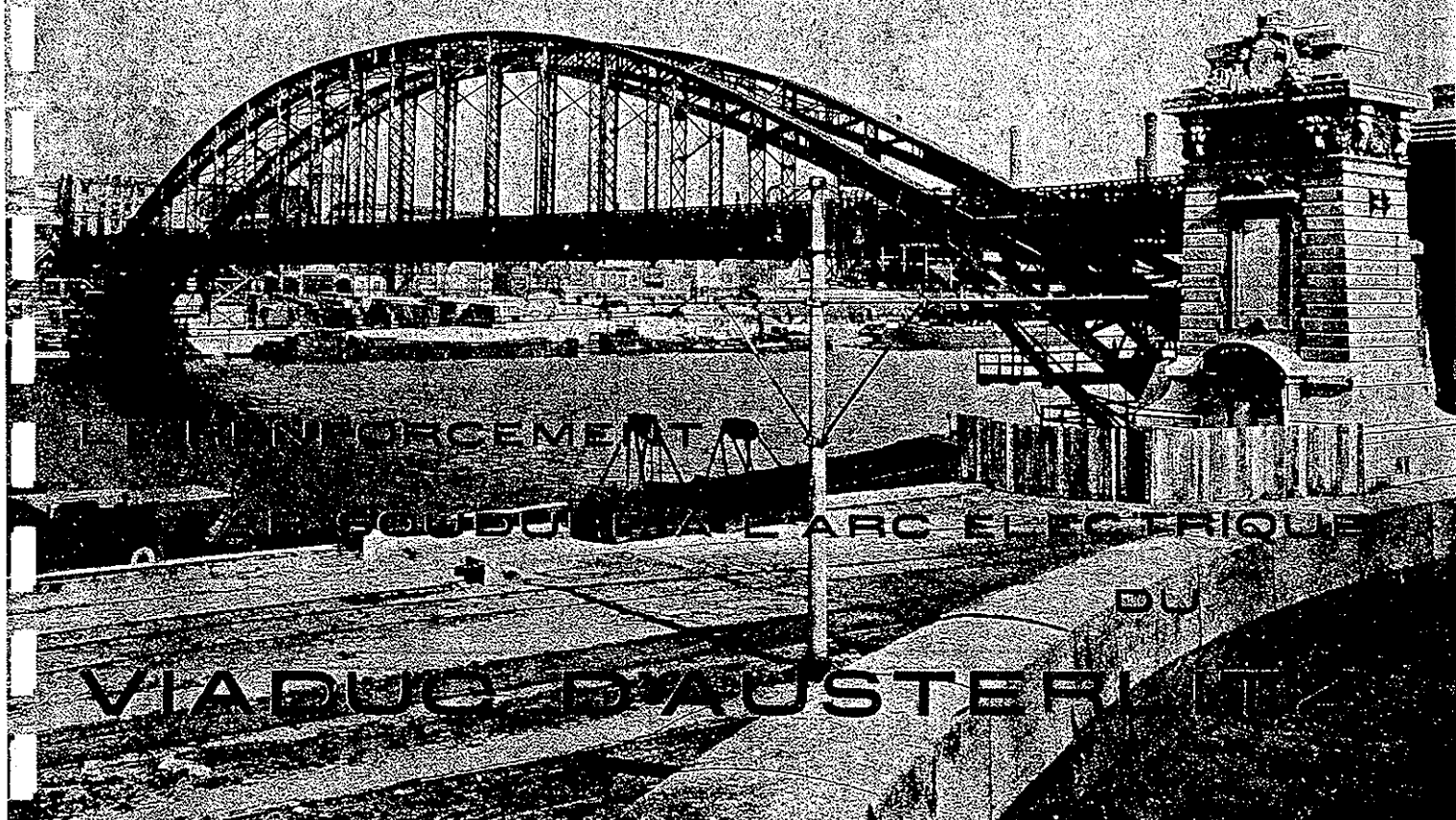


W.R.

CHEMIN DE FER MÉTROPOLITAIN DE PARIS

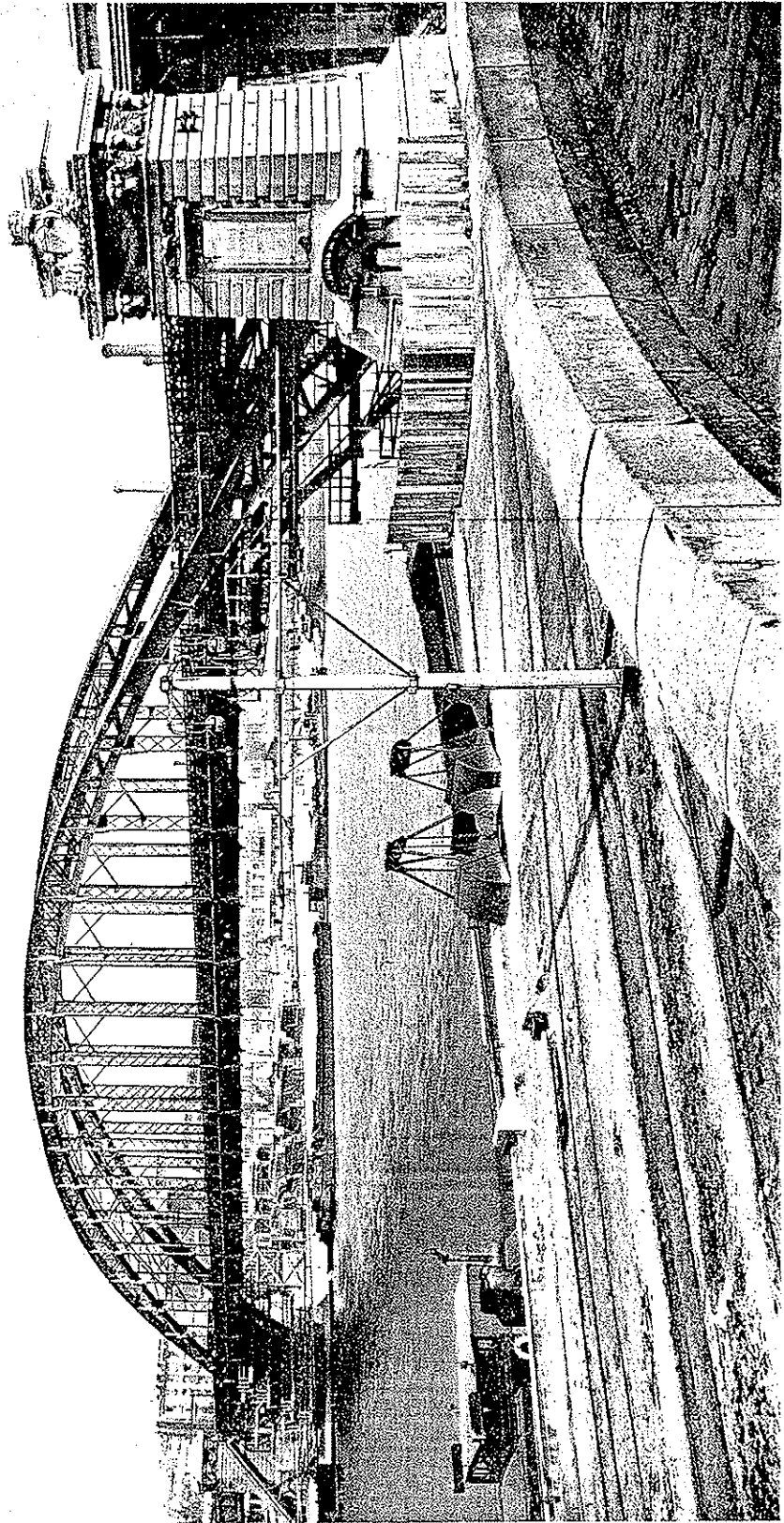


PAR

M. FAUCONNIER

Ingénieur des Ponts et Chaussées,
Directeur des Travaux Neufs
de la Compagnie du Chemin de Fer Métropolitain.

Paris 1939



Le Viaduc d'Austerlitz avant son renforcement

CHEMIN DE FER MÉTROPOLITAIN DE PARIS

●

LE RENFORCEMENT
PAR SOUDURE A L'ARC ÉLECTRIQUE
DU VIADUC D'AUSTERLITZ

●

CONFÉRENCE DE M. M. FAUCONNIER

INGÉNIEUR DES PONTS ET CHAUSSÉES,
DIRECTEUR DES TRAVAUX NEUFS
DE LA COMPAGNIE DU CHEMIN DE FER MÉTROPOLITAIN

AU CENTRE D'ÉTUDES SUPÉRIEURES
DE L'INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES
TRAVAUX PUBLICS

SOUS LA PRÉSIDENTENCE DE M. SUQUET

INSPECTEUR GÉNÉRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES,
DIRECTEUR DE L'ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES

LE 1^{ER} FÉVRIER 1939

●



ALLOCUTION DE M. L. SUQUET

INSPECTEUR GÉNÉRAL DES PONTS-ET-CHAUSSÉES,
DIRECTEUR DE L'ÉCOLE NATIONALE DES PONTS-ET-CHAUSSÉES

Messieurs,

Il est, certes, fort inutile, devant une assemblée de techniciens comme la vôtre, de faire ressortir l'importance que présente, à l'heure actuelle, la soudure dans la charpente métallique; mais il n'est peut-être pas superflu d'insister sur le développement qu'a pris, en France, le procédé de la soudure dans le renforcement des ouvrages existants, car c'est dans notre pays, si je suis bien informé, que cette application si intéressante de ce procédé nouveau a reçu les applications les plus remarquables : je n'en veux pour preuve que le renforcement du grand pont tournant de Brest sur la Penfeld et celui du viaduc d'Austerlitz sur lequel le Métropolitain franchit la Seine.

M. Fauconnier, Directeur des Travaux Neufs de la Compagnie du Métropolitain, est plus qualifié que quiconque pour vous parler de ce dernier travail et cela pour plusieurs raisons :

Tout d'abord, il y a plus de dix ans, alors qu'en raison de la nouveauté du procédé, cela était fort hardi, la Compagnie du Métropolitain a commencé à employer la soudure pour le renforcement de certains de ses ouvrages, déjà d'une certaine importance, comme le pont de la ligne N° 1 sur le canal Saint-Martin.

En second lieu, lorsqu'elle a eu à étendre ce procédé à un ouvrage aussi important que le viaduc d'Austerlitz, la Compagnie du Métropolitain l'a fait de la façon la plus scientifique, en procédant à des essais nombreux qui constituent

les plus précieux enseignements. Qu'il me soit permis, à ce sujet, d'exprimer mes félicitations à M. Fauconnier, car c'est grâce à de tels essais et à de telles études que progressent nos connaissances et notre technique.

Ces félicitations ne sont pas, veuillez en être assuré, un compliment banal, car elles émanent d'un ingénieur qui, ayant eu à étudier le problème du viaduc d'Austerlitz, il y a une douzaine d'années, alors que l'application de la soudure aurait encore paru téméraire, avait dû reconnaître que le renforcement de l'ouvrage par rivure était pratiquement impossible.

J'ai donc éprouvé une véritable joie à constater que la Compagnie du Métropolitain et son éminent Directeur des Travaux Neufs avaient su résoudre ce problème et ce m'est, aujourd'hui, un réel plaisir d'entendre M. Fauconnier vous en exposer les données et la solution.

LE RENFORCEMENT PAR SOUDURE A L'ARC ÉLECTRIQUE DU VIADUC D'AUSTERLITZ DU CHEMIN DE FER MÉTROPOLITAIN

•

MONSIEUR LE PRÉSIDENT,

MESSIEURS,

La ligne n° 5 « Gare du Nord - Etoile » du Chemin de fer Métropolitain de Paris franchit la Seine, non loin du Jardin des Plantes, sur un viaduc métallique de 140 mètres d'ouverture, le viaduc d'Austerlitz (*fig. 1*).

Cet ouvrage, remarquable par la pureté de ses lignes et la hardiesse de sa construction, est un arc parabolique à triple articulation. Les articulations latérales sont disposées à l'extrémité de consoles dont le porte à faux est voisin de 17 mètres. Cette disposition confère au viaduc une élégance certaine, mais se prête mal à une augmentation notable des charges roulantes.

Or, c'est un phénomène commun à tous les réseaux métropolitains, au cours des quarante dernières années, que l'accroissement régulier de la capacité, de la puissance et, partant, du poids des trains.

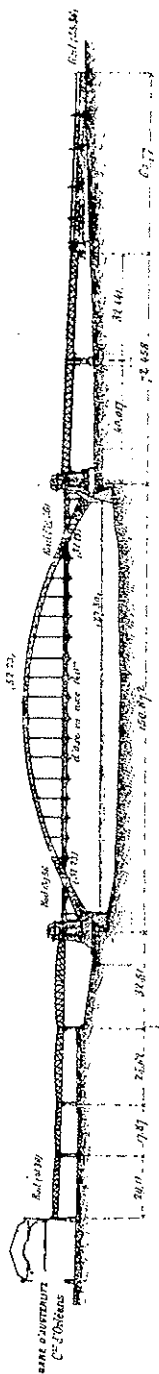
Le viaduc d'Austerlitz avait été calculé en 1903 dans l'hypothèse d'un train léger de 121 tonnes de 50 mètres de longueur. Le train-type du Métropolitain mesure aujourd'hui 105 mètres et pèse 420 tonnes : la surcharge roulante est plus que triplée.

Le renforcement d'un ouvrage sous rail de portée totale voisine de 150 mètres, en service continu, parcouru chaque jour par plus de 700 trains, posait un problème difficile.

Je voudrais, Messieurs, vous donner ce soir un court aperçu de ce travail sans précédent, à ma connaissance, dans le monde entier.

TRAVERSÉE DE LA SEINE EN AMONT DU PONT D'AUSTERLITZ
et Viaduc aux abords

Elevation (1/4000)



Coupe transversale à la clef (1/4000)

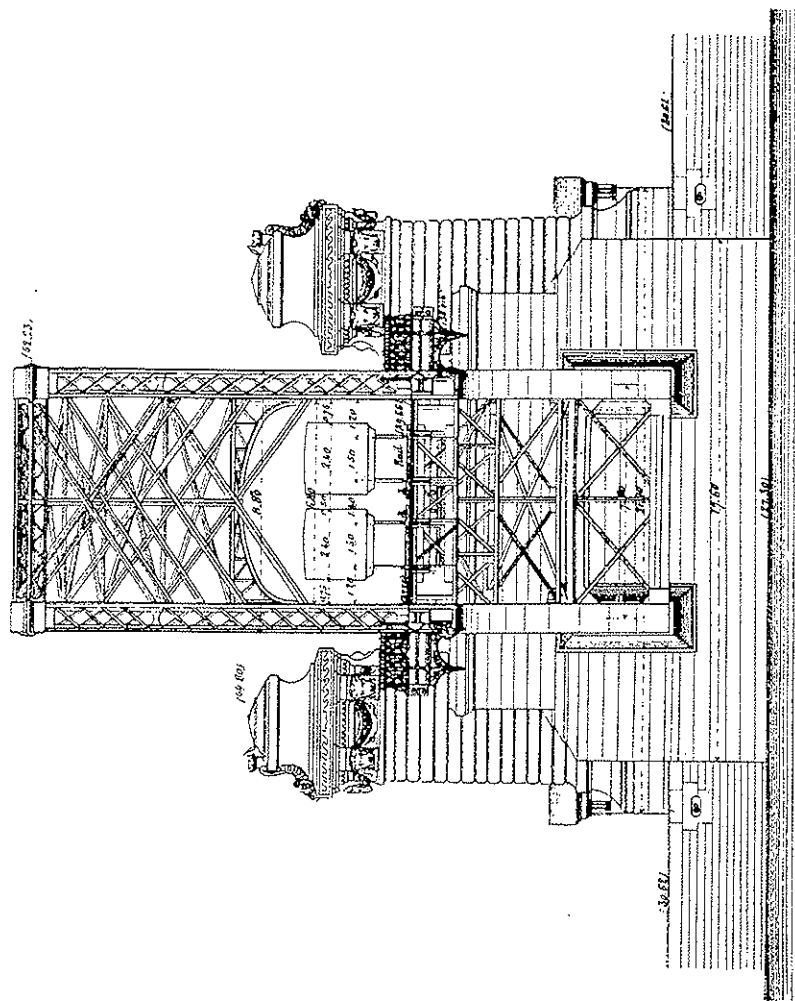


FIG. 1.

I. — DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

Le viaduc d'Austerlitz a été mis en service en 1906. Son ouverture mesure 140 mètres entre appuis sur culées de rive; elle est supérieure à celle de tous les autres ponts existant actuellement à Paris.

L'ouvrage, entièrement métallique, est constitué par deux arcs à triple articulation de 20 mètres de flèche auxquels est suspendu le tablier. L'articulation de clef se trouve à 24 m. 43 au-dessus du plan d'eau normal de la Seine et à 12 m. 17 en contre-haut du rail qui se tient à la cote 39,56. Les deux arcs sont distants de 7 m. 80 d'axe en axe; l'espacement des montants de suspension qui les relient au tablier est de 6 m. 70. Au-dessous de ce tablier le tirant d'air est de 11 m. 33.

Les articulations latérales sont placées, non aux naissances de l'arc, mais aux reins, à un niveau supérieur d'environ 1 m. à celui du rail. L'ensemble d'un arc comprend donc, en fait, quatre tronçons :

— les deux tronçons centraux qui forment l'arc à triple articulation proprement dit;

— les deux consoles solidaires des culées, à l'extrémité desquelles l'arc central vient s'appuyer.

La distance entre les articulations rive droite et rive gauche est de 107 m. 20. L'arc proprement dit a donc une portée inférieure de près de 25 % à celle qu'il aurait eue si les articulations latérales avaient été placées aux naissances, sur les culées.

Le graphique (*fig. 2*) ci-après indiquant la distribution des moments de flexion le long d'un arc, met nettement en évidence les avantages de cette disposition. On sait que, pour un arc à 3 articulations de portée λ , la courbe représentative du moment maximum créé par une surcharge de 1 tonne dans les diverses sections de l'arc, a pour équation :

$$y = x \left(\frac{1}{2} - \frac{2x^2}{\lambda^2} \right)$$

x étant l'abscisse de la section considérée par rapport au milieu de l'arc pris pour origine.

