivants :

a) Essais de traction sur éprouvette fer acier de 35 mm. $\times$ 10 mm. de section, soudées à plat en plusieurs passes avec reprise à l'envers. Les surépaisseurs de soudures ont été usinées avant l'essai.

La rupture s'est toujours produite dans le fer.

Les soudures bout à bout fer sur acier sont donc tout à fait satisfaisantes.

b) Essais de pliage. — L'angle de pliage de l'apparition de la première crique a varié de 20 à 40°. La crique est toujours apparue dans la zone d'accrochage côté fer, ce qui montre bien que c'est là le point délicat.

c) Essais d'assemblage en croix. — Nous avons fait une première série d'éprouvettes dans lesquelles l'effort de traction était exercé sur l'acier (fig. 19).

Certaines soudures étaient faites après rechargement préalable sur le fer, et d'autres sans rechargement préalable. Dans tous les cas, la rupture s'est produite par arrachement du fer sous la soudure, ce qui s'explique très bien du fait de la

structure lamellaire du fer puddlé que l'effort de traction tend à décoller.

On a obtenu une augmentation de 15 à 20 p. 100 de la résistance spécifique $\frac{F}{2al}$ pour les soudures effectuées après rechargement préalable. La résistance spécifique moyenne trouvée après rechargement est de 20 kg./mm².

La macrographie (fig. 20) donne l'importance du rechargement opéré. Cette macrographie montre en même temps l'altération du métal d'apport par suite des impuretés du fer

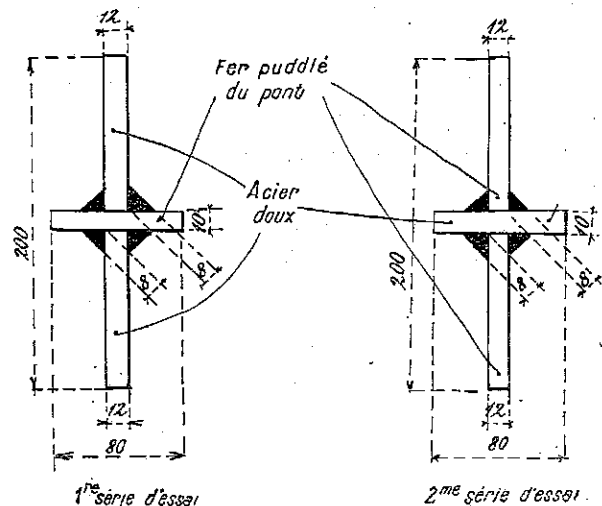


Fig. 19. — Assemblage en croix fer-acier.

puddlé. Les gros cristaux brillants que l'on voit dans la soudeure doivent être attribués au phosphore provenant du fer puddlé. Nous signalons incidemment qu'en raison de cette altération du métal d'apport par le phosphore et de l'augmentation de fragilité qui peut en résulter, il serait intéressant de rechercher la limite de fatigue fixée par la courbe de WÖHLER, d'abord du métal de base, et ensuite d'un assemblage soudé fer sur acier, et de faire également des essais de résiliences sur assemblage soudé fer-acier. L'achèvement des travaux ne nous a pas permis de procéder à ces essais.

Dans une deuxième série d'éprouvettes l'effort de traction était exercé sur le fer (fig. 19).

Certaines soudures étaient faites après rechargement préalable sur le fer, et d'autres sans rechargement préalable.

Parfois la rupture s'est produite dans le fer, mais le plus souvent elle s'est produite au ras du cordon de soudeure. L'effet du rechargement préalable n'est pas sensible dans ce cas, ce qui explique d'ailleurs très bien l'effort de traction s'exerçant dans le sens du laminage du fer puddlé.

