

Zeitschrift: IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH
Kongressbericht

Band: 1 (1932)

Artikel: Calcul et construction des charpentes métalliques soudées

Autor: Kommerell

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-454>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 13.01.2026

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

Die Verbindung mit gleichzeitiger Verschweissung von Flansch und Steg ist also wesentlich günstiger.

Zum Vergleiche wurden in den Ecken an Stellen der Kehlnähte L 50.80.14 eingeschweisst. Die Bruchlast trat schon bei 14500 kg ein, das zulässige P_{zul} ergab sich zu $P_{zul} = 3050$ kg, der Sicherheitsgrad zu

$$\nu = \frac{14500}{3050} = 4,75$$

Auf 1 cm² nutzbarer Schweißfläche entfiel nur eine Last

$$P' = 450 \text{ kg.}$$

Dieser Anschluss ist also nicht nur teurer, sondern auch wesentlich schlechter¹.

Die Berechnungsweise unserer Vorschriften bietet also ausreichende Sicherheit.

TRADUCTION

par M. GOSSIEAUX, Paris.

I. Généralités.

En construction mécanique et en construction navale, on connaît déjà depuis longtemps le mode d'assemblage par soudure des pièces en fonte et en acier. Ce n'est qu'au cours de ces dernières années que la soudure a conquis le domaine de la construction métallique. On a commencé par l'appliquer à la construction des charpentes d'immeubles. Il en est résulté la mise au point de méthodes simples de construction ; dans de nombreux cas, on s'est ainsi trouvé à même d'exécuter par soudure des assemblages que l'on ne pouvait pas riveter et qui ne pouvaient être exécutés auparavant qu'en fonderie, avec des moules compliqués. En construction rivée, la cornière constitue l'élément principal à l'aide duquel on réunit les pièces séparées pour constituer un ensemble ; par contre, en construction soudée, on peut souvent se passer entièrement d'éléments intermédiaires particuliers ; dans bien des cas, du moins, on peut se tirer d'affaire en employant des fers plats.

Un des premiers avantages de la soudure est de conduire à une notable économie de matière par rapport au rivetage, par suite de la suppression des trous des rivets. On a également commencé récemment à employer la soudure dans la construction des ponts. Ce procédé procure là, en effet, des avantages particulièrement intéressants pour le renforcement des ponts métalliques trop faibles, surtout dans les cas où l'on ne peut plus avoir recours au rivetage (étalement des ponts lorsque les assemblages sont trop faibles aux goussets, ou lorsqu'il faut remplacer ces goussets). Comme le fer forgé présente généra-

1. Näheres siehe : Dr.-Ing. O. KOMMERELL, Erläuterungen zu den Vorschriften für geschweißte Stahlbauten, W. Ernst und Sohn, Berlin, 1931, S. 34.

lement une structure fibreuse, les vieux ponts en fer forgé ne doivent pas être renforcés par soudure.

Au début de la soudure, on a exécuté des assemblages sans se préoccuper de suivre une méthode déterminée. Cette pratique, qui ne donnait aucune garantie et qui ne pouvait être que provisoire, a cessé. On a en effet publié depuis, en Allemagne, des règlements prescrivant les conditions dans lesquelles doivent être calculés les assemblages soudés¹.

La soudure est une opération métallurgique. Une partie du métal des pièces à assembler est chauffée jusqu'à la fusion et forme, avec le métal fondu provenant des électrodes, une zone d'assemblage constituée par un cordon de métal fondu, forgeable et malléable, qui tient à la fois de l'acier fondu et de l'acier coulé. Il est essentiel que le métal fondu apporté par les électrodes pénètre complètement jusqu'au sommet (racine) de l'angle formé par les pièces à assembler. Malheureusement, on ne peut pas toujours réaliser cette condition et il est souvent difficile de contrôler si la pénétration de la fusion a bien eu lieu partout d'une manière satisfaisante. Le cordon de soudure contient parfois des inclusions d'impuretés qui compromettent sa résistance. La qualité d'un cordon de soudure dépend également de certaines conditions extérieures, ainsi que de sa position (les soudures au plafond ne peuvent être convenablement exécutées que par des soudeurs particulièrement bien exercés). Les cotes prévues pour les cordons de soudure ne peuvent pas toujours être rigoureusement observées par les soudeurs. Pour réaliser cette condition, il convient d'éviter l'application de méthodes de calcul compliquées; il vaut mieux se contenter de méthodes d'approximation, dont la légitimité devra être contrôlée par des essais. Le constructeur doit toutefois se rendre compte des conditions pratiques effectives, afin de pouvoir établir ses projets d'une manière judicieuse. Cette façon de faire correspond exactement à ce qui se passe pour le rivetage. On sait par exemple que, dans les assemblages de barres, tous les rivets ne travaillent pas également, quoique les calculs soient conduits comme si la charge était uniformément répartie.

II. Classification des soudures.

On distingue :

- les soudures bout à bout ;
- les soudures d'angle ;
- les soudures à entailles.