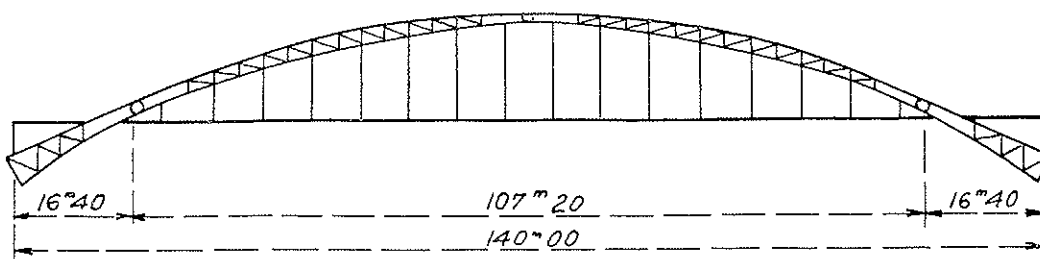
Le moment maximum a lieu lorsque la surcharge se trouve au droit de cette section.

La courbe II correspond à l'arc articulé aux reins, tel qu'il a été réalisé ($\lambda = 107$ m. 20). La courbe III correspond à un arc articulé aux naissances

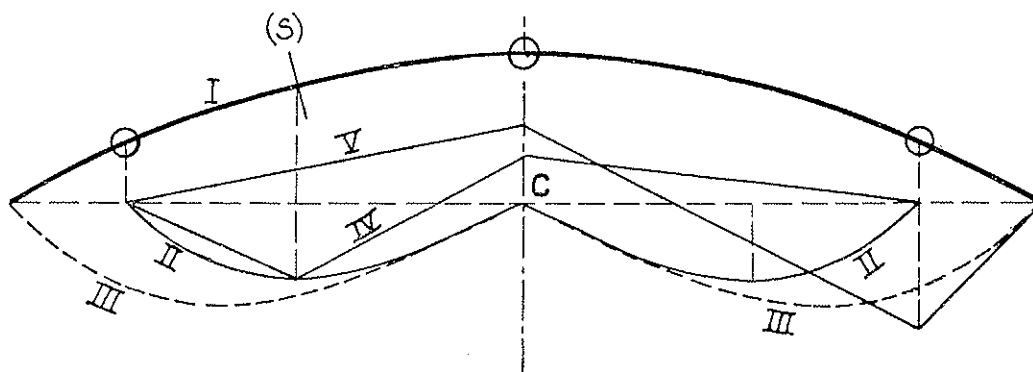
($\lambda = 140$ m.). Ces deux courbes sont d'ailleurs homothétiques, le centre d'homothétie étant C, et le rapport $k = \frac{107,20}{140}$. Il en est de même des lignes d'influence du moment de flexion dans les différentes sections de l'arc.

La réduction des efforts dans l'arc proprement dit a permis d'en alléger notablement les éléments constitutifs.

Par contre, les lignes des pressions correspondant aux diverses positions des convois ne convergent plus à l'appui sur culée comme dans le cas d'une articulation placée aux naissances. Les surcharges produisent au contraire à cet appui un moment de flexion important dont la ligne d'influence est représentée en V sur le graphique (fig. 2), ce qui a conduit à épanouir les retombées vers leur base pour en assurer la stabilité.



Elévation schématique du viaduc d'Austerlitz



- I. — Fibre moyenne de l'arc.
- II. — Courbe représentative des moments maxima créés par la surcharge unitaire dans chaque section de l'arc.
- III. — Même courbe que ci-dessus pour un arc qui serait articulé aux naissances.
- IV. — Ligne d'influence du moment de flexion dans la section (S).
- V. — Ligne d'influence du moment de flexion à l'appui sur culée.

FIG. 2.

Distribution des moments de flexion créés par une surcharge de 1 tonne.

Dans la partie centrale, chacun des arcs se compose de deux fermes en forme de croissant, s'articulant l'une sur l'autre à la clef de l'ouvrage. Ces fermes sont à treillis en N avec montants verticaux, sauf aux extrémités où le treillis est remplacé par une âme pleine; elles sont terminées à chaque bout par une pièce en acier moulé nervée.

La disposition des retombées est semblable à celle des arcs qu'elles prolongent. Elles sont constituées chacune par une ferme à treillis en N portant à sa partie supérieure, à âme pleine, une pièce en acier moulé pour former avec celle de l'arc l'articulation aux reins. A leur partie inférieure, les retombées reposent sur les culées par deux plaques d'appui en acier moulé.

Les deux arcs sont contreventés, dès que la hauteur nécessaire au passage des trains est atteinte, par des entretoisements en croix établis au droit des montants de suspension. Entre ces entretoisements, et dans le plan des membrures supérieures des arcs, règne un contreventement en croix de Saint-André solidarissant ces derniers. De chaque côté de l'articulation de clef, les extrémités des deux demi-arcs se faisant vis-à-vis sont réunies par une entretoise à treillis.

A chaque extrémité du viaduc, les deux retombées sont également entretoisées. Leurs membrures supérieures sont rectilignes; un contreventement en croix de Saint-André, dans leur plan, les relie l'une à l'autre.

Les montants de suspension du tablier sont constitués par des poutrelles en treillis; les plus courts, ceux qui sont voisins des points de croisement du tablier et des arcs, sont articulés.

Les pièces de pont du tablier correspondent aux montants de suspension auxquels elles sont attachées par de forts goussets; elles sont ainsi distantes de 6 m. 70. Ces pièces de pont sont reliées les unes aux autres par quatre files de longerons placés à l'aplomb des rails. Elles sont également reliées par les poutres bordures du tablier dont le but principal est de résister aux efforts horizontaux dus au vent. Celles-ci sont prolongées jusqu'aux culées où elles se terminent par deux pièces en acier moulé ancrées dans les maçonneries.

Le tablier est contreventé, à sa partie supérieure, par des tôles du platelage, et, dans son plan inférieur, par un robuste entrecroisement en croix de Saint-André. Les tôles du platelage et le contreventement ont leurs attaches sur les cornières des poutres bordures et des longerons.

II. — ÉTUDE DU RENFORCEMENT — DISPOSITIONS ADOPTÉES

•

Dans sa consistance primitive, le viaduc a été calculé conformément aux prescriptions de la Circulaire ministérielle française du 29 Août 1891, alors en vigueur. La charge permanente s'élevait à 2.925 k. par mètre courant d'arc, soit près de 820 tonnes au total, tandis que la charge roulante consistait en deux trains-types de 121 T. 2 circulant en sens contraire sur le pont.

En 1931, la Compagnie du Métropolitain a été amenée à s'assurer que le viaduc pouvait supporter la surcharge correspondant à deux trains-types de 185 T. 4. La vérification effectuée révéla que, si la plupart des éléments métalliques (à l'exception des longerons du tablier) étaient susceptibles de supporter, sans renforcement, la surcharge nouvelle, la stabilité générale de l'ouvrage se trouvait compromise pour certaines positions du convoi.

On pouvait envisager un renforcement du viaduc limité aux culées. Cette solution, d'une application difficile, onéreuse, et qui satisfaisait tout juste aux exigences du présent sans ménager l'avenir, n'a pas été retenue. On a préféré reprendre le problème dans un sens plus large, et étudier un remaniement de l'ouvrage assurant le passage du convoi le plus lourd actuellement prévu, le train-type de 420 tonnes qui se compose de sept motrices de 60 tonnes et présente une longueur de 100 m. 95 entre essieux extrêmes (planche n° 1).

Un tel accroissement de charges impliquait la rupture de l'équilibre des retombées. Celles-ci, en effet, bien que possédant à leur partie supérieure un tirant horizontal constitué par la poutre-bordure du tablier ancrée dans la maçonnerie de la culée, ne pouvaient travailler dans des conditions satisfaisantes de sécurité qu'à la compression, ce qui exigeait que, pour une surcharge donnée, la courbe des pressions relative à un arc restât dans le tiers central des appuis sur culées de ses retombées. Il n'était pas douteux, d'ailleurs, que l'intervention des poutres-tirants du tablier dans la résistance générale du pont ne fût à éviter, puisqu'elle impliquait un effort horizontal exercé à la partie supérieure des pylônes en maçonnerie. La circulation des trains sur le viaduc étant intense, on faisait naître dans les maçonneries des efforts alternés dont la répétition serait devenue vite dangereuse. On ne disposait plus du coefficient de sécurité prévu à l'origine.

Il importait, par ailleurs, que le mode de renforcement choisi n'entraînât aucune interruption ou perturbation notable du trafic, aucun affaiblissement de la résistance de l'ouvrage au cours des travaux. L'aspect du viaduc ne devait pas être sensiblement modifié. Cette triple exigence conduisait à écarter divers

procédés de renforcement dont les uns comportaient des modifications trop importantes des arcs et les autres des dérivetages préalables qui auraient affaibli l'ouvrage.

La solution brutale qui consistait à reconstruire purement et simplement le viaduc à son emplacement actuel ne fut pas davantage retenue. Outre le prix élevé d'un ouvrage neuf, il eût fallu, pour exécuter un tel travail, soit interrompre la circulation des trains, ce qui était inacceptable, soit assurer leur passage au moyen d'une passerelle provisoire, opération difficile, pleine d'aléas et très coûteuse.

Finalement, le mode de renforcement adopté a été le suivant :

a) Augmentation, dans une proportion dépassant 60 % de la section résistante de tous les éléments faibles de l'ouvrage, à l'aide de tôles ou de profilés fixés par soudure à l'arc électrique.

b) Rétablissement de la stabilité des retombées par fixation, sous la membrure inférieure de chacune d'elles, d'une charpente complémentaire préparée à l'avance et mise en place d'une seule manœuvre; cette charpente repose sur un appareil d'appui spécial, la réaction correspondante étant réglée par vérins.

c) Renforcement des culées par l'exécution, du côté de la rive, d'un massif en béton armé et, du côté du fleuve, d'un ceinturage en béton armé formant lisse et supportant les nouveaux appareils d'appui.

Pour assurer la fixation de l'acier rapporté sur l'acier de l'ossature existante tout en conservant intégralement les éléments de résistance de l'ouvrage primitif, le choix de la soudure à l'arc électrique s'imposait. Il était en effet difficile, sinon impossible, d'opérer par rivetage sur la plupart des éléments à renforcer sans troubler gravement leur état d'équilibre. Le percement de trous de rivets dans des tôles soumises à des efforts importants, la suppression des rivets existants, auraient compromis dans de fortes proportions la résistance d'un ouvrage aussi important, soumis à une circulation intense, et que l'on ne pouvait songer à remettre sur cintres ni à étayer. La soudure à l'arc, en outre, se prête à l'exécution facile d'assemblages qu'il serait impossible de réaliser par rivetage et offre un avantage certain au point de vue de la conservation des pièces, l'étanchéité à l'eau des joints soudés étant absolue.

L'état actuel de la technique de la soudure, s'il impose encore une certaine prudence dans la conception, du fait de la naissance d'efforts secondaires assez mal connus, a permis toutefois, au prix d'un choix judicieux du métal rapporté et des électrodes, ainsi que d'une surveillance constante et rigoureuse de l'exécution, de mener à terme avec plein succès un travail de cette importance.

III. — CARACTÉRISTIQUES DU MÉTAL DU VIADUC D'AUSTERLITZ

CHOIX DU MÉTAL DE RENFORCEMENT

•

A. *Métal de base.* — Le cahier des charges de 1903 imposait, pour l'acier du viaduc, les caractéristiques mécaniques suivantes :

Résistance à la rupture (R) : 42 à 45 k/mm²

Allongement (A %) : 20 à 22 %.

ce qui laissait présumer que l'on avait affaire à de l'acier doux.

Il convenait cependant de vérifier que l'acier employé était, de par sa composition chimique, un acier soudable, condition essentielle à l'emploi du mode de renforcement envisagé.

Diverses analyses et examens micrographiques d'échantillons de métal prélevés sur le viaduc ont montré que l'on se trouvait en présence d'un acier Martin extra-doux dont la composition chimique était sensiblement celle indiquée ci-après :

C	= 0,09 %
Mn	= 0,36 %
Si	= 0,01 %
P	= 0,06 %
S	= 0,04 %

Avec de telles caractéristiques, la soudabilité ne faisait plus de doute.

B. *Métal de renforcement.* — Le choix du métal sur lequel on porte l'arc électrique est absolument essentiel en matière de construction soudée. Aussi a-t-il fait l'objet d'un examen particulièrement attentif.

Une première considération pouvait faire pencher ce choix en faveur d'un acier à haute résistance, du type Ac 54. Les taux de travail admissibles, fixés par les Règlements français à 13 et 14 k/mm² pour les aciers de construction ordinaires, sont portés, en effet, dans ce cas, à 18 et 19 k/mm². A effort égal, les sections utiles peuvent donc, en principe, être réduites dans le rapport 14/19, ce qui est loin d'être négligeable. Pour le viaduc d'Austerlitz, l'économie théorique eût été de quelque 60 tonnes.

En fait, cette considération, qui pourrait être déterminante dans le cas d'un ouvrage neuf, semble bien dépourvue d'intérêt pratique dans le cas d'un renforcement.

A partir du moment où l'acier de renforcement est associé par soudure à celui du viaduc, les deux métaux participent, en effet, aux mêmes déformations et subissent, par conséquent, les mêmes contraintes élastiques, le module d'Young étant le même pour les deux. Or, le métal existant ne pouvant travailler à un taux supérieur à 14 k/mm^2 , il importait peu que le métal ajouté soit, ou non, capable d'une résistance de 19 k/mm^2 dont on savait d'avance qu'elle n'aurait pas à intervenir. Des essais ont établi par ailleurs que, dans une section renforcée, la fatigue du métal ajouté demeure toujours inférieure ou au plus égale, à celle du métal existant.

Une résistance mécanique élevée n'apparaissant pas nécessaire pour le métal de renforcement, le choix d'un acier autre que l'acier extra-doux n'aurait pu se justifier que par une aptitude plus grande à la soudure.

Or, cette aptitude dépend d'un certain nombre de qualités intrinsèques du métal qui sont :

- la soudabilité,
- la ductilité,
- la non-fragilité.

Il est à remarquer que ces qualités s'apparentent étroitement. Elles dépendent de facteurs communs qui sont, d'une part, la composition chimique élémentaire, d'autre part, la constitution physico-chimique et la structure, qui définissent, selon l'expression de M. PORTEVIN, « l'architecture interne » du métal.

Je reviendrai plus loin sur la composition chimique élémentaire de l'acier finalement choisi. Il faut souligner dès maintenant qu'il est d'expérience courante que la teneur optima en carbone pour un acier soudable se situe aux environs de $0,10 \%$. La teneur en carbone de l'acier type 54, qui s'établit normalement entre $0,20$ et $0,25 \%$, ne saurait donc faire envisager avec faveur, *a priori*, le choix de cette nuance d'acier.

Il y a plus.

En matière de constructions soudées, le développement de tensions résiduelles est un phénomène qui est loin d'être négligeable. Le mécanisme de la naissance de ces tensions est bien connu. L'élévation de température considérable due à l'arc électrique et sa localisation font que le métal à fixer par soudure (comme d'ailleurs le métal de base), amené à l'état pâteux, devient le siège de dilatations, puis de contractions, donnant naissance à des écoulements plastiques, bientôt contrariés par le refroidissement. Les déformations géométriques cessant de s'effectuer librement, soit de ce fait, soit du fait de liaisons quelconques, il subsiste dans la pièce des tensions de retrait dites *résiduelles*. Si le métal ne présente pas une ductilité, *à chaud* comme *à froid*, élevée, ces tensions pourront se libérer sous forme de cassures ou de fissures.

J'ajoute dès maintenant que la ductilité des soudures dans une construction finie est particulièrement importante parce que les tensions résiduelles, qui atteignent souvent la limite élastique, ne peuvent être éliminées, lors de la première application de la charge, que par la déformation plastique.

En ce qui concerne le viaduc d'Austerlitz, il convenait de prévoir, en plus de l'existence de tensions internes dans les assemblages soudés et leur voisinage, des répartitions inégales de fatigue entre les éléments existants et ceux de renforcement. La *ductilité* de l'acier se présentait donc comme un critérium de sécurité, avant la résistance.

Aussi bien, la tendance actuelle, comme en témoignent de récents travaux, tels que ceux poursuivis par le Docteur Fritsche, en Allemagne, est-elle d'attacher une grande importance aux propriétés plastiques de la matière, bien que la résistance des matériaux n'en fasse pas état. Il faut se pénétrer de cette idée que l'écoulement joue un rôle décisif dans toutes les questions relatives à la sécurité des constructions en acier.

Je ne crois pas sortir de mon sujet en ouvrant ici une courte parenthèse sur le processus de l'écoulement dans un milieu tel que l'acier.

Une explication satisfaisante de la formation des couches d'écoulement ne peut être formulée qu'en tenant compte de la structure de la matière. Or, à ce point de vue, l'acier de construction est constitué par un agglomérat irrégulier de ferrite, ou fer α pur, et de perlite, composé eutectoïde de ferrite et de cémentite (carbure de fer Fe_3C). Les cristaux de ferrite sont aptes à se déformer, cependant que les cristaux de cémentite sont durs et cassants.

Le Professeur Fritsche de Berlin, par une figure ingénieuse, compare l'acier, dans cet état, à de l'argile fine et plastique. L'argile est constituée par de fines particules rocheuses (silicates d'alumine, etc.) enrobées d'eau. Ces particules jouent un rôle analogue aux lamelles de cémentite, cependant que l'eau de constitution évoque la ferrite plastique. Cette eau constitue le milieu porteur de l'argile. Ses déplacements sont contrariés par les particules rocheuses qu'elle enserre.

De même, les déformations permanentes de l'acier résultent de la possibilité pour les cristaux de ferrite de s'orienter en couches minces d'écoulement. Les lamelles dures et cassantes de cémentite s'opposent tout d'abord à tout glissement notable de la ferrite qui les entoure : c'est la période élastique du phénomène. Leur rupture permettra seule à l'écoulement de s'amorcer, puis de se développer.

Il pourra se faire qu'une teneur élevée en cémentite ou une hétérogénéité de structure marquée (inclusion de cristaux de moindre résistance, impuretés, structure à gros grains) s'oppose à la formation de couches d'écoulement. A l'extrême, l'application d'une charge croissante aboutit directement à la rupture par séparation, après une déformation presque exclusivement élastique. C'est ce qu'on observe pour des aciers de teneur en carbone élevée (supérieure à 0,8 %).

Pour en revenir au cas concret du choix d'un acier de renforcement, il importe de remarquer que les aciéries, dans l'état actuel de nos connaissances métallurgiques, ne peuvent augmenter la résistance d'un acier que par l'incorporation d'éléments spéciaux, tels que le nickel et le manganèse, qui compliquent sa structure et la rendent hétérogène. De ce fait, les possibilités d'écoulement sont réduites et la ductilité abaissée, à chaud comme à froid.