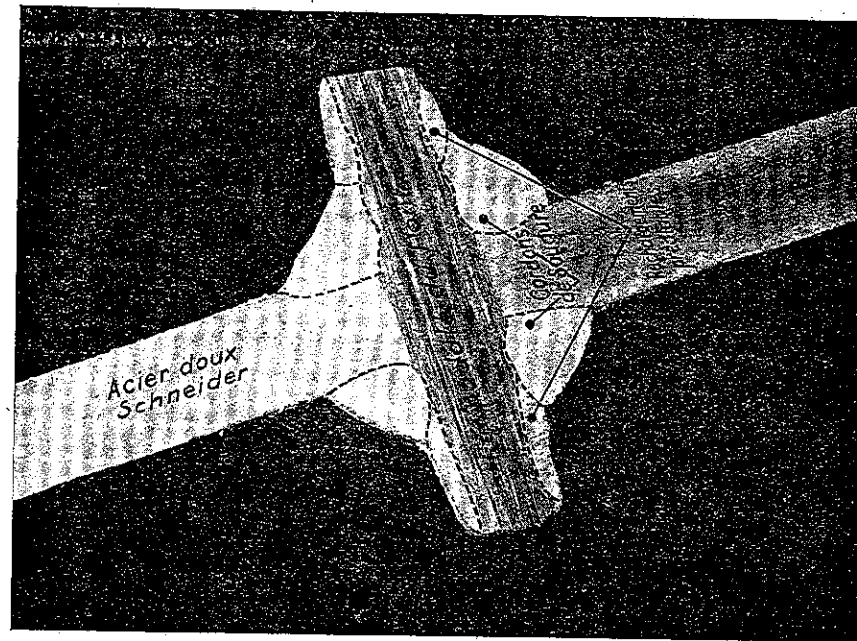


Fig. 20. — Macrographie d'un assemblage en croix fer-acier.

Cette position relative des pièces de fer et acier ne se rencontrait d'ailleurs pratiquement pas dans les travaux.

Malgré les précautions prises, certaines fissures se sont produites, notamment au début des travaux, au moment où la technique opératoire n'était pas encore fixée. Presque toutes les fissures constatées se sont produites à l'occasion de la fixation d'une tôle d'acier perpendiculairement à une tôle mince de fer : c'est le cas de l'assemblage en croix indiqué ci-dessus. Ces fissures doivent être attribuées soit à une exécution défectueuse — nous avons dû en effet, demander le

licenciement de deux soudeurs — soit à l'emploi d'électrodes de trop gros diamètres — au début on avait envisagé en effet d'employer surtout des électrodes de 4 mm.

Nous avons relevé également au début des travaux une fissure le long d'une soudure bout à bout fer sur acier. Cette fissure correspondait à une ornière creusée dans le fer par le cordon de soudure. Cet effet de morsure auquel le fer semble devoir donner lieu facilement, a pu être évité par la suite, en opérant en plusieurs passes et en diminuant l'ampérage.

Les réparations ont été faites par soudure sans difficulté.

Vérification des soudures. — Nous avons déjà parlé, au paragraphe Contrôle de main-d'œuvre, des essais périodiques auxquels ont été soumis les ouvriers soudeurs.

Indépendamment de ce contrôle, tous les travaux de soudure ont été fait sous la surveillance d'un Ingénieur de l'Institut de Soudure Autogène, qui a, en somme, mis au point la technique opératoire adoptée. Cette observation directe qui s'exerce pendant le travail même du soudeur, vient compléter le contrôle de la main-d'œuvre, et porte sur la stabilité de l'arc, sur l'intensité du courant de soudure, — des ampèremètres mobiles permettant de vérifier le débit sans interrompre le travail — sur l'aspect et la régularité des cordons de soudures. Ce contrôle de tous les instants permet à notre avis, sous réserve évidemment qu'il soit exécuté par un observateur compétent, d'avoir toute garantie pour la bonne exécution du travail.

Nous avons envisagé de procéder à l'achèvement des travaux, au contrôle des quelques soudures essentielles à l'aide des rayons X. A cet effet nous avons fait faire des épreuves radiographiques de soudure bout à bout fer sur fer, et fer sur acier. Ce type de soudure est celui où la méthode radiographique donne les meilleurs résultats. En raison des inclusions contenues dans le fer, l'interprétation des radiographies se révèle particulièrement délicate et incertaine; elle l'aurait été d'autant plus qu'en pratique, pour toutes les soudures bout à bout fer sur acier exécutées sur l'ouvrage, la base du V

portait sur une tôle de fer. Pour prendre un exemple, la radiographie des soudures bout à bout des âmes de renforcement des membrures (fig. 7a et fig. 7b) aurait donné non seulement les défauts éventuels de la soudure, mais les inclusions de l'âme en fer de la membrure.

Dans ces conditions nous n'avons pas cru devoir poursuivre ces essais, mais cette méthode de contrôle conserve évidemment toute sa valeur pour l'examen des soudures acier sur acier.

XIII. — ÉPREUVES.

Les essais de l'ouvrage ont été effectués le dimanche 21 juin 1936 en collaboration avec le Service technique du réseau de l'État qui mit à notre disposition les appareils de mesure dont il disposait.