D'après nos règlements, les efforts de traction et de flexion dans les éléments des ponts ne doivent pas être supportés uniquement par des soudures *bout à bout*. On ne peut s'écarte de cette prescription que pour les parties secondaires, telles que les consoles des trottoirs, ou pour les ossatures métalliques des immeubles. Pour les cordons de soudure de forte épaisseur, il faut travailler en plusieurs couches. Malgré toutes les précautions, les écailles ou bati-

1. Voir les Normes des Ingénieurs allemands (DIN 4.100), et l'ouvrage du Dr. Ing. O. KOMMERELL : Erläuterungen zu den Vorschriften für geschweißte Stahlbauten mit Beispielen für die Berechnung und bauliche Durchbildung Berlin 1931. Editeur Wilhelm Ernst & Sohn.

tures qui peuvent se produire entre les différentes couches ne sont pas toujours éliminées ; on ne réalise par suite pas toujours la fusion intime entre deux couches successives ; il en résulte que les cordons épais (soudures bout à bout et soudures d'angle) sont relativement moins résistants que les cordons de soudure plus minces. Pour la même raison, la résistance des cordons de soudure en X est relativement moins bonne que celle des cordons en V.

On a constaté, à la suite d'essais effectués sur des *soudures d'angle*, que d'une manière générale la résistance de la zone d'accrochage du cordon sur la pièce est plus grande que celle du cordon lui-même et qu'en règle générale, les ruptures se produisent à l'endroit le moins épais du cordon, c'est-à-dire pour les cordons isocèles, dans le plan bissecteur de leur section. Par suite, la résistance d'un cordon de soudure est déterminée par son épaisseur a , hauteur du triangle isocèle formé par sa section, et par sa longueur l ; on ne tient donc pas compte de l'arrondi Δa du cordon, qui, en fait, n'existe pas toujours, pas plus que des cratères d'extrémité, qui ne possèdent pas la pleine résistance du cordon lui-même. Dans les calculs de résistance, les *soudures à entaille* doivent être considérées comme soudures d'angle.

Des essais ont montré que les cordons de soudures d'angle qui sont disposés latéralement, ne travaillent pas uniformément sur toute leur longueur ; les taux de travail sont plus élevés aux extrémités qu'au milieu. Toutefois, pour simplifier les calculs dans toute la mesure du possible, on admet par approximation une répartition uniforme de la charge. Pour justifier cette simplification, nos règlements prévoient que dans les assemblages de barres, la longueur utile des cordons d'angle latéraux ne doit pas être supérieure à 40 fois leur épaisseur a , sans tenir compte des cratères d'extrémité. Ces cordons latéraux montrent une aptitude notablement meilleure à supporter les déformations que celle des soudures d'angle en bout, quoique la résistance de ces dernières soit supérieure. Ces constatations nous ont conduit, par mesure de sécurité, à ne pas admettre des efforts plus élevés dans les soudures en bout que dans les soudures latérales ; pour ces deux types de soudures d'angle, on n'admet, comme effort calculé ρ , que l'effort admissible pour le cisaillement ρ_{zul} .

III. Calcul des cordons de soudure.

Deux cas principaux sont à distinguer :

- 1^o les pièces à assembler travaillent à la traction ;
- 2^o les pièces à assembler travaillent à la flexion.

Dans le deuxième cas, il faut généralement considérer, en même temps, un effort tranchant, qui fait travailler les cordons de soudure comme il est indiqué en 1.

1. Efforts de traction (longitudinaux).

L'effort dans les cordons de soudure est déterminé par la formule suivante :

$$\rho = \frac{P}{\Sigma(a \cdot l)} \quad \dots \quad (1)$$

formule dans laquelle on désigne par :

P , la charge que doivent supporter les cordons de soudure ;

l , la longueur des cordons de soudure, cratères non compris (dans les cordons de soudure à entaille, cette longueur correspond à la totalité du cordon développé) ;

a , l'épaisseur des cordons, soit :

dans les soudures bout à bout, l'épaisseur des pièces à assembler ; lorsque ces épaisseurs sont différentes, on adopte la plus faible (fig. 1) ;

dans les soudures d'angle, la hauteur du triangle isocèle inscrit dans le cordon (fig. 2, a et b) ;

dans les soudures à entaille, la hauteur du triangle isocèle inscrit dans le cordon disposé dans l'angle formé par l'entaille (fig. 3) ; si le reste de l'entaille est rempli de soudure de bouchage, on ne doit toutefois pas le considérer comme participant à la résistance de la soudure.

En construction métallique, on emploie presque exclusivement les soudures d'angle ; suivant la résistance à obtenir, les cordons de soudure sont continus ou discontinus. Lorsque la section du cordon est un triangle isocèle, on a :

$$a = \frac{b}{\sqrt{2}} \quad (\text{fig. 4}).$$

Nous admettons également, dans la construction des ponts