On arrive donc à cette constatation que le choix d'un acier plus tenace que l'acier extra-doux conduit à des difficultés de mise en œuvre dépassant notablement le bénéfice de l'allègement obtenu.

Il n'était pas douteux que, dans le cas examiné, un acier extra-doux ne présentât, du fait de son aptitude aux déformations plastiques, un avantage décisif sur un acier type Ac 54.

La comparaison des deux diagrammes d'extension ci-après est, à cet égard, extrêmement significative (fig. 3).

Un simple examen de ces courbes fait bien ressortir l'intérêt que présente l'emploi de l'acier extra-doux en matière de constructions soudées. On voit, en effet, que, lorsque la limite élastique est atteinte, cet acier est susceptible de prendre, *sans augmentation de fatigue*, des allongements atteignant 1,5 à 2 %. Or ces allongements ont une valeur généralement supérieure aux contractions créées par le refroidissement de la soudure à partir de l'état semi-

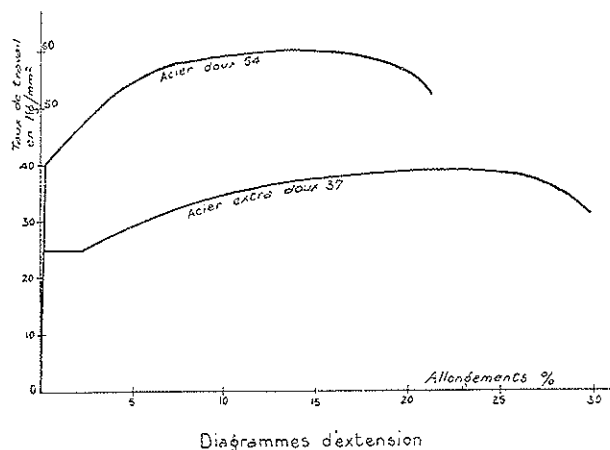


FIG. 3.
Comparaison de l'acier 37 et de l'acier 54.

pâteux et qui sont de l'ordre de 1 %. Grâce à cette faculté de l'acier doux, on pressent déjà que les soudures ne risqueront pas, en pratique, de donner lieu, à aucun moment et en aucun de leurs points, à des tensions internes dépassant la limite élastique.

Certains auteurs, parmi lesquels l'Ingénieur américain G. Fish et le Docteur Kommerell, ont basé sur le diagramme des fatigues en fonction de l'allongement, une théorie de l'écoulement des tensions internes sous l'action des charges extérieures dont il nous a été possible de vérifier expérimentalement le bien-fondé. (Cf. Annexe n° 2.)

Composition chimique élémentaire de l'acier doux de renforcement. —

Il importait que l'acier doux choisi ne contînt qu'en proportions strictement limitées certains éléments tels que le carbone, le manganèse, le silicium, le soufre et le phosphore, dont la présence peut nuire aux qualités finales de l'assemblage soudé.

Le carbone et le manganèse rendent l'acier sensible aux phénomènes de trempe qui résultent de l'échauffement local produit par la soudure et du refroidissement consécutif. L'effet trempant du manganèse paraît d'ailleurs dépendre de la quantité de carbone qui l'accompagne.

Les températures maxima auxquelles sont portés les différents points du métal, s'étagent suivant la position qu'ils occupent par rapport à la soudure, entre la température de fusion (1500° environ) et la température ambiante.

La vitesse de refroidissement, également très variable, dépend de la température atteinte, de la quantité de chaleur mise en jeu et des possibilités qui lui sont offertes de se diffuser vers les régions demeurées froides ; elle peut, dans le cas de cordons de faible volume déposés sur des plaques épaisses, être comparable aux vitesses de refroidissement des pièces trempées à l'eau.

Il est rare que ce régime thermique de la soudure puisse être réglé de manière à éviter que certaines zones de la masse métallique ne décrivent des cycles réalisant les conditions de trempe, à savoir :

1° échauffement à une température suffisante pour que le carbone entre en solution solide;

2° refroidissement à une vitesse égale ou supérieure à la vitesse critique de trempe.

Si l'acier est trempant, les zones en question subissent donc une modification complète de leurs propriétés mécaniques et chimiques du fait de la formation d'une phase particulièrement dure et fragile dénommée *martensite*.

C'est pourquoi on a exigé un métal de renforcement dont la teneur en carbone ne soit pas supérieure à 0,10 %. De même le manganèse a été limité à 0,38 %, car l'élévation de sa teneur abaisse nettement la valeur de la vitesse critique de trempe (dans le rapport de 3 à 1 lorsque le manganèse passe de 0 à 1 %).

Un essai très simple, auquel on ne peut d'ailleurs attribuer qu'une valeur comparative, a permis de constater qu'un acier réalisant les conditions indiquées ci-dessus était effectivement beaucoup moins sensible que l'acier 54 à la trempe produite par soudure.

On a tracé ci-après les diagrammes d'extension de 4 éprouvettes à section rectangulaire de 30 mm. $\times$ 10 mm. dont deux étaient en acier extra-doux et deux en acier 54 (*fig. 4*).

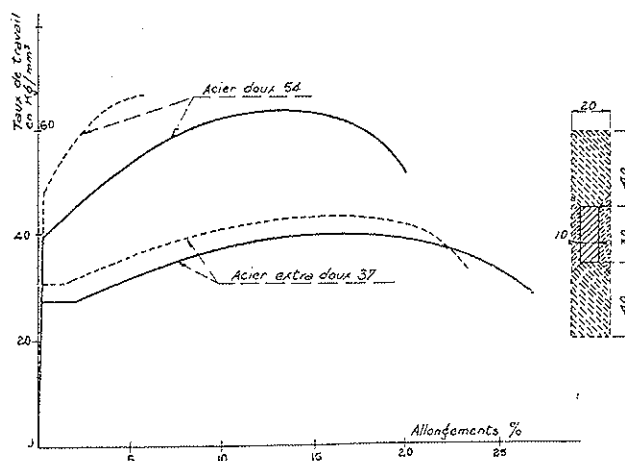


FIG. 4.

Sensibilité de l'acier extra-doux et de l'acier 54
à l'effet de trempe provoqué par la soudure.

Les deux courbes tracées en trait plein ont été obtenues avec des éprouvettes n'ayant subi aucun traitement; les deux courbes tracées en trait pointillé sont relatives à des éprouvettes ayant été soumises par soudure à un même régime thermique.

Dans ce but on avait préparé, pour chacun des aciers à comparer, un prisme rainuré dont la section est figurée à droite des diagrammes. Les cavités ont été ensuite remplies de métal d'apport, puis celui-ci a été enlevé par rabo-

tagé ainsi que les masselottes latérales; on a obtenu finalement deux éprouvettes à section rectangulaire de 30 mm. × 10 mm., composées, l'une, d'acier extra-doux, l'autre, d'acier 54. Le dépôt de métal d'apport ayant été effectué dans des conditions identiques pour les deux pièces, ces deux éprouvettes avaient décrit des cycles thermiques comparables.

Les courbes expriment les changements moyens apportés aux caractéristiques de traction de chacun des deux aciers par la même soudure.

Les modifications, très faibles pour l'acier extra-doux dont les teneurs en carbone et en manganèse n'excèdent pas respectivement 0,10 et 0,38 %, sont au contraire très importantes pour l'acier 54 qui contient ces deux éléments en proportion sensiblement plus forte. La diminution d'allongement constatée pour ce dernier acier est particulièrement importante.

Des essais récents entrepris par le Docteur Kommerell, de la Reichsbahn, en vue d'établir de nouvelles conditions de réception de l'acier 52, à la suite de graves mécomptes observés en Allemagne dans certaines constructions soudées utilisant ce matériau, ont confirmé la tendance à la rempe de cette nuance d'acier.

Les teneurs en carbone et manganèse étant ainsi fixées, la teneur en *silicium* a été limitée à 0,20 %; une teneur supérieure peut en effet avoir une influence défavorable sur la soudabilité.

Le *soufre* et le *phosphore*, dont la présence dans les aciers est toujours très redoutée, ont des effets nuisibles qu'aggrave encore la soudure. Le *soufre* diminue en particulier la plasticité à chaud; par suite, il peut, lorsqu'il est en proportion trop forte, produire au cours de la soudure des fissures ou même des ruptures. Le *phosphore* donne lieu à la formation d'une texture à gros grains dans la zone voisine de la soudure, d'où il résulte une augmentation considérable de la fragilité du métal. Aussi ces deux impuretés n'ont-elles été tolérées qu'à des teneurs très faibles ne dépassant pas 0,04 % pour chacune d'elles, ce qui impose l'emploi d'un produit élaboré au *four Martin*, avec affinage sur sole particulièrement soigné.

En définitive, les conditions exigées pour l'acier de renforcement ont été les suivantes :

Nuance et procédé de fabrication :

Acier extra-doux Martin

— *Composition chimique :*

Carbone	:	teneur au plus égale à....	0.10 %
Manganèse	:	— à....	0.38 %
Soufre	:	— à....	0.04 %
Phosphore	:	— à....	0.04 %
Silicium	:	— à....	0.20 %

— *Caractéristiques mécaniques :*

Charge minimum de rupture par mm ² de section	40 K.
Allongement minimum à la rupture	25 %
Travail minimum de rupture par cm ²	10 kgm
(Epreuve Mesnager)	

En outre, il a été spécifié que, dans le cas où il se présenterait pour certains profilés de grosse section, une incompatibilité entre les conditions chimiques et les conditions mécaniques, ces dernières seules pourraient faire l'objet d'une tolérance qui a été fixée à 38 k/mm² pour la charge de rupture.

Des contrôles rigoureux effectués aux aciéries ont permis de s'assurer que la composition chimique imposée était bien obtenue.

IV. — CHOIX DES ÉLECTRODES

Le souci d'homogénéité qui a présidé au choix de la nuance de l'acier de renforcement a conduit à rechercher un type d'électrode susceptible de déposer un acier dont les caractéristiques mécaniques, et spécialement la ductilité, soient très voisines de celles des aciers à assembler.

Sans doute le métal d'apport n'est-il qu'un produit brut de coulée dont l'allongement et la résilience ne peuvent égaler celles d'un bon acier laminé ayant subi le corroyage. De plus, la très haute température de l'arc électrique, la courte durée de la fusion et de la solidification du métal et enfin la faiblesse de la masse en jeu sont autant de facteurs défavorables qui aggravent encore les difficultés habituellement rencontrées en fonderie.

On arrive cependant aujourd'hui à obtenir un métal d'apport répondant d'une manière satisfaisante aux diverses conditions imposées par la nature des travaux à effectuer.

Pour cela il est indispensable d'employer une électrode enrobée de bonne qualité; le commerce en offre toute une gamme de valeur très inégale. Après des essais comparatifs ayant pour but de déterminer celle qui convenait le mieux, on s'est finalement arrêté à une électrode à enrobage semi-volatil fournissant un métal ductile à forte résilience dont les caractéristiques moyennes sont les suivantes (électrode L 40 de la Soudure Autogène Française) :

Limite élastique	: 33 kgs par mm ²
Charge de rupture	: 47 kgs par mm ²
Allongement	: 21 %
Résilience (Mesnager)	: 13 kgm par cm ²

Cette résilience relativement élevée témoigne de la qualité du métal déposé et indique notamment l'absence complète de nitrures qui sont une cause bien connue de la fragilité des aciers. Le métal en fusion est en effet protégé contre l'action de l'oxygène et de l'azote de l'air par les gaz de combustion de matières cellulosiques contenues dans l'enrobage à raison de 30 % environ.

Le laitier, très friable, s'enlève facilement à la brosse métallique.

La constance de la qualité des électrodes a fait l'objet de vérifications minutieuses au cours des travaux.

On a rapproché (fig. 5) trois diagrammes d'extension correspondant respectivement, à l'acier du viaduc (1903), à l'acier de renforcement et à l'acier déposé par fusion des électrodes. Les deux premières courbes se rapportent à des aciers laminés, la troisième à un acier fondu. Malgré cette différence, leur allure varie peu de l'une à l'autre.

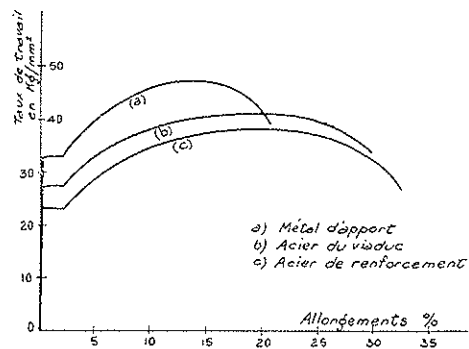


FIG. 5.

Caractéristiques mécaniques moyennes des aciers
constituant un élément renforcé.

On trouvera à l'annexe n° 1, les résultats du micro-examen d'un assemblage soudé dans les conditions normales d'exécution du renforcement du viaduc. L'homogénéité obtenue est particulièrement remarquable.

V. — CALCUL DES ÉLÉMENTS DE RENFORCEMENT

A - *Principe des calculs.* — Le renforcement a été calculé conformément au Règlement français du 10 mai 1927 qui fixe à 13 k/mm^2 (sans vent) et à 14 k/mm^2 (avec vent) les taux de fatigue admissibles.

On a supposé, pour le calcul des fatigues totales, que les sections primitives (avant renforcement) résistaient seules à l'action des charges permanentes et que les sections définitives (renforcées) travaillaient de façon homogène sous l'action des surcharges et du vent.

Cette hypothèse est exprimée, dans le cas de la traction simple, par le diagramme ci-dessous (fig 6). Elle a fait l'objet de vérifications expérimentales concluantes.

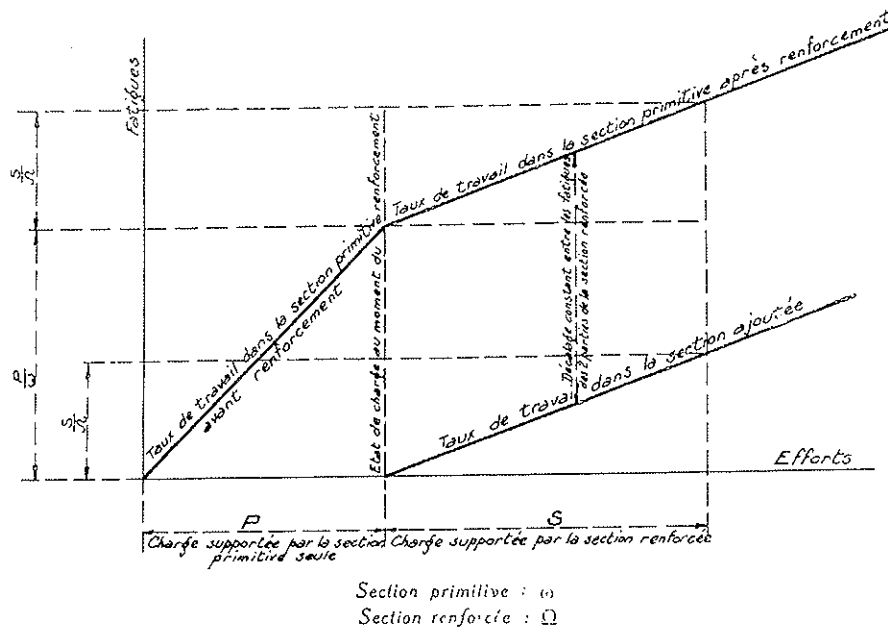


FIG. 6.

Diagramme traduisant l'hypothèse de la répartition des efforts dans une pièce renforcée.

Les sections des éléments de renforcement calculées sur cette base variaient, pour les membrures des arcs, entre 40 et 70 % de la section primitive.

L'hypothèse simplificatrice adoptée peut, en quelques cas, comporter une certaine part d'inexactitude pour le taux de travail du métal ancien. Il ne faut

pas s'en alarmer. Grâce à la ductilité des matériaux assemblés, le métal rapporté qui travaille bien au-dessous de ses possibilités viendra soulager le métal ancien sans que le taux de travail de ce dernier dépasse, au maximum, la limite d'élasticité.

B - *Cordons de soudure.* — Les soudures ont été calculées conformément aux prescriptions de la Circulaire française du 25 juillet 1935.

En particulier :

a) les fatigues admises dans les cordons de soudure sont inférieures à la limite de sécurité admise pour le métal de base, le coefficient de réduction étant de 0,55, 0,75 ou 0,85 suivant la nature des efforts et le type de soudure;

b) pour tenir compte de la variation rapide des efforts dus aux charges roulantes, les cordons de soudure sont calculés pour supporter une fatigue supplémentaire égale à 0,5 ($d'_1 + d'_2$), d'_1 et d'_2 étant les valeurs absolues des contraintes maxima et minima dues aux surcharges variables.

Les cordons de soudure à mettre en œuvre pouvaient être répartis en deux catégories, selon leur mode de travail :

1° Les cordons longitudinaux qui s'étendent sur toute la longueur du renforcement pour le solidariser avec l'élément d'ouvrage auquel il est accolé. C'est le cas, en particulier des cordons des renforcements d'arcs.

Ces cordons sont sollicités au cisaillement longitudinal. Le calcul ayant conduit pour eux à des dimensions jugées insuffisantes, il a été procédé à des

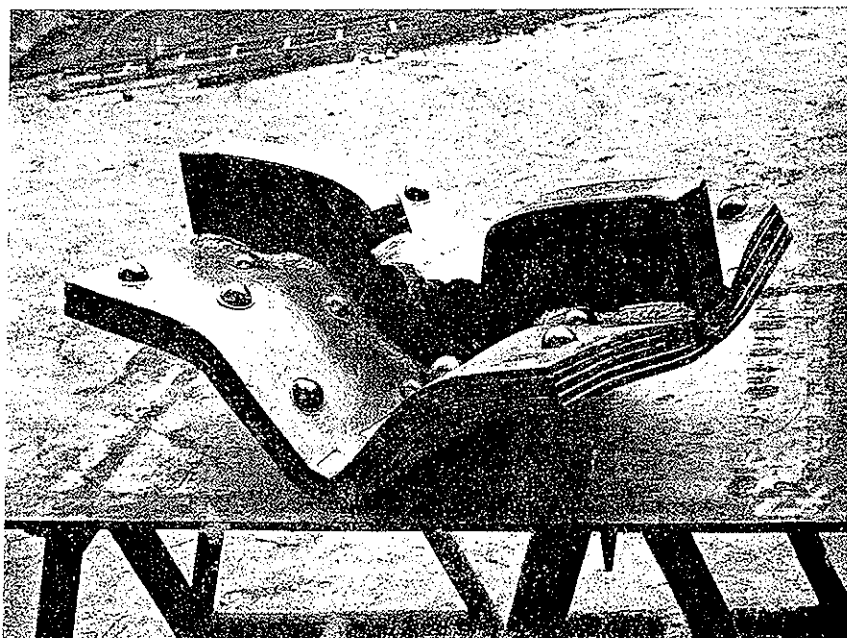


FIG. 7.