Le renforcement de la charpente métallique et le revêtement de la chaussée étaient alors complètement terminés. Seul le bétonnage des trottoirs n'était pas fait pour pouvoir vérifier après les essais, l'état des soudures des blooms de renforcement des membrures supérieures.

Comme il était impossible d'interrompre longtemps la circulation sur l'ouvrage, les trottoirs ne reçurent aucune surcharge. Du fait de l'échafaudage tout se passait cependant comme si l'on avait une surcharge moyenne par mètre carré de trottoir de (64 tonnes d'échafaudage + 5 d'échafaudage supplémentaire).

$$\frac{69.000}{2 \times 86.925} = 400 \text{ kg. environ.}$$

chiffre qu'il faut ramener à 200 kilogrammes environ pour tenir compte de ce que le bétonnage des trottoirs n'était pas effectué.

La surcharge de la chaussée a été constituée par quatorze camions d'un poids moyen de 11 T. 900 environ, et de six motrices de tramways d'un poids moyen de 13 tonnes environ, ce qui représente une surcharge d'environ :

$$\frac{14 \times 11.900 + 6 \times 13}{5 \times 86.925} = 575 \text{ kilogrammes par m}^2.$$

Les taux de travail étaient mesurés à l'aide d'appareils HUGGENBERGER, MANET-RABUT et BOURDON. Les sections observées au cours des essais sont indiquées sur le schéma (fig. 21).

Les flèches étaient mesurées à l'aide de fleximètres enregistreurs montés à l'extrémité de la volée Brest, sur des câbles reliant le tablier du pont à des corps morts immergés dans la Penfeld. En outre, avant chaque essai, au cours des essais statiques, et à la fin des essais, il était procédé au nivellement des poutres.

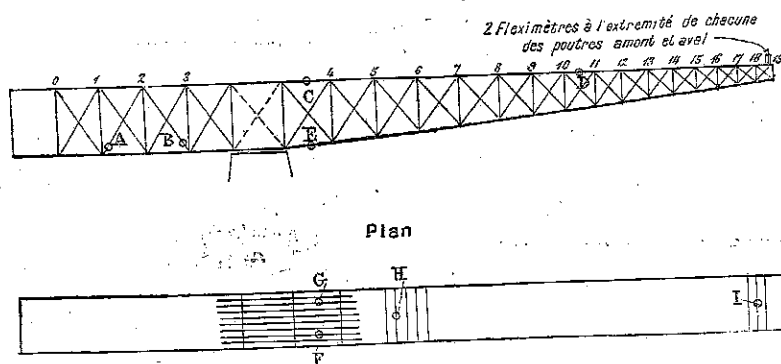


Fig. 21. — Schéma d'une volée donnant les sections observées au cours des essais.

Il a été procédé successivement aux essais suivants :

- 1^{er} essai. — Petite volée de Brest seule chargée, puis déchargement de l'ouvrage;
- 2^e essai. — Grande volée de Brest seule chargée, puis déchargement de l'ouvrage;
- 3^e essai. — Volée de Brest chargée complètement, puis déchargement de l'ouvrage;
- 4^e essai. — Volée Recouvrance seule chargée, puis déchargement de l'ouvrage;
- 5^e essai. — Passage de tous les véhicules à 6 kilomètres à l'heure environ (fig. 22);
- 6^e essai. — Passage d'un véhicule de 18 tonnes à 30 kilomètres à l'heure;
- 7^e essai. — Mesure de la flèche à l'extrémité de la volée Brest avec une surcharge de trois camions de 11,9 tonnes, placés à son extrémité après déverrouillage des volées.

Les taux de travail constatés ont été dans tous les cas inférieurs aux taux de travail calculés. Cela tient en partie au verrouillage des deux volées. Nous avons essayé de nous rendre compte de l'efficacité de ce verrouillage en mesurant les efforts dans une des volées, lorsque l'autre volée était seule chargée. Les résultats trouvés ne sont nullement concluants, car il aurait fallu pouvoir déplacer les appareils de mesure, répéter les essais et pour cela disposer de beaucoup plus de temps que nous n'en disposions.

Le nivellement effectué sur chacun des trottoirs, volées déverrouillées entre elles, mais fixées sur les culées, donne par rapport au nivellement effectué en 1929, les augmentations de flèche suivantes :

Poutres amont	Volée Brest : 58 mm.;
	Volée Recouvrance : 74 mm.;
Poutres aval	Volée Brest (niveau dérèglé);
	Volée Recouvrance : 69 mm.

Un calcul approximatif avait donné une augmentation de flèche de 41 mm. sous le poids mort de renforcement. Les chiffres ci-dessus sont d'ailleurs approximatifs, car le nivellement de 1929 avait été fait sur les trottoirs, tandis que le nivellement de 1936 a été fait sur les semelles des membrures supérieures.

Il est intéressant de comparer les flèches relevées lors des essais de 1861 avec les essais actuels. Nous rappelons que les essais de 1861 avaient été faits avec une surcharge de 200 kilogrammes par mètre carré, trottoirs compris.

Flèche relevée à l'extrémité de la volée Brest, volée Recouvrance seule chargée :

en 1861 : 5 cm.;	en 1936 {	poutre amont : 2 cm. 84;
		poutre aval : 3 cm. 4;

Flèche relevée à l'extrémité de la volée Recouvrance, grande volée Recouvrance seule chargée :

en 1861 : 5 cm.;	en 1936 {	poutre amont : 3 cm. 44;
		poutre aval : 3 cm. 74.

En fait, en 1936, ce dernier essai a été fait sur la volée Brest.

La comparaison de ces résultats montre toute l'efficacité du renforcement réalisé.

Il est intéressant également de noter que l'amplitude maximum des vibrations relevées au passage du convoi, puis du camion de 18 tonnes est très faible: elle atteint à peine 1 mm.

Nous ne parlons évidemment pas des vibrations qui se produisent au passage d'un véhicule d'une volée sur l'autre et dont l'amplitude est nettement plus grande. Nous y avons d'ailleurs remédié depuis dans une certaine mesure en réduisant le jeu des verrous d'extrémité dans leurs logements.

Le dernier essai a donné les résultats suivants :

Flèches sous 2 camions	{	poutre amont : 3 cm. 04;
volées déverrouillées		poutre aval : 3 cm. 28;
Flèches sous 3 camions	{	poutre amont : 3 cm. 12;
volées déverrouillées		poutre aval : 3 cm. 32.

La comparaison de ces résultats avec ceux relevés sous la charge complète d'une volée verrouillée montre l'efficacité du verrouillage central de solidarisation des deux volées.

Les nivellements effectués sur chacun des trottoirs avant les essais et après les essais montrent que les essais n'ont entraîné aucune augmentation de la flèche permanente. Les flèches rémanentes relevées sur les graphiques de fleximètres immédiatement après le déchargement de l'ouvrage, n'atteignaient d'ailleurs pas 1 mm.

La vérification des soudures à laquelle il fut procédé après les essais, ne révéla aucune fissure et l'examen des mécanismes ne décéla aucune trace de fatigue.

IX. DÉPENSES.

Les dépenses se sont élevées à 4.060.000 francs et se décomposent approximativement comme suit :

Réparation et renforcement de la charpente métallique.	2.760.000 Fr.
Platelage, trottoirs et garde-corps.	500.000 —

Renforcement du mécanisme.	200.000 Fr.
Peinture de l'ouvrage.	300.000 —
Aménagement des abords et dépenses diverses.	240.000 —

Le tonnage d'acier rapporté s'élevant à 283.000 kilogrammes, le prix moyen du kilogramme d'acier de renforcement atteint 9 fr. 75 environ.

Ce prix est relativement élevé, mais il serait légitime d'en déduire le coût des soudures effectuées pour réparations de corrosions diverses et exécution de cordons d'étanchéité.

Ces dernières soudures ne sont pas distinguées nettement dans le métré, mais d'un calcul approximatif il résulte que la dépense correspondante s'élève à 285.000 francs environ, ce qui ramène à 8 fr. 75 le prix moyen du kilogramme d'acier de renforcement.

Le cube total de métal déposé par soudure et métré, s'élève à 1.442.517 centimètres cubes. La proportion des différents types de soudure est sensiblement la suivante :

Soudure à plat.	45 p. 100;
— verticale.	14,3 p. 100;
— horizontale.	29 p. 100;
— au plafond.	11,7 p. 100.

Le rendement moyen des soudeurs a été de 41 cm³,3 déposé à l'heure, correspondant sensiblement à la consommation de 10 électrodes de 4 mm. Ce rendement a dépassé très sensiblement les prévisions. En se basant sur les chiffres obtenus sur des chantiers de constructions navales et en tenant compte des sujétions spéciales (manœuvres d'ouverture de l'ouvrage, vibrations au passage des charges) on avait tablé en effet sur une consommation de 7 à 8 électrodes de 4 mm. à l'heure.