*Déformation à la presse, à froid, d'un élément
de membrure d'arc renforcé.*

essais de flexion sur un tronçon de membrure, afin de déterminer pratiquement une section de cordon convenable. Après divers tâtonnements, on s'est

arrêté à un cordon de 14 millimètres, aminci à 5 millimètres au droit des rivets des semelles. La transition est faite graduellement, de façon à éviter toute manifestation du fâcheux « effet d'entaille », particulièrement redoutable dans le cas d'efforts variables.

On voit sur la photographie ci-dessus (*fig. 7*) que ce cordon s'est révélé satisfaisant, puisque des déformations considérables ont pu être atteintes sans que la moindre dissociation se soit révélée entre le bloc rivé et l'élément fixé par soudure.

Il est à noter que cet essai constitue une démonstration intéressante de l'homogénéité que présente l'ensemble renforcé.

2° Une autre catégorie de cordons de soudure jouait un rôle plus important : ce sont ceux qui participent aux assemblages de l'ouvrage et ceux qui unissent deux pièces bout à bout.

Les premiers sont appelés à travailler de concert avec les rivets existants; or, ceux-ci étant déjà en charge sous l'action du poids propre de l'ouvrage, on n'avait pas à craindre de la part du joint rivé un certain glissement qui aurait eu pour effet de reporter sur la soudure (beaucoup plus rigide) la totalité de l'effort; la bonne tenue du joint mixte réalisé était donc garantie par la charge préalable du joint rivé primitif.

Quant aux joints qui unissent deux pièces bout à bout, leur exécution, opérée avec toutes les précautions nécessaires, n'appelle pas d'observations particulières.

VI. — RENFORCEMENT DES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS DE L'OUVRAGE

La planche n° 2 reproduit un dessin d'ensemble du viaduc montrant les renforcements effectués. Je me bornerai à un rapide examen des dispositions prises pour le renforcement des principaux éléments de l'ouvrage.

Arcs. — Les membrures inférieures et supérieures ont été renforcées par l'adjonction de barres à section rectangulaire variant de 70×100 millimètres à 70×140 millimètres, placées entre les files de rivets et soudées sur champ (fig. 8 et 9).

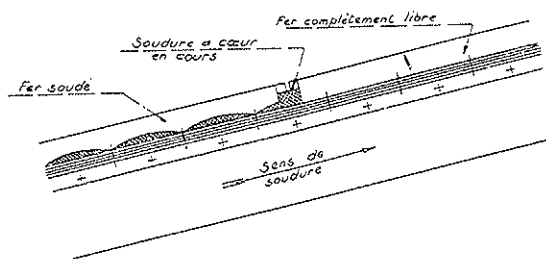


FIG. 8.

Fixation des barres de renforcement des arcs.

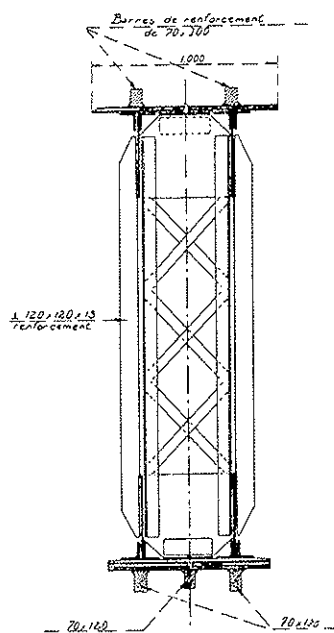


FIG. 9.

Coupe transversale sur un arc.

Il a été nécessaire de procéder à une préparation mécanique très poussée des éléments en place et des éléments à ajouter. Les barres de renforcement, longues de 6 m. en moyenne, présentaient une rigidité transversale importante. De plus, elles étaient livrées brutes de laminage, ce qui ne permettait pas, sans travail préalable, d'assurer entre chacune d'elles et les semelles du viaduc, le contact parfait sans lequel l'homogénéité de l'ensemble renforcé ne pouvait être obtenue.

Ce résultat a été atteint de la façon suivante :

a) On a commencé par meuler les semelles à l'emplacement des barres de renforcement pour assurer, dans le sens transversal, une portée parfaitement plane. Cette opération a été réalisée à l'aide de machines à meuler spécialement étudiées pour cet usage.

b) On a levé ensuite les gabarits donnant le profil en long des zones meulées. Chacun de ces gabarits était constitué par une bande de tôle de 5 m/m. d'épaisseur, découpée à la demande, et boulonnée sur un ensemble indéformable à treillis.

c) Les barres ont été ensuite cintrées à la forge et fraisées en atelier suivant les indications des gabarits.

Après ces opérations, les barres de 6 mètres se sont appliquées sur les semelles sans aucune retouche, la tolérance admise étant de 0 m/m 5.

En ce qui concerne le treillis des arcs, les montants et les diagonales ont été renforcés à l'aide de fers T. Pour assurer une bonne liaison avec les membrures, les ailes des T ont été grugées à leurs extrémités et l'âme soudée sur l'âme de la membrure (fig. 9).

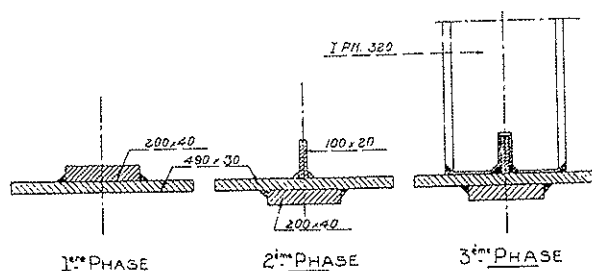


FIG. 10.

Exécution des charpentes des retombées.

Retombées. — Les charpentes complémentaires des retombées devaient primitivement être construites en usine et livrées sur le chantier pour le mon-

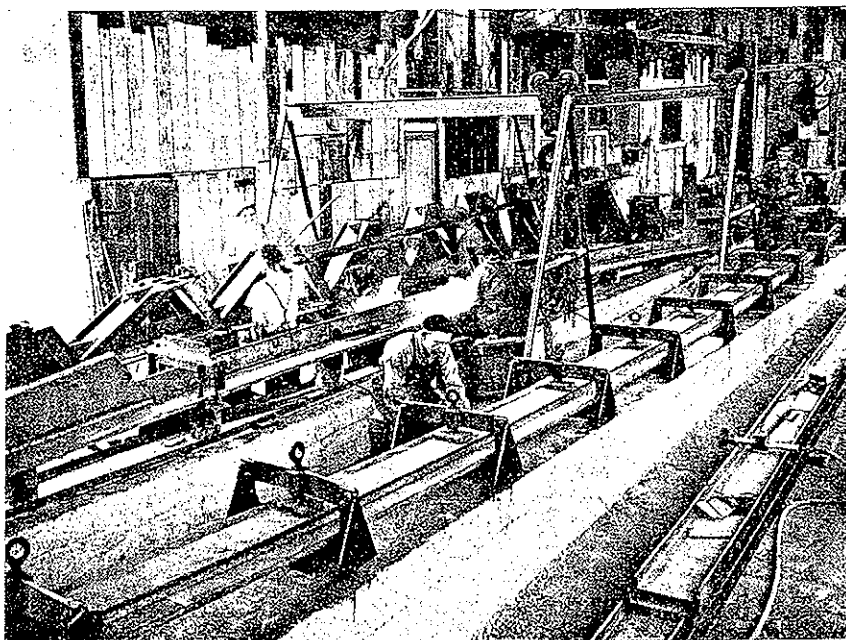


FIG. 11.

Construction des charpentes complémentaires des retombées.

tage. Les difficultés de manutention et surtout de contrôle de la courbure (ces charpentes devant s'ajuster aussi exactement que possible sur l'intrados des

retombées) firent renoncer à cette solution et la construction fut effectuée sur la berge de la Seine au pied du Viaduc.

L'exécution de ces charpentes comportait trois phases (*fig. 10 et 11*) :

- 1° courbure et assemblage des semelles entre elles;
- 2° soudure de l'âme verticale;
- 3° pose des treillis.

Les pièces terminées étaient vérifiées sur un gabarit reproduisant exactement la courbure du pont, puis jumelées pour le montage.

Cette opération est représentée par la *figure 12*.

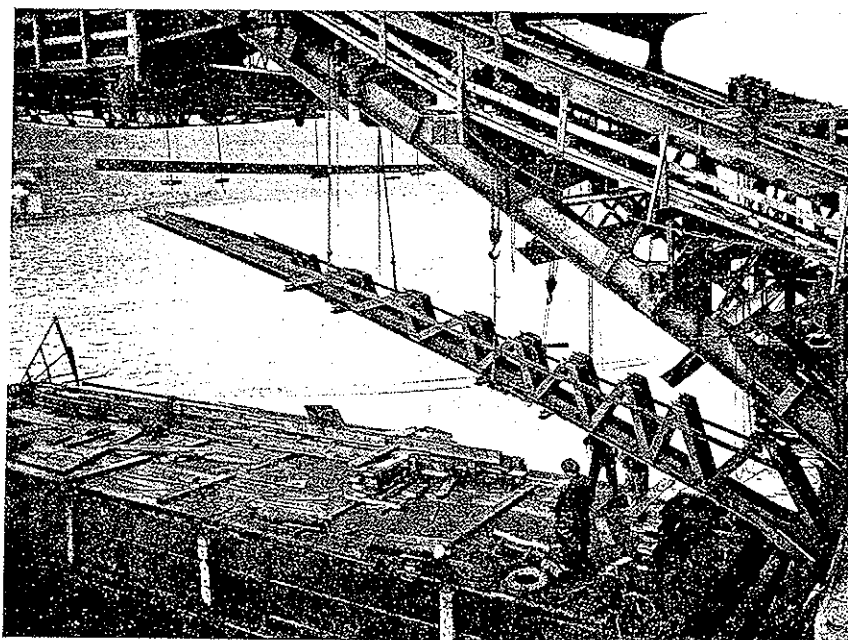


FIG. 12.

Montage des charpentes complémentaires des retombées.

Pendant le levage, toutes précautions étaient prises afin d'éviter la déformation des pièces qui formaient en réalité une sorte de poutre dépourvue de membrure supérieure. Celles-ci étaient ensuite fixées provisoirement à leur emplacement définitif par des jeux de traverses et de tiges filetées jusqu'à la construction de l'échafaudage permettant de les souder définitivement.

Articulation des arcs. — Les articulations des arcs sont constituées par un axe en acier de 150 m/m de diamètre sur lequel se referment deux pièces d'appui en *acier moulé*. Le renforcement de ces pièces étant apparu nécessaire, des prélèvements ont été effectués, en vue de vérifier la soudabilité du métal.

L'analyse chimique ayant indiqué une forte teneur en carbone et manganèse, indice d'une soudabilité douteuse, on n'a pas voulu porter l'arc électrique

sur des pièces vitales pour l'ouvrage sans s'assurer au préalable que leur renforcement était absolument indispensable.

Le calcul ne pouvant donner que des résultats incertains, en raison de la répartition complexe et inconnue des efforts dans les nervures, il a été décidé de procéder à des essais sur modèles réduits.

Un premier essai d'écrasement à la presse de 2.000 tonnes a été réalisé sur un modèle à l'échelle demi-grandeur (fig. 13). Ce modèle comportait, outre

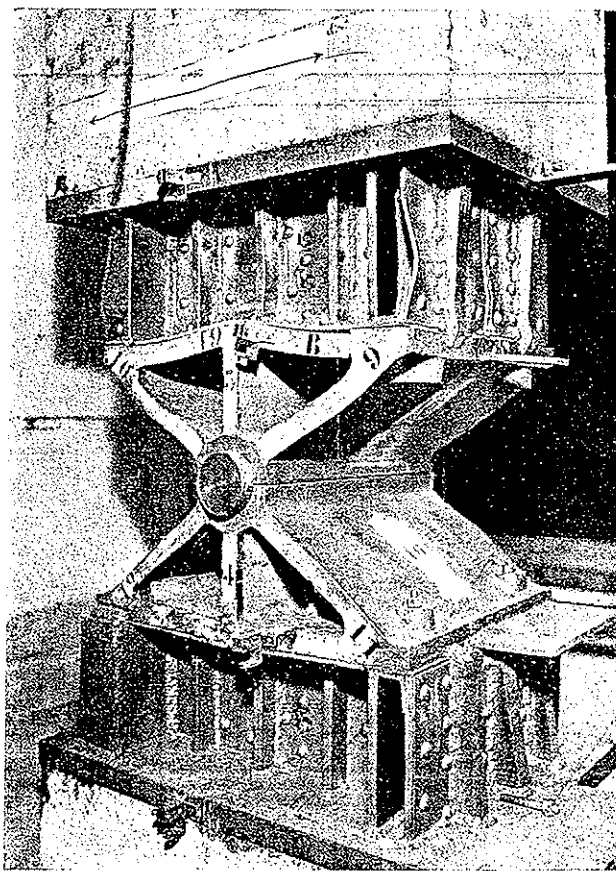


FIG. 13.

Renforcement des articulations.
Premier essai : Ensemble de la pièce après rupture.

l'articulation à essayer, un tronçon d'arc et un tronçon de retombée avec les renforcements prévus pour ces éléments.

Les mesures faites mirent en évidence :

— pour la pièce d'appui, un écrasement faible dans le plan de symétrie passant par la rotule, et important sur les bords;

— pour les tronçons d'arc, un écrasement important dans la région centrale et faible sur les côtés.

La rupture s'est produite sous une charge de 1.250 tonnes, correspondant à un coefficient de sécurité théorique de 4,25.

La *figure 14* montre que, dans la pièce d'appui, la nervure centrale ne travaille pas de façon satisfaisante, en raison de la faiblesse des éléments d'arc lui transmettant les efforts.

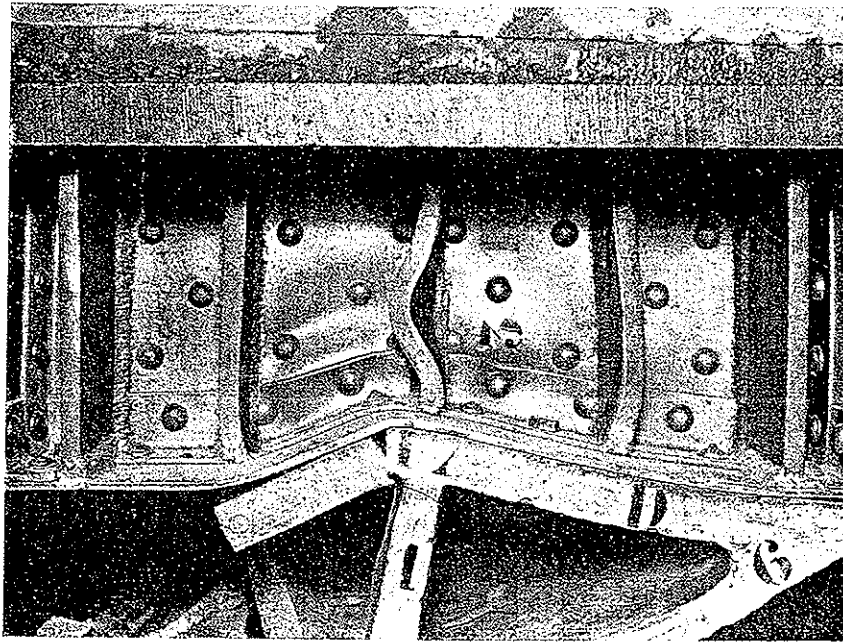


FIG. 14.

Renforcement des articulations.
Premier essai : Etat du tronçon d'arc après rupture.

Après de nouveaux essais en vraie grandeur, on a finalement adopté le dispositif de la *figure 15*. Les pièces de renforcement des membrures destinées à reporter une partie des charges sur la nervure centrale de la pièce d'appui sont constituées par des tôles de 60 millimètres découpées en forme d'A et fixées sur leur pourtour par des cordons d'angle de 12 millimètres.

De ce fait, le renforcement de la pièce d'appui en acier moulé a pu être évité.

Eléments du tablier. — Les longerons et pièces de pont ont été renforcées par la fixation de semelles sous leur membrure inférieure (semelle de 200×8 millimètres pour les longerons et de 40×40 millimètres pour les pièces de pont) et par soudure de leur membrure supérieure à la tôle de platelage jouant désormais le rôle de semelle (*fig. 16*).

Cette tôle présentait toutefois un joint de montage dans l'axe de chaque longeron et pièce de pont, ce qui a nécessité la pose de couvre-joints longitudinaux sur tout le platelage, opération délicate qui impliquait le démontage partiel des voies, leur calage provisoire, et n'a pu être exécutée que de nuit pendant le court arrêt du service des trains.

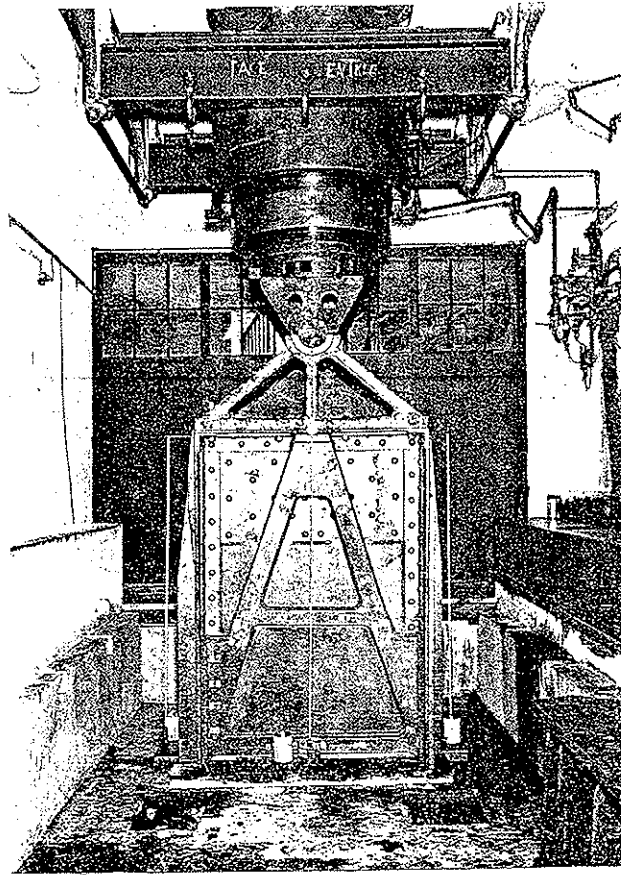


FIG. 15.

Renforcement des articulations.

*Essai définitif : Ensemble de la pièce d'essai
sous la presse de 2.000 tonnes.*

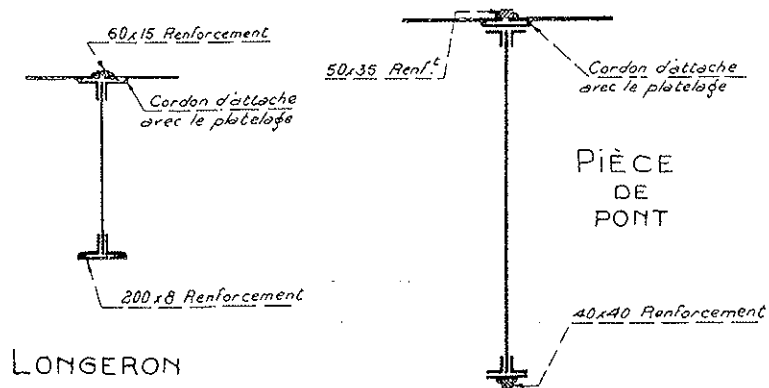


FIG. 16.

*Disposition des éléments de renforcement des longerons
et des pièces de pont.*

VII. — EXÉCUTION DES TRAVAUX

La Compagnie du Métropolitain a confié l'entreprise générale des travaux à la Société « La Soudure Autogène Française ». Cette Société a assuré l'exécution des soudures et la fourniture des électrodes qui ont été fabriquées dans son usine de Pont-Sainte-Maxence, dans l'Oise.

La Soudure Autogène Française a chargé l'Entreprise Boussiron, de Paris, de la construction de l'important échafaudage nécessité par les travaux. L'Entreprise Boussiron a également exécuté les travaux de renforcement des culées.

Echafaudage. — L'exécution de travaux de renforcement, d'une durée d'environ deux ans, sur le Viaduc dont l'exploitation devait se poursuivre sans aucune modification, a nécessité des dispositions propres à assurer la sécurité des voyageurs, des agents de la Compagnie et des ouvriers, ainsi que la conti-

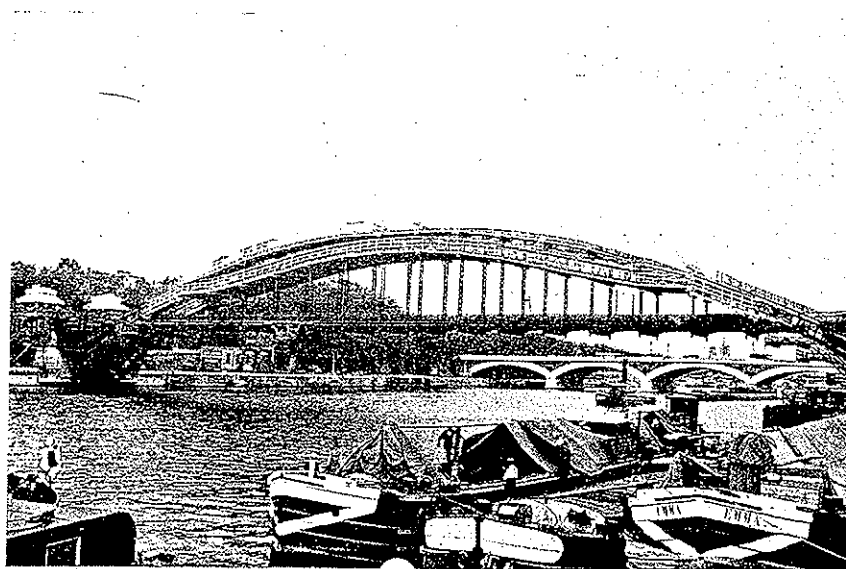


FIG. 17.

Vue d'ensemble des échafaudages.

nuité du trafic. Un accès facile aux diverses pièces à renforcer pouvait seul garantir une exécution correcte des soudures et un contrôle efficace du travail.

Le chantier de soudure ainsi que les dégagements nécessaires à l'approvisionnement des matériaux ont été complètement isolés des voies par un échafaudage général (fig. 17).

Cet échafaudage, accroché à la charpente métallique, se composait essentiellement :

- d'un échafaudage central à deux étages donnant accès aux arcs; à la partie inférieure, un plancher jointif formait masque de protection au-dessus des voies;

- de deux échafaudages partiels établis en gradins sous les retombées;

- d'un échafaudage roulant destiné au renforcement du tablier;

- enfin, de nacelles coulisant le long des suspentes, entre le tablier et le plancher inférieur de l'échafaudage central.

Ce dernier a été monté entièrement de nuit pendant l'interruption du service des trains et complètement ignifugé.

Des tours en bois assuraient l'accès direct au viaduc depuis les berges de la Seine où l'entrepreneur avait établi son chantier.

Devant l'importante quantité de bois à mettre en œuvre (environ 500 m³ pour l'ensemble du viaduc), on a décidé, par mesure de prudence, de ne construire l'échafaudage central qu'après mise en place et réglage du renforcement des retombées.

Equipement électrique. — La fourniture du courant était assurée par la Compagnie du Métropolitain, sous forme de continu 550-600 volts, amené au chantier principal par un câble spécial déroulé depuis la sous-station « Bastille » dans le souterrain de la ligne n° 5.

Ce courant était ensuite transformé en continu 60 volts par un groupe moteur générateur, puis distribué tout le long de l'ouvrage par 4 câbles isolés desservant des boîtes de branchement.

Le retour du courant s'effectuait par la masse du viaduc pour le circuit 60 volts, par les rails de roulement pour le circuit 600 volts.

La puissance disponible totale était de 90 kw.

Chaque soudeur disposait d'une boîte de résistance branchée sur les câbles à 60 volts et lui permettant de faire varier l'intensité de 0 à 225 ampères par tranches de 15 ampères, ce qui représente une précision de réglage largement suffisante pour les travaux de grosse charpente où l'on n'emploie guère d'électrodes de diamètre inférieur à 3,25 millimètres.

Des relevés portant sur la durée totale du travail de soudure ont montré que la consommation d'énergie moyenne par soudeur et par journée de travail de 8 heures, était de 52 kwh.

Agrément des électrodes, contrôle de la main-d'œuvre et contrôle au cours des travaux. — Les méthodes qui permettent d'apprécier, après exécution, la qualité d'une soudure demeurent encore incertaines dans l'état actuel de la technique, ou d'une application difficile dans le cas d'un renforcement. C'est ainsi que l'emploi systématique des rayons X se heurtait, ici, à une véritable impossibilité matérielle.

Par ailleurs, s'il est intéressant de connaître les défauts cachés d'un assemblage après *exécution*, il est sans nul doute plus intéressant encore de prendre les mesures propres à prévenir leur naissance.

On a donc considéré que le meilleur garant de la qualité des soudures résidait, toutes précautions étant prises quant à la soudabilité du métal de base

et du métal rapporté, dans le choix de bonnes électrodes et de bons soudeurs. Il a donc été institué un contrôle préalable très strict d'agrément et des contrôles en cours d'exécution.

La réception des électrodes, en premier lieu, était prononcée à la suite d'essais mettant en évidence pour le métal d'apport des caractéristiques mécaniques satisfaisant aux conditions imposées (résistance à la rupture, allongement, résilience). A cet effet, des éprouvettes de traction et de résilience étaient prélevées dans des barreaux constitués *uniquement* par le métal provenant de la fusion des électrodes à agréer.

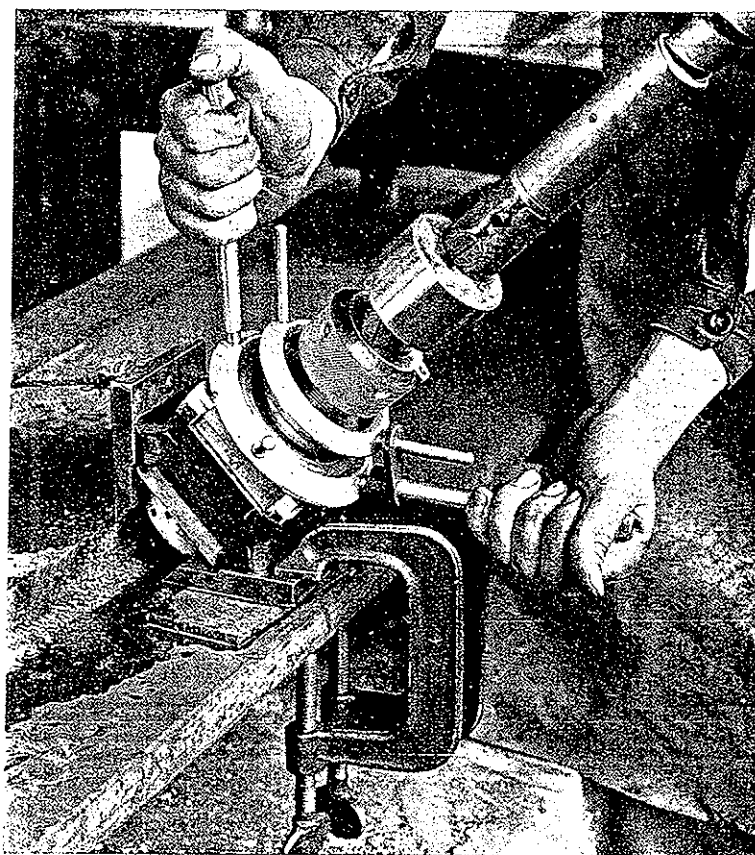


FIG. 18.

Appareil de Schmückler pour le contrôle des soudures par fraisage.

En ce qui concerne le personnel, aucun ouvrier soudeur n'a été admis à coopérer au travail sans avoir subi avec succès une épreuve de qualification. Cette épreuve a toujours été exécutée sur le chantier dans les conditions normales que le soudeur devait trouver par la suite pour son travail effectif.

L'essai, choisi à dessein aussi simple et concluant que possible comportait la soudure à cœur en V, avec reprise par en dessous, de deux éléments de tôle de 8 millimètres dans lesquels on prélevait ensuite une éprouvette de traction et deux éprouvettes de pliage.

Un premier essai était exécuté à plat, un deuxième au plafond.

A la suite de cette épreuve, il était établi pour chaque ouvrier soudeur agréé une fiche individuelle indiquant les résultats obtenus et recevant ultérieurement l'indication des résultats des contrôles exercés en cours de travaux.

Ces contrôles étaient exécutés d'une façon identique pour l'ensemble du personnel soudeur tous les six mois.

En outre certains ouvriers ont été contrôlés entre temps, à la suite de l'exécution de cordons dont l'aspect laissait supposer un défaut.

Contrôle après exécution. — La concordance des soudures avec les plans de détail (position, longueur, section) a fait l'objet de vérifications régulières.

En tous les points des soudures laissant apparaître un défaut, et à intervalles réguliers dans les cordons d'aspect sain, des sondages ont été effectués à l'aide de l'appareil à fraiser de Schmückler.

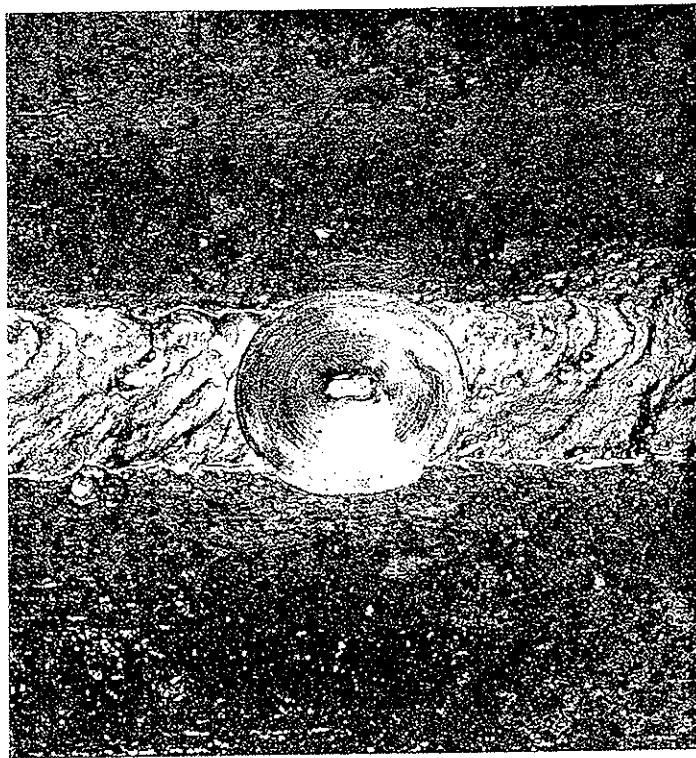


FIG. 19.

Fraisage exécuté avec la machine de Schmückler.

Cet appareil (fig. 18), d'un maniement facile, produit, à l'aide d'une fraise rotative à mouvement réglable des entailles semi-côniqes telles que celle représentée ci-après (fig. 19). Un dispositif spécial permet d'entailler aussi bien un cordon d'angle qu'une soudure à cœur.

L'examen des parois de l'entaille était précédé d'une attaque par une solution d'acide azotique dilué à 20 %.

Ce procédé de contrôle donne de bonnes indications sur la contexture

de la soudure. Il met en évidence les défauts intéressant la masse du dépôt (scories, inclusions, etc.), la profondeur de pénétration dans le métal de base, la bonne ou la mauvaise fusion à la racine.

Combiné avec de sévères épreuves de qualification de main-d'œuvre, le procédé de Schmückler nous paraît fort intéressant pour un contrôle volant de chantier. Sa mise en œuvre est économique et ne nécessite pas l'emploi de spécialistes. En outre, il donne sur l'état interne de la soudure des renseignements positifs qui ne sauraient être discutés par l'Entreprise.

Je suis arrivé, Messieurs, au terme de cette description que j'aurais voulu plus courte et qui, cependant, demeure sur bien des points trop schématique, des travaux de renforcement du Viaduc d'Austerlitz.

Le nom de cet ouvrage restera attaché, en France, aux fastes de ce magnifique outil moderne qu'est la soudure à l'arc électrique.

274.800 k. d'acier, soit plus du tiers du poids primitif du viaduc, fixés par 1.490.000 cm³ (*) de soudure déposés sur un ouvrage en service parcouru chaque jour par 700 trains : ces chiffres suffiraient à évoquer l'importance du travail qui vient d'être réalisé dans des conditions de sécurité incomparables.

Ce beau résultat a été obtenu au prix de soins patients; rien n'a été négligé pour s'entourer des garanties d'exécution les plus sévères.

Les matériaux mis en œuvre, l'acier 37, matériau souple et ductile, l'électrode L 40 de la Soudure Autogène Française demeurent cependant, par leurs qualités précieuses, les véritables artisans de notre réussite. J'en ai, Messieurs, l'intime conviction.

(*) Le cube total de métal déposé par soudure s'est élevé à 1.490.000 cm³, dont 1.277.000 pour les travaux de renforcement proprement dits, 150.000 pour les cordons d'étanchéité, 63.000 pour la réparation de corrosions. Le cube déposé, par soudeur et par heure, compris piquage et brossage, ressort en moyenne à 45 cm³ pour les soudures à plat et 40 cm³ pour les soudures au plafond.

**RENFORCEMENT DU VIADUC D'AUSTERLITZ
PAR SOUDURE A L'ARC ÉLECTRIQUE**

TABLE DES MATIERES

Introduction	7
I. — Description de l'ouvrage	11
II. — Etude du renforcement. — Dispositions adoptées	14
III. — Caractéristiques du métal du viaduc d'Austerlitz. — Choix du métal de renforcement	16
IV. — Choix des électrodes	23
V. — Calcul des éléments de renforcement	25
VI. — Renforcement des principaux éléments de l'ouvrage	28
VII. — Exécution des travaux	34
Conclusion	38
ANNEXE N° 1. — Microexamen d'un joint à cœur soudé dans les condi- tions d'exécution du renforcement du viaduc	41
ANNEXE N° 2. — Normalisation des tensions internes sous l'action des charges extérieures	45
ANNEXE N° 3. — Résistance du viaduc aux efforts répétés après renfor- cement	51
Table des planches	57

ANNEXE N° 1

MICROEXAMEN D'UN JOINT A CŒUR SOUDÉ DANS LES CONDITIONS D'EXÉCUTION DU RENFORCEMENT DU VIADUC

Il a paru intéressant de s'assurer par un essai spécial du degré d'homogénéité structurale susceptible d'être obtenu en pratique pour les assemblages soudés exécutés sur le viaduc.

L'exploration d'un tel assemblage a été effectuée grâce à l'emploi combiné de la métallographie et de la micromachine à enregistrement photographique de Chevenard pour l'essai mécanique des métaux.

L'assemblage était constitué par deux tôles de 12 m/m d'épaisseur soudées à cœur ; l'une d'elles avait été prélevée sur l'ouvrage, l'autre dans le lot des aciers de renforcement.

La macrographie ci-dessous (fig. 1) montre la structure générale de l'ensemble :

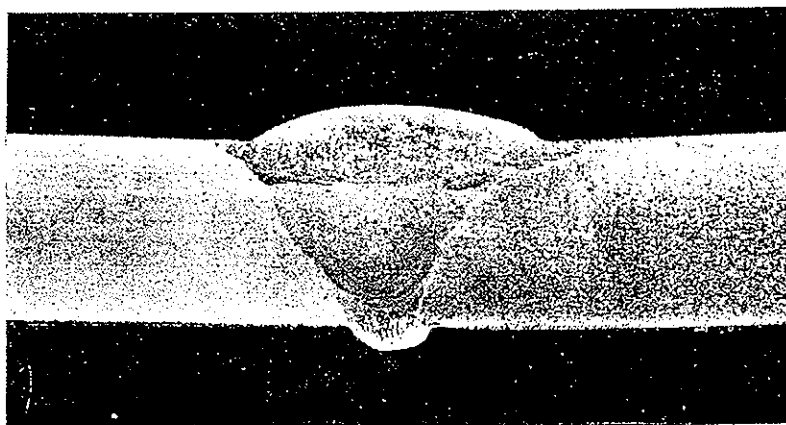


FIG. 1.

On y distingue nettement :

1° Dans le métal de base, des zones parallèles aux bords de la soudure, où se sont manifestés les effets calorifiques;

2° Dans le métal d'apport, les différentes passes de soudure; on constate en particulier que les premières couches déposées ont un grain fin, les dernières présentent au contraire une cristallisation dendritique orientée dans une direction radiale.

On a effectué ensuite des prélèvements dans les zones que ces premières indications désignaient comme les plus intéressantes. Pour chacun d'eux il a été préparé un polissage pour examen métallographique et une micro-éprouvette de traction de 1,5 m/m de diamètre et de 7 m/m de longueur.

Microtractions et Microphotographies

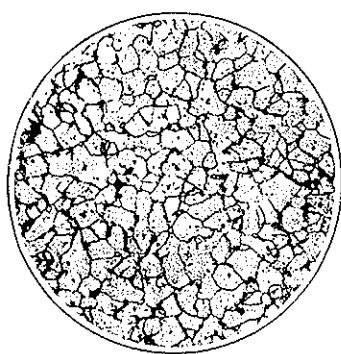
Emplacement des Prélèvements



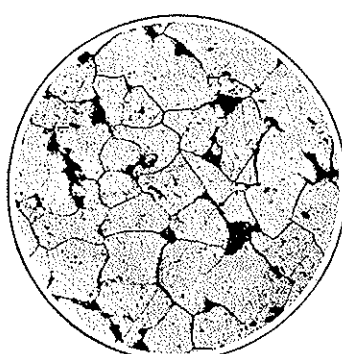
Résultats des microtractions

MATIÈRE	EMPLACEMENT	Repère	L	R	A%
Métal de renforcement	éloigné de la soudure	R	27	42	27,5
	près de la soudure	1	40	48	25
Soudure	au centre	2	38	46	21
	près de la soudure	3	39	49	26
Métal du Viaduc	éloigné de la soudure	V	27,5	43	26

Microphotographies (Grossissement 500)



R



1



2

Le tableau ci-dessus indique les résultats obtenus. Ils appellent les remarques suivantes :

1° Au voisinage de la soudure, le métal du viaduc et le métal de renforcement ont subi l'un et l'autre une modification analogue de structure, les grains sont devenus plus fins que dans la zone éloignée et en même temps les caractéristiques mécaniques (L et R) se sont élevées, sans que l'allongement diminue sensiblement;

2° les zones de liaison présentent une structure fine et assez régulière surtout du côté renforcement ;

3° le centre et la soudure présentent une structure *homogène à grains fins* qui semble être le résultat de l'action thermique des passes supérieures et qui souligne l'intérêt des passes multiples au point de vue de la résistance.

Enfin, on a pu procéder à un contrôle direct de l'homogénéité de l'assemblage soudé par des essais de microdureté et de microcisaillement.

Ces deux procédés qui permettent de mesurer des caractéristiques mécaniques sur des points extrêmement rapprochés les uns des autres, ont fourni très exactement la variation des propriétés mécaniques de la matière suivant des directions données.

Les prises de microdureté ont été effectuées à des intervalles de 1 m/m comme l'indique le croquis ci-après (fig. 2).

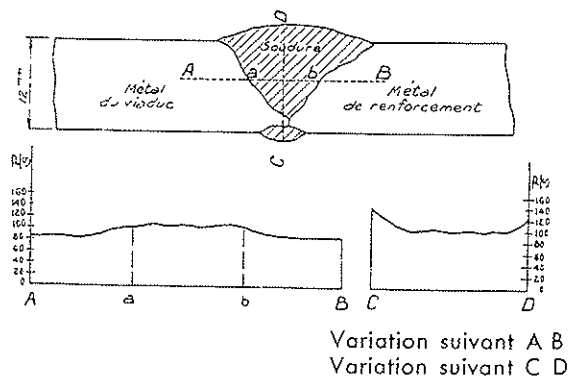


FIG. 2.

Variation de la microdureté

(Empreinte d'un diamant pyramidal chargé à 10 k.)

Quant aux microcisaillements, ils ont été effectués sur deux éprouvettes de 1,5 m/m de diamètre, prélevées dans une direction normale à la ligne de soudure et cisillées ensuite en courts tronçons de 1,5 m/m par la machine Chevenard qui enregistre photographiquement l'effort exercé en fonction de l'enfoncement du couteau.

Les résultats obtenus sont indiqués par la figure 3 ci-après.

Les courbes tracées matérialisent les variations enregistrées.

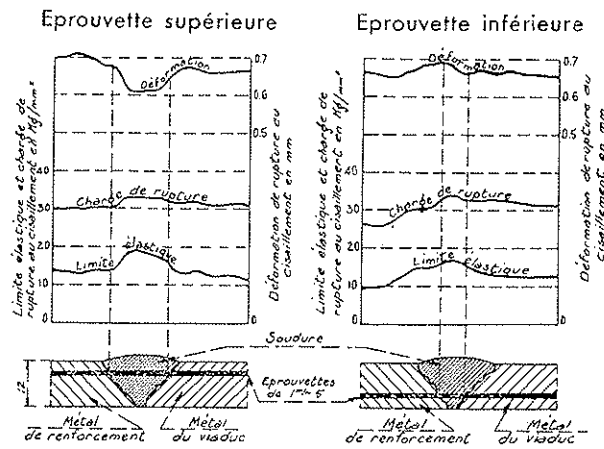


FIG. 3.

Variation des caractéristiques de microcisaillement suivant une direction normale à la ligne de soudure.

Bien qu'une signification absolue ne puisse leur être donnée, la faible amplitude de ces variations témoigne d'une homogénéité satisfaisante des qualités mécaniques de l'assemblage soudé dans les directions considérées.

ANNEXE N° 2

NORMALISATION DES TENSIONS INTERNES SOUS L'ACTION DES CHARGES EXTÉRIEURES

Les tensions résiduelles observées dans les pièces après soudure peuvent atteindre des valeurs voisines de la limite d'élasticité. On a pu se demander si l'action des forces extérieures (charges et surcharges) se composant avec les tensions internes ne porterait pas la fatigue totale de ces pièces à une valeur inadmissible. M. le Docteur Ingénieur Kommerell, en Allemagne, M. G. Fish, aux Etats-Unis, notamment, ont montré, en raisonnant sur le diagramme des contraintes en fonction de l'allongement, que pareille crainte n'était pas fondée.

Mais, à notre connaissance, cette hypothèse n'avait pas encore fait l'objet, antérieurement à nos travaux, d'essais sur éprouvettes ayant pour but de réduire systématiquement les tensions internes d'un assemblage soudé, avec mesures comparatives des forces extérieures et des efforts internes.

Nous exposons, ci-après, les essais auxquels nous nous sommes livrés, et qui ont confirmé entièrement l'hypothèse de la normalisation des tensions, suivant un processus dont nous rappelons sommairement ci-après les points principaux.

Il s'agissait en définitive de savoir comment les fatigues dues aux forces extérieures, appliquées à un ensemble soudé, se composent avec les fatigues dues aux retraits de soudure (tensions internes). Les fatigues et les déformations correspondantes sont d'ailleurs liées par le diagramme d'extension du métal, avec cette différence que, dans le premier cas, la déformation subie est la conséquence de la fatigue ou effort unitaire $\left(\frac{\text{force}}{\text{section}}\right)$ résultant des charges appliquées, tandis que, dans le deuxième cas, le retrait se traduit par un allongement unitaire $\left(\frac{\text{retrait}}{\text{longueur extensible}}\right)$ provoquant une fatigue déterminée.

La tension interne résultant d'une déformation contrariée doit logiquement disparaître si l'on provoque artificiellement une déformation permanente égale ou supérieure à celle qui a été empêchée. Il suffira donc de procéder à un étirage suffisant produisant une *déformation* permanente égale au retrait contrarié, pour obtenir, à la détente, la suppression de toute tension interne due au retrait.

Les aciers qui se prêteront le mieux à une telle opération seront évidemment des aciers extra-doux du type Ac 37, à limite élastique peu élevée, et

présentant une période plastique allant jusqu'à 2 % d'allongement sans augmentation des charges. Les retraits, en effet, dépassent rarement la moitié de ce chiffre; un faible allongement permanent, sur la ligne du palier plastique, suffira donc à compenser ces retraits.

Ce processus théorique de la normalisation, ou écoulement, des tensions sous l'effet des forces extérieures a été expérimentalement vérifié, dans le cas de déformation simple (traction et compression), à l'aide d'éprouvettes à trois branches.

Une telle éprouvette, conforme au schéma ci-après (*fig. 1*), comporte deux plats latéraux de section totale S et une languette centrale de section s soudée à cœur au milieu de sa longueur, l'ensemble étant usiné et prévu pour être monté

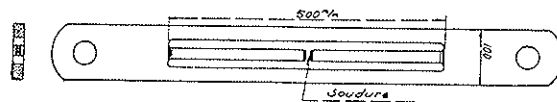


FIG. 1.

sur une machine de traction, avec interposition de dispositifs à cardan destinés à éviter les efforts de flexion. Des lignes de repère sont tracées sur les languettes latérales et sur la languette centrale.

Le retrait résultant de la soudure à cœur donne lieu à un allongement de la languette centrale, ainsi mise en tension, et à un raccourcissement des branches latérales mises en compression.

Les valeurs t et c des contraintes de traction et de compression qui s'équilibrent en l'absence de forces extérieures, sont liées par la relation :

$$c = t \frac{s}{S}$$

Quant au retrait R , il est compensé par la somme de deux déformations : un allongement ε de la languette centrale (tension) et un raccourcissement ε' des branches latérales (compression).

$$R = \varepsilon' + \varepsilon.$$

Si l'on fait subir à l'ensemble ainsi contraint un étirage général, sous l'action d'une force extérieure appliquée par la machine de traction, les branches latérales se déforment élastiquement et la compression interne est compensée d'abord, puis transformée en une tension; quant à la languette centrale, elle est allongée élastiquement et une certaine fatigue s'ajoute à la tension qu'elle subit déjà. Si l'on continue l'étirage au delà de la limite élastique, on arrive à dépasser, dans le domaine des déformations permanentes (palier du diagramme), la valeur R du retrait de soudure.

Si l'on supprime alors l'action de la force extérieure, on provoque une détente élastique pour l'ensemble. La languette centrale, ayant subi une déformation permanente supérieure au retrait, la conserve et ne présente plus, après détente, de tensions internes. Il en est de même dans les branches latérales par raison d'équilibre. Le nouvel équilibre ainsi réalisé ne comporte donc plus de tensions.

Représentation graphique d'un essai dans le cas d'un acier extra-doux.

Les résultats sont reportés sur le diagramme d'extension de l'acier utilisé pour l'éprouvette à 3 branches.

Dans le cas où le retrait est tel que la tension correspondante dans la languette centrale dépasse la limite élastique, après soudure, les points figuratifs des tensions dans les branches centrales et latérales seront tels que A et a, respectivement (fig. 2).

Après un étirage de l'ensemble qui lui fait subir un allongement $d = \frac{\Delta l}{l}$, les points figuratifs sont devenus B et b.

La suppression de la force extérieure provoque, dans la branche centrale et dans les branches latérales de l'éprouvette des détente unitaires σ et σ' telles que :

$$\sigma \cdot s = \sigma' \cdot S$$

avec, à l'échelle près, et en désignant par E le coefficient d'élasticité :

$$\sigma + \sigma' = E \cdot d$$

On tire aisément σ et σ' de ces deux relations.

Le point C, figuratif de la tension dans la languette centrale après détente, occupe sur la parallèle BD à OP une position telle que :

$$\frac{CB}{CD} = \frac{\sigma}{\sigma'} = \frac{S}{s}$$

Si l'on fait varier l'allongement « d » provoqué par l'action de la force extérieure, le lieu des points C est la droite AQ qui partage dans le rapport $\frac{S}{s}$ tous les segments tels que BD. Le point Q correspond à la suppression totale des tensions internes dans la languette centrale.

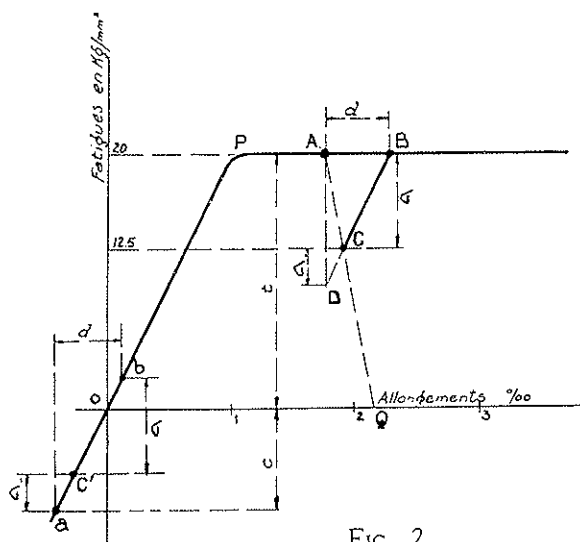


FIG. 2.

On voit que si l'on procède à une série de tractions successives, à partir de la position (A,a) de l'ensemble soudé (position qui résulte des dimensions des pièces, des conditions de soudure, etc...), les détente s'effectuent pour la languette centrale, sur la droite AQ, la limite étant Q et, pour les branches latérales, sur la droite aO, la limite étant O.

Cas de l'acier Ac 54. — Le processus de réduction des tensions internes, suivant le mécanisme indiqué ci-dessus, s'applique également aux aciers à haute résistance type Ac 54. L'étude de détail d'une éprouvette à 3 branches en Ac 54, d'après son graphique d'extension (*fig. 3*), fait apparaître cependant quelques différences.

Le palier plastique n'existe plus dans le diagramme de traction. Il en résulte que la normalisation complète des tensions est impossible.

En effet, quel que soit la déformation subie, les points figuratifs B et b des languettes centrale et latérales sont situés sur la courbe de traction, à une distance horizontale constante λ . Lors de la détente, ces deux points se déplacent, d'une même quantité, sur les parallèles à OP menées par B et b, et viennent en C et c.

Le quadrilatère BbCc est un parallélogramme. Les deux points C et c se trouvent, l'un au-dessus de l'axe horizontal (tension), l'autre au-dessous (compression), en vertu de la condition d'équilibre interne.

Les tensions résiduelles c' et t' correspondantes sont inversement proportionnelles aux sections des branches :

$$c'.S = t'.s$$

Du fait de la pente présentée par le diagramme d'extension au delà du point P, pente caractéristique des aciers doux, nuance Ac 54, les tensions résiduelles ne pourront jamais s'annuler. Plus cette pente sera accusée, plus grandes seront ces tensions résiduelles qui dépendent d'ailleurs de l'état de tension initial.

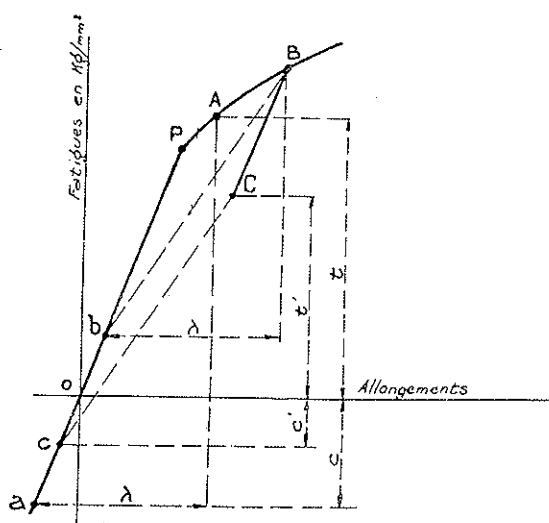


FIG. 3.

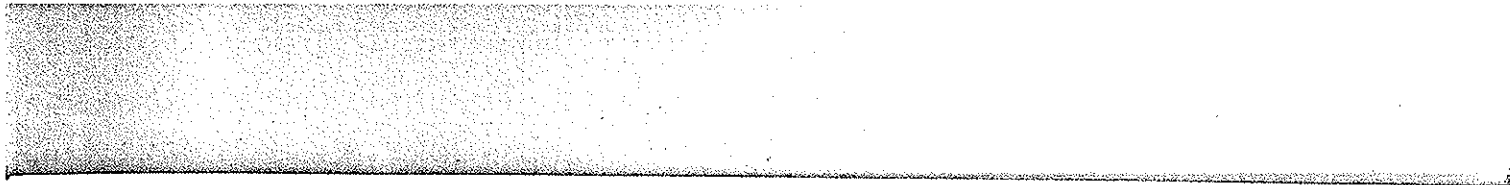
Vérifications expérimentales. — Les mesures effectuées ont entièrement confirmé les considérations théoriques qui précèdent.

On en trouvera les résultats sur la planche n° 3.

En résumé, on peut conclure des essais effectués que le processus de réduction des tensions internes sous l'action d'une force extérieure est général et qu'il s'applique d'autant mieux que l'acier est plus doux.

Tout assemblage soudé, laissant subsister *localement* des tensions internes, même importantes, et soumis à des charges extérieures (surcharges roulantes, par exemple), ne comportera plus après détente que des tensions internes réduites, ou nulles, les zones fatiguées ayant subi un allongement permanent compensateur du retrait. Finalement, les tensions seront distribuées dans l'assemblage de façon homogène.

En particulier, dans le cas du viaduc d'Austerlitz, construit en acier extradoux type Ac 37, la présence possible de tensions internes locales en certains points de l'assemblage ne présente aucun inconvénient quant à la bonne tenue de l'ouvrage et à l'efficacité de son renforcement.



ANNEXE N° 3



RÉSISTANCE DU VIADUC AUX EFFORTS RÉPÉTÉS, APRÈS RENFORCEMENT



La détermination des sections de renforcement du viaduc a été effectuée, conformément aux prescriptions réglementaires, pour des *sollicitations statiques* frappées du coefficient de majoration « dynamique » habituel.

On a considéré, pour chaque élément, les cas de surcharges susceptibles de donner les efforts maxima. Les section résistantes ont été ensuite calculées de façon que le taux de travail du métal ne dépasse en aucun cas les limites supérieures fixées.

Mais la considération d'efforts supposés invariables et appliqués une fois pour toutes, seule réglementaire, ne donne qu'une idée assez approchée du coefficient de sécurité réel d'un tel ouvrage. Il n'était pas inutile de rechercher, au moins à titre indicatif, l'influence de la variation de ces efforts et de la fréquence de leur répétition, facteurs qui intéressent directement l'endurance de l'ouvrage.

On sait, en effet, depuis les expériences de Wöhler relatives à la « fatigue » des métaux, que la capacité de résistance d'un acier de construction est sensiblement plus faible à l'égard d'efforts, alternés ou oscillants, répétés un grand nombre de fois qu'à l'égard des sollicitations statiques.

Or, le viaduc d'Austerlitz est précisément un ouvrage soumis à une circulation intense et dans lequel les efforts variables dus aux surcharges mobiles sont prépondérants par rapport aux efforts constants dus au poids propre.

On fut donc amené à se demander si la marge de sécurité statique était de nature à garantir également l'endurance que l'ouvrage doit présenter vis-à-vis des efforts variables et répétés ou bien si d'autres conditions devaient être réalisées.

Il convenait tout d'abord de rechercher, pour les différents éléments du viaduc, quelles étaient l'amplitude de variation des efforts et la fréquence de leur répétition.

Il ne s'agissait plus désormais de déterminer des maxima ne pouvant être atteints qu'exceptionnellement, mais bien des efforts *se reproduisant réellement pour chaque train*, voire pour chaque voiture. En particulier, les efforts dus au vent n'avaient plus à intervenir; de même il n'y avait plus lieu d'envisager, comme le prescrit la circulaire ministérielle, l'hypothèse de deux trains types marchant côte à côte dans le même sens, mais seulement celle d'un train type unique (le cas de deux trains se croisant sur l'ouvrage est en effet trop rare pour être pris en considération).

En résumé, les efforts susceptibles de produire la « fatigue » du métal n'étaient qu'une fraction de ceux qui avaient servi de base au calcul de l'équilibre statique.

Suivant que le train roule sur la voie la plus voisine de l'élément considéré ou sur la plus éloignée, cette fraction était :

0,686 ou 0,314 pour les arcs et les suspentes,

0,59 ou 0,41 pour les pièces de pont,

1 ou 0 pour les longerons.

En ce qui concerne les arcs, les suspentes et les pièces de pont, les calculs ont été faits respectivement avec les coefficients 0,686 et 0,59 (pour les charges roulantes), comme si les trains types, au lieu de passer alternativement sur chaque voie, passaient tous sur la voie pour laquelle l'élément considéré est le plus chargé.

D'autre part, le train-type de 420 tonnes considéré dans les calculs de résistance, est, en réalité, un train de service composé uniquement de motrices, et susceptible de franchir le viaduc seulement d'une façon *occasionnelle*. En ce qui concerne la fréquence des passages, le convoi à considérer est le train de service régulier qui comprend des remorques et dont le poids est, par suite, beaucoup plus réduit. Dans ces conditions, les résultats donnés ci-après peuvent encore être tenus pour nettement supérieurs à la réalité.

Des deux aciers constituant les pièces renforcées du viaduc, le métal primitif est, comme on l'a vu, le plus chargé; il pouvait en outre présenter un état de fatigue résultant de son travail antérieur, c'est donc lui surtout qui devait retenir l'attention en matière d'endurance.

Son taux de travail total, calculé comme il est dit ci-dessus, oscille entre les limites suivantes (en K/mm²) :

Flexion oscillante	{	Longeron courant ...	0,8	9,6	{	Tension de la fibre intérieure
		Pièce de pont	4,3	7,25		
Traction oscillante		Suspente	4,8	6,8		
Compression oscillante	{	Membrure supérieure de l'arc	1,9	10,15	{	Tronçon 7/VIII
Traction et compression ...	{	Treillis de l'arc..... (r)	3,55	5,55	{	Diagonale 7/VIII

Quant aux soudures, celles qui travaillent le plus n'atteignent que des taux très faibles. A titre d'exemple, pour les soudures qui participent à l'attache des treillis des arcs sur les membrures, les taux maxima compatibles avec le coefficient de 0,686 ci-dessus et avec les règles de calcul imposées par la circulaire du 25 Juillet 1935 sont :

$13 \times 0,85 \times 0,50 \times 0,686 = 3,8$ K/mm²,
pour les soudures à cœur travaillant en compression.

$13 \times 0,75 \times 0,50 \times 0,686 = 3,34$ K/mm²,
pour les soudures à cœur travaillant en traction.

$13 \times 0,55 \times 0,50 \times 0,686 = 2,46$ K/mm²,
pour les soudures à cœur travaillant au cisaillement
et pour les soudures d'angle.

Enfin, les nombres de sollicitations sont indiqués sur le tableau ci-dessous établi pour des trains de 7 voitures assurant un service quotidien de 310 passages sur chaque voie.

	NOMBRE DE SOLLICITATIONS	
	produite par le passage d'un train	produites en un an d'exploitation
Longerons	8	900.000
Pièces de pont et suspentes.....	8	1.800.000
Arcs	1	225.000

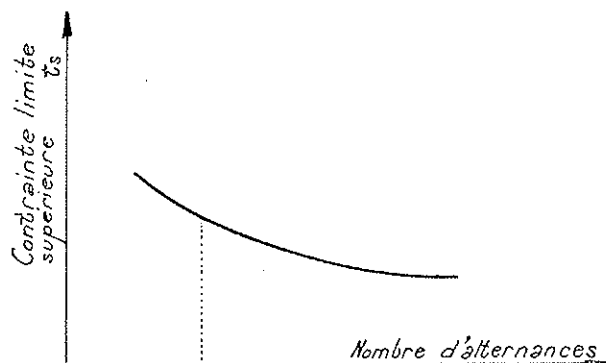
Ces renseignements sont complétés, en ce qui concerne les longerons et les pièces de pont par les deux diagrammes ci-joints (*planche n° 4*) qui représentent, en fonction de la position du train, les variations du taux de travail pour la fibre tendue de la section la plus chargée.

Il restait, pour apprécier l'endurance que peut offrir l'ouvrage renforcé, à confronter les résultats ci-dessus avec la résistance à la fatigue dont sont capables le métal de base et les assemblages.

L'étude de la résistance à la fatigue nécessite de longs et nombreux essais pour lesquels on emploie des machines, dites pulsateurs, qui font connaître le nombre d'oscillations supportées sans rupture par une pièce éprouvée entre les limites de charge données t_i et t_s .

Or, le problème se pose en réalité d'une façon un peu différente : les résultats des essais doivent, en effet, être comparables entre eux et avec les besoins pratiques, aussi est-il indispensable qu'ils se réfèrent tous à un *même* nombre N d'oscillations fixé d'avance (les laboratoires adoptent couramment 2 millions).

Pour cela la même pièce, reproduite à plusieurs exemplaires, doit faire l'objet d'une série d'essais effectués avec des valeurs différentes de t_i (la valeur de t_s , commune à tous, est prise égale à la tension minimum supportée sur l'ouvrage par l'élément considéré). On reporte ensuite sur un diagramme les valeurs conjuguées de N et t_i fournies pour chaque essai. On obtient ainsi



Courbe de Wöhler

une courbe dite de Wöhler qui a l'allure ci-dessus et finalement, par interpolation, la valeur de t_s correspondant au nombre N que l'on s'était fixé.

Il est à remarquer que la courbe ci-dessus possède une asymptote horizontale lorsque N augmente. Pratiquement les résultats obtenus pour deux millions d'oscillations ne diffèrent guère de ceux qu'on obtiendrait pour un nombre beaucoup plus considérable.

La méthode qui vient d'être exposée a été employée pour rechercher l'endurance du métal primitif du viaduc. Des éprouvettes cylindriques, usinées dans des tôles prélevées sur l'ouvrage, ont été soumises aux trois séries d'essais suivants :

1^{re} série. — *Cas du treillis des arcs.*

Efforts alternés : $t_i = -t_s$ et $N = 2 \times 10^6$.

2^e série. — *Cas du longeron.*

Traction oscillante : $t_i = 0$ et $N = 8 \times 10^6$.

3^e série. — *Cas des suspentes.*

Traction oscillante : $t_i = 5 \text{ K mm}^2$ et $N = 16 \times 10^6$.

Dans les trois cas, les nombres N adoptés sont proportionnels aux nombres de sollicitations reçues réellement sur l'ouvrage par l'élément considéré. Le cas de la compression oscillante des membrures d'arc n'a pas été examiné ici car on sait que la résistance à la fatigue est plus élevée en compression qu'en traction.

Les résultats sont groupés dans le tableau ci-dessous ainsi que les coefficients de sécurité qui découlent de leur rapprochement avec les taux de travail calculés plus haut pour les pièces considérées.

DÉSIGNATION DE LA PARTIE D'OUVRAGE	TAUX DE TRAVAIL SUR L'OUVRAGE	LIMITE DE FATIGUE	COEFFICIENT DE SÉCURITÉ
Longerons	9,6	28,35	3
Suspentes	6,8	30,00	4,4
Treillis des arcs	4,5	18,4	4,1

La planche n° 5 donne les courbes de Wöhler relatives à chacune des trois séries d'essais effectués, ainsi que la courbe, dite de Weyranch, représentant la variation de la résistance à la fatigue en fonction de la tension inférieure pour une valeur donnée du nombre de sollicitations (2 millions).

Il n'a pas été effectué d'essais analogues pour les cordons de soudure. Cependant, si l'on compare les taux de travail indiqués précédemment pour les cordons d'attache de treillis, avec les limites d'endurance obtenues en Allemagne lors de la préparation du Règlement des ponts soudés à âme pleine (D.I.N. 4101 - 1935), et rapportées par le Docteur Kommerell, on constate que le coefficient de sécurité le plus faible peut encore être évalué à 2,5.

Il convient de préciser que, si les coefficients de sécurité auxquels aboutit l'étude sommaire exposée ci-dessus donnent une idée de l'endurance relative des divers éléments du viaduc renforcé, on ne saurait cependant leur attribuer qu'une valeur encore très indicative.

Les phénomènes de fatigue sont en réalité trop complexes pour que l'endurance d'une pièce déterminée d'un ouvrage puisse être déduite purement et simplement de celle d'une éprouvette de même métal essayée à la machine pulsatoire. Les conditions de travail ne sont pas identiques dans les deux cas.

Parmi les éléments non comparables, on peut signaler la fréquence des impulsions qui est de 3.000 à la minute au laboratoire alors qu'elle atteint au maximum 25 sur l'ouvrage (pour le longeron). De plus, le travail, continu dans le premier cas, est intermittent dans le second; les courtes périodes correspondant au passage des trains alternent alors avec des périodes de repos d'une durée environ dix fois plus grande.

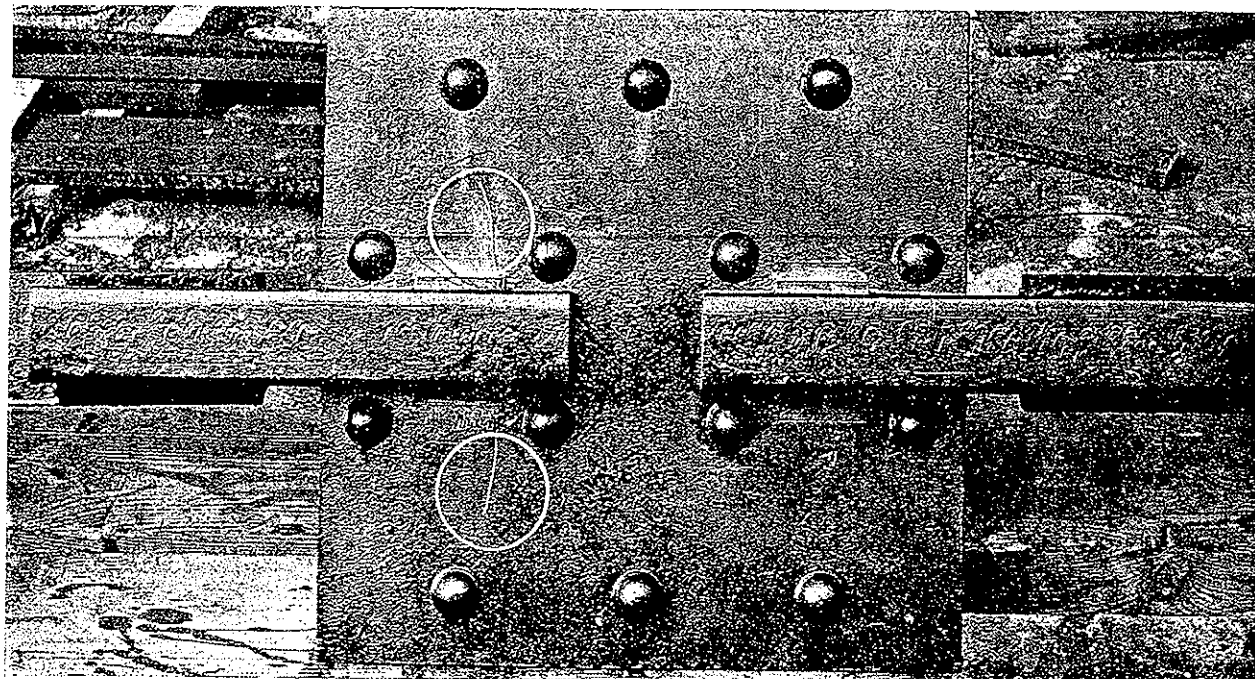
Il n'a jamais été procédé à des essais systématiques d'endurance à très faible fréquence pour la raison très simple qu'ils exigeraient, pour être concluants, un nombre important d'années. Il semble néanmoins qu'on puisse admettre qu'à égalité de taux de travail, le régime des sollicitations est beaucoup plus sévère pour le métal éprouvé au laboratoire que pour celui de l'ouvrage et que, par conséquent, les coefficients de sécurité trouvés plus haut sont inférieurs à ceux dont on dispose effectivement.

Certains auteurs affirment même que les phénomènes de fatigue ne s'observent réellement que sur des pièces soumises à des efforts répétés plusieurs milliers de fois par minute, pendant un temps prolongé et sans interruption, tels que les organes de machines. Ils ajoutent que, pour ce qui est des ponts métalliques, la fatigue aux efforts variables n'a pas à être prise en considération, étant donné que les temps de repos compris entre les passages consécutifs des convois sont largement suffisants pour permettre une dilution des travaux moléculaires dont l'accumulation est précisément la cause certaine de ruptures par fatigue.

Une telle opinion paraît trop absolue. Le facteur *fréquence des sollicitations* n'intervient sans doute que peu dans le cas d'un ouvrage sous rail; mais il n'est pas le seul à influencer sur la résistance à la fatigue des éléments constitutifs. Des travaux poursuivis depuis plusieurs années dans les laboratoires étrangers, ont démontré surabondamment que l'influence du paramètre « forme » était de première importance. On a reconnu notamment que la résistance à la fatigue est d'autant plus réduite que la distribution des tensions est moins uniforme dans la section considérée et que le parcours des lignes de force subit (du fait d'un assemblage mal conçu par exemple) des perturbations plus grandes.

Les essais ont montré que, dans des assemblages soudés mal conçus, ou mal exécutés, les ruptures de fatigue se produisaient le plus souvent dans le métal de base, à partir de petites cavités de surface telles qu'on en peut rencontrer au raccordement du cordon de soudure et du métal de base. Cet effet d'entaille peut également résulter de défauts internes de la soudure (inclusions, soufflures, etc...) susceptibles d'entraîner des concentrations d'efforts.

Il ne pouvait être question d'entreprendre des épreuves d'endurance sur des pièces reproduisant les éléments réels du viaduc. On n'a pas manqué par contre de mettre à profit les résultats expérimentaux déjà acquis pour le dessin des détails de renforcement et des assemblages.



Rupture de tôle due à un effet d'entaille.

On a pu ainsi éviter les dispositions vicieuses telles que celle qui apparaît sur la photographie ci-dessus où l'effet dit « d'entaille » provoque une pointe de tension qui s'est révélée particulièrement néfaste à l'endurance.

TABLE DES PLANCHES



PLANCHE N° 1. — Trains-types successivement adoptés pour le renforcement du viaduc d'Austerlitz.

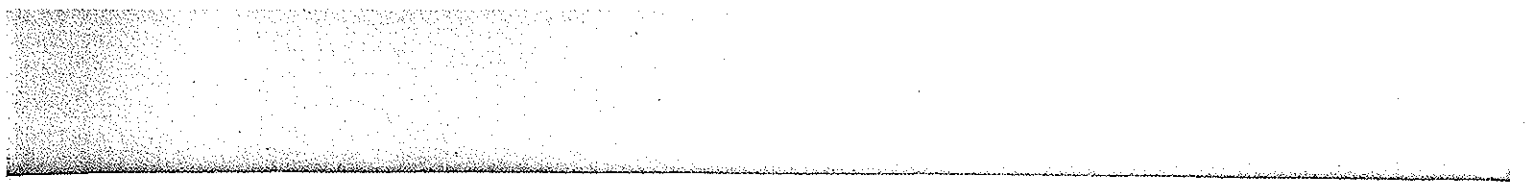
PLANCHE N° 2. — Dessin d'ensemble du viaduc montrant les renforcements effectués.

PLANCHE N° 3. — Réduction des tensions internes par l'action d'une force extérieure. Comparaison de l'acier extradoux et de l'acier 54. ———

PLANCHE N° 4. — Variation du taux de travail en fonction de la position du train-type. Longerons et pièce de pont.

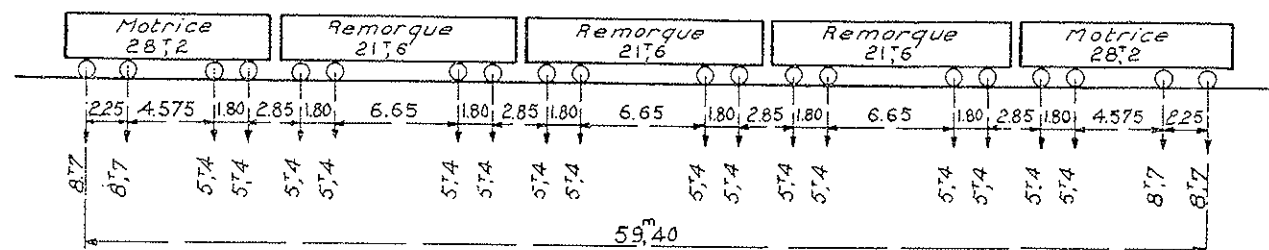
PLANCHE N° 5. — Résistance à la fatigue du métal du viaduc. Courbes de Wöhlher et courbe de Weyrauch.



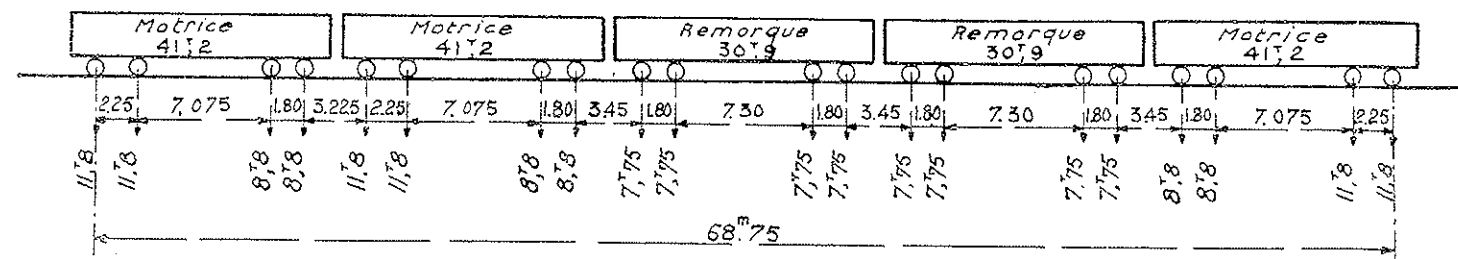


Trains types successivement adoptés pour les calculs de résistance du Viaduc d'Austerlitz

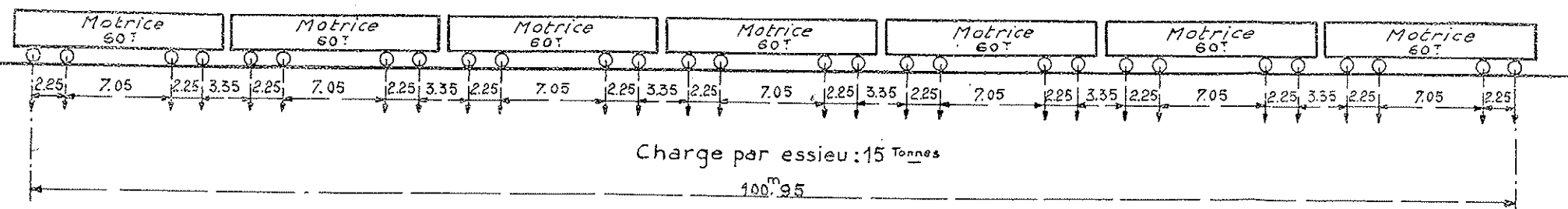
1° Train type de 121,2
(Construction de l'ouvrage)



2° Train type de 185,2
(1931)



3° Train type de 420,1
(Lettre du 24 Mars 1932 de M^r le Ministre des Travaux Publics)



COMPAGNIE DU CHEMIN DE FER MÉTROPOLITAIN DE PARIS

Ligne n° 5

RENFORCEMENT DU VIADUC D'AUSTERLITZ

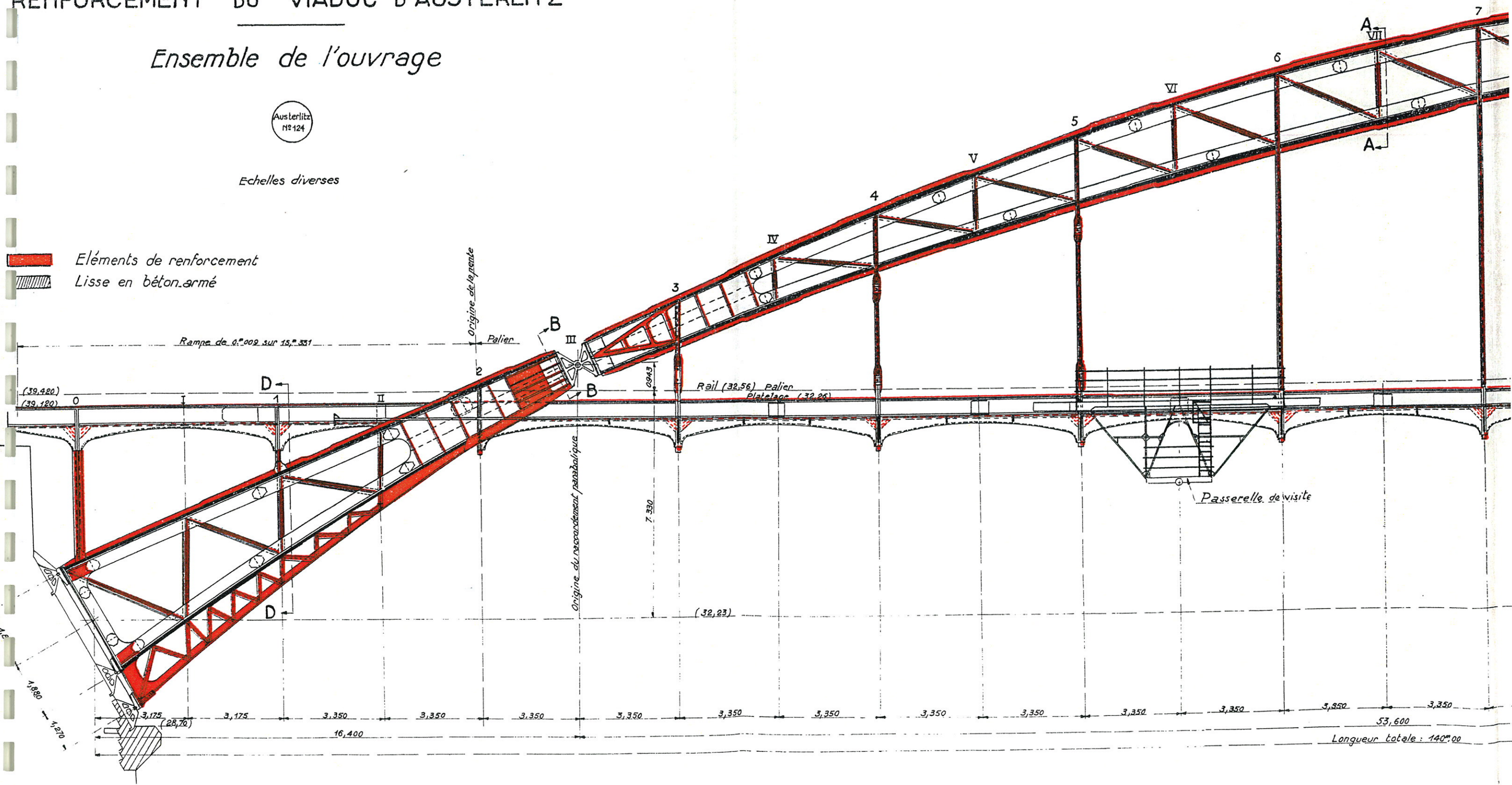
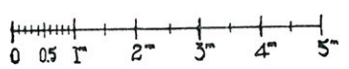
Ensemble de l'ouvrage

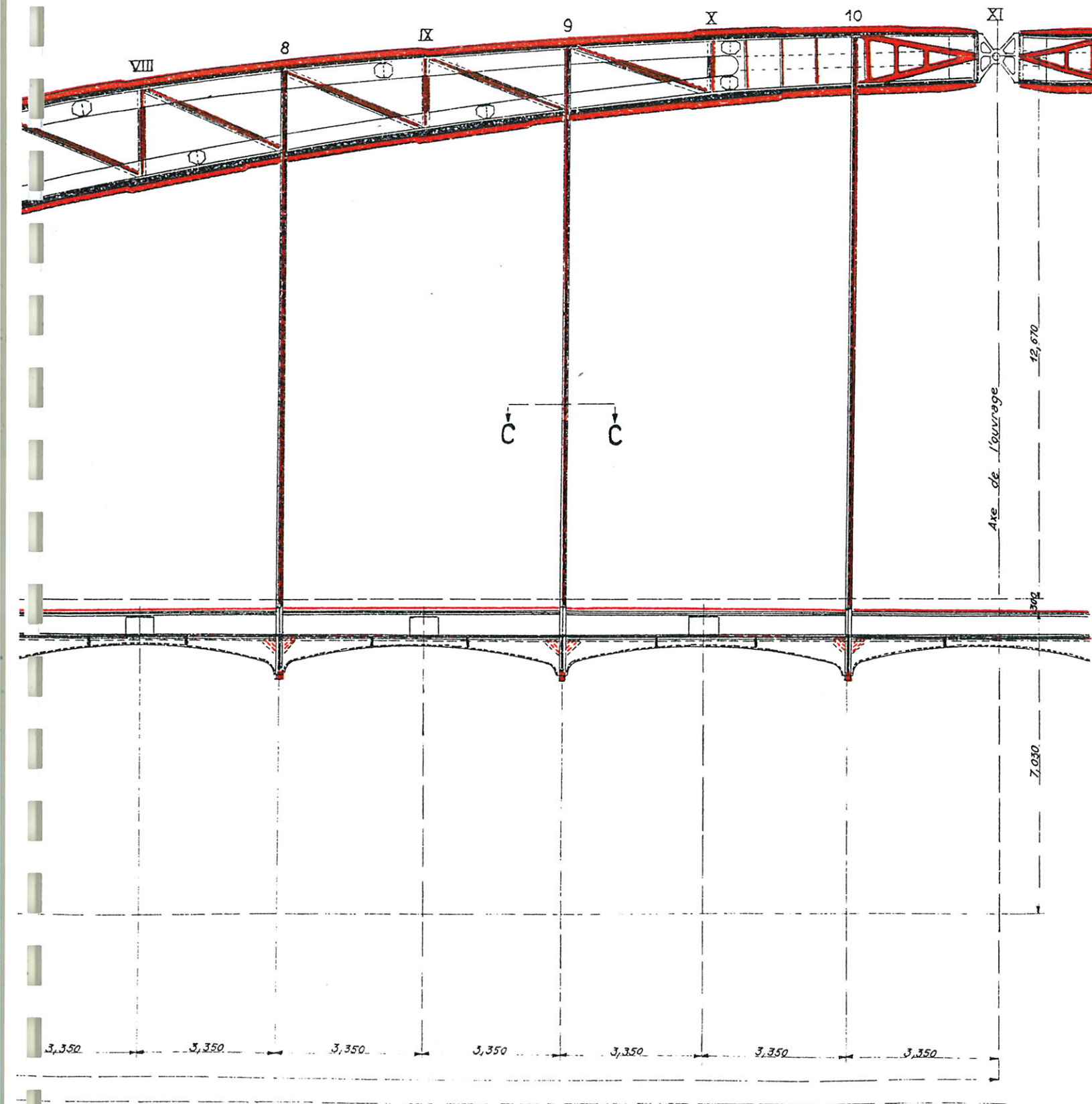
Austerlitz
N° 124

Echelles diverses

ELEVATION

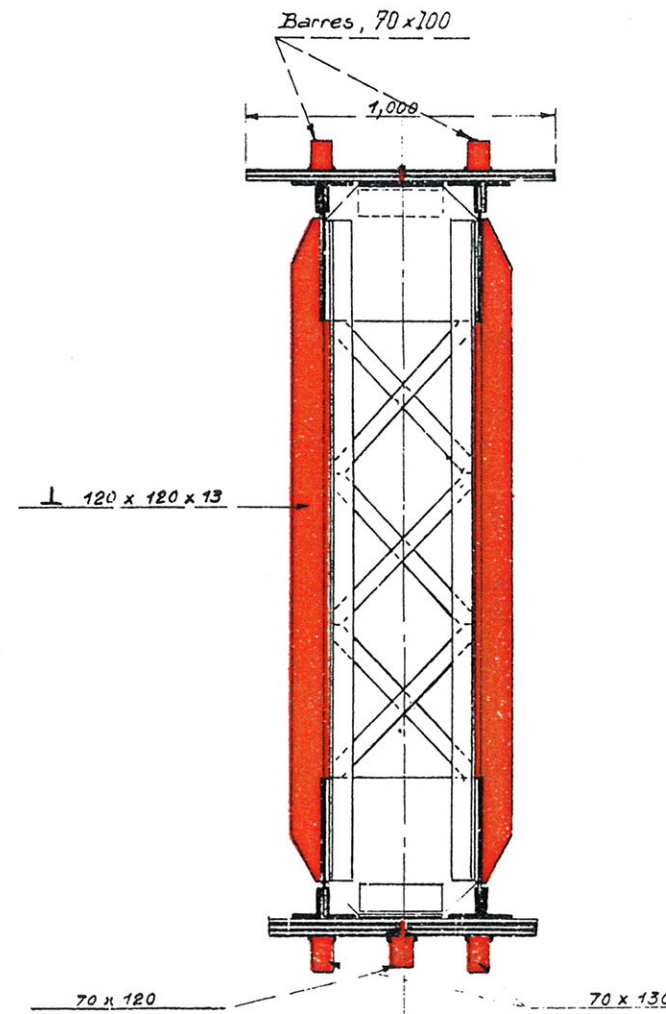
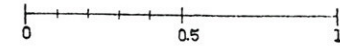
Echelle





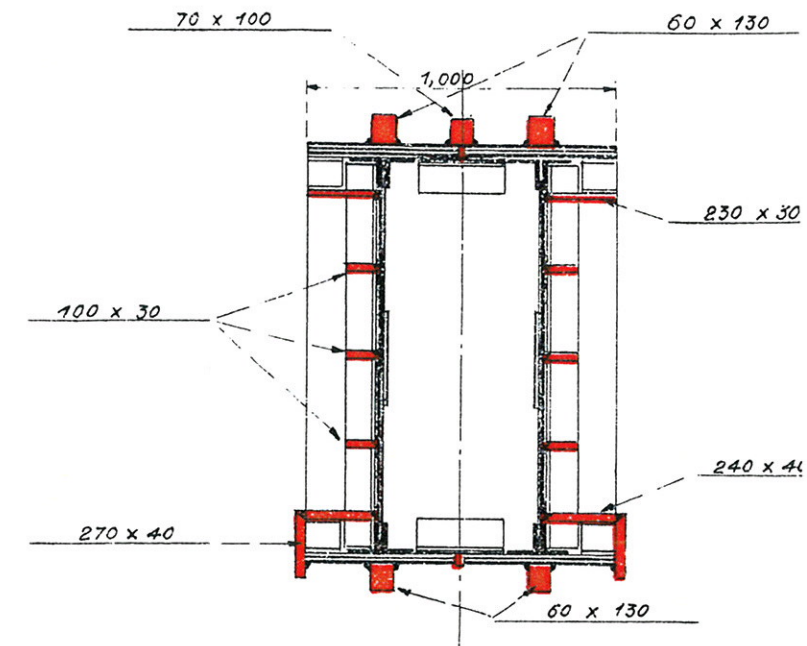
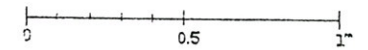
COUPE A.A

Echelle



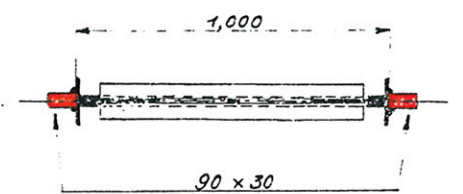
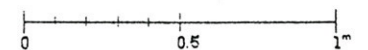
COUPE B.B

Echelle



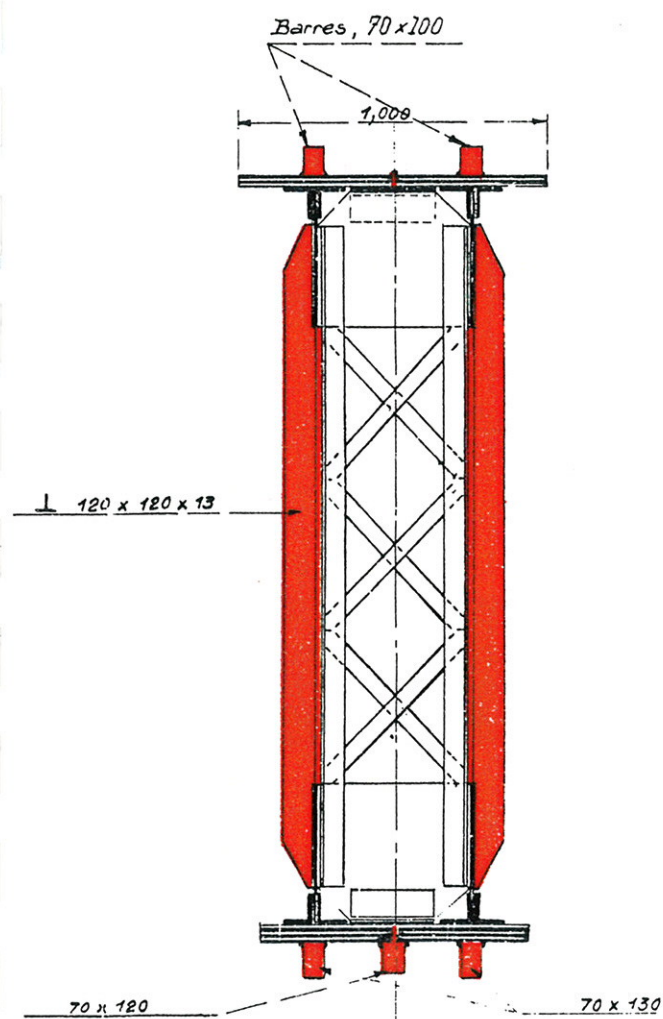
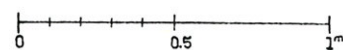
COUPE C.C

Echelle



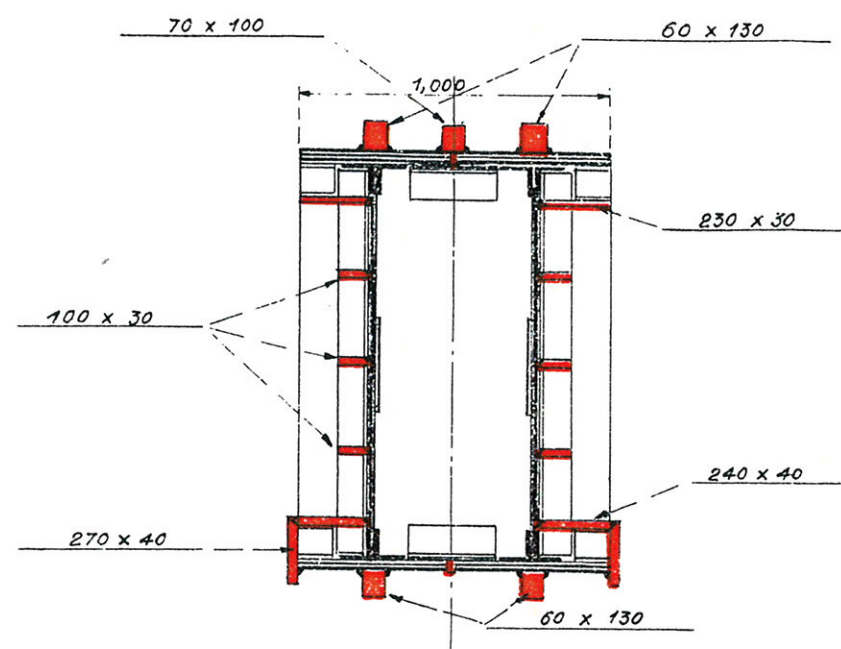
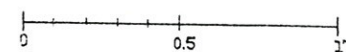
COUPE A.A

Echelle



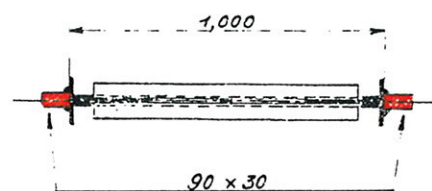
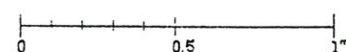
COUPE B.B

Echelle



COUPE C.C

Echelle



COUPE D.D

Echelle