La perte par chute du bout inutilisé, projection, volatilisation, soudures non métrées, a été de 29 p. 100 environ, par rapport au poids du métal de l'électrode. La longueur des électrodes était de 450 mm., et il a été utilisé 4 électrodes de 3,25 pour 7 électrodes de 4.

La consommation d'énergie rapportée au kilogramme de métal déposé a atteint 10,5 kwh ce qui est un rendement plutôt faible.

Le prix moyen du centimètre cube de métal déposé ressort à 1 fr. 05 pour un prix du kwh de 0 fr. 60 et un prix d'heure de soudeur de 6 fr. 15. On ne peut se baser d'ailleurs sur ce prix de 1 fr. 05 car il rémunère divers travaux et fournitures qui n'ont rien à voir avec la soudure. >

X. CONCLUSION.

Le procédé de la soudure à l'arc électrique a ainsi permis d'effectuer un renforcement considérable du pont de Brest, puisque le poids mort d'une volée est passé de 742 tonnes avant renforcement, à 980 tonnes après renforcement, soit une augmentation de 32 p. 100.

Les surcharges admises sur l'ouvrage sont passées en même temps de 400 kilogrammes par mètre carré, tolérées avant le renforcement (pour 200 kilogrammes prévus au moment de la construction de l'ouvrage) à $\frac{580 \times 5 + 400 \times 2}{7} = 530 \text{ kg./m}^2$ après renforcement, soit une augmentation de 32 p. 100 environ, correspondant bien au poids du métal ajouté. Ce renforcement a été obtenu malgré les sujétions qui se présentaient et que nous rappelons brièvement :

- nature du métal de base,
- obligation de ne pas interrompre la circulation sur l'ouvrage,
- nécessité de conduire les travaux de façon à permettre à chaque instant les manœuvres d'ouverture et de fermeture du pont (en moyenne quatre par semaine).

Il est intéressant de noter que le renforcement a été obtenu sans changer en rien l'aspect de l'ouvrage.

Avant la réception définitive des travaux qui vient d'être prononcée, nous avons examiné toutes les soudures essentielles et nous n'avons relevé aucune fissure.

Depuis son renforcement, le pont de Brest a donc satisfait à toutes les exigences de la circulation actuelle au point de vue des surcharges et le seul regret que l'on puisse exprimer c'est que sa largeur soit insuffisante au regard du trafic considérable qu'il supporte.

L'étude du projet de renforcement de la charpente métallique a été faite, en accord avec nous-même, par la Société d'Étude pour la Construction et la Réparations des Ouvrages Métalliques et sous le Contrôle du Service Central d'Études techniques du Ministère des Travaux Publics; le renforcement a été exécuté par la Soudure Autogène Française, et le renforcement du mécanisme par les Établissements Schneider.

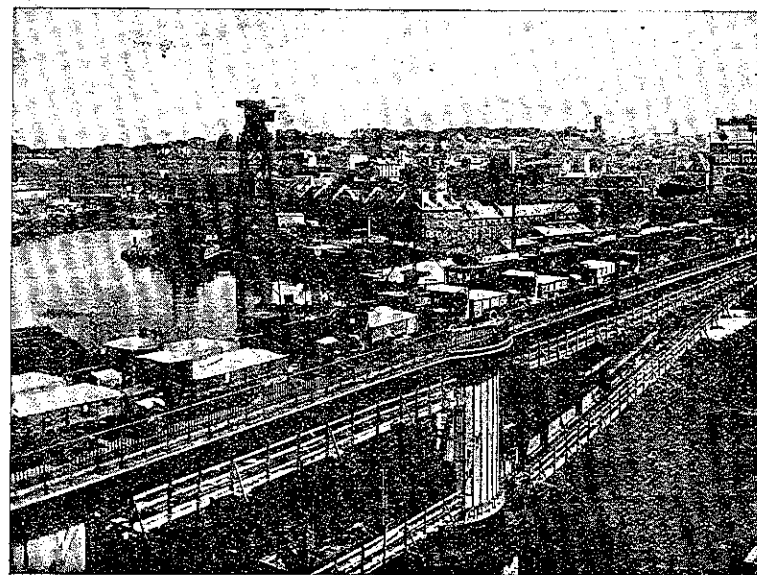


Fig. 22. — Vue de l'ouvrage lors des essais.

Les travaux ont été exécutés sous la haute direction de M. l'Ingénieur en chef CAVENEL; la surveillance du chantier a été assurée par M. PETON, Ingénieur des T. P. E. à Brest avec le concours de M. DELCLEVE, Ingénieur de l'Institut de Soudure Autogène, pour la partie soudure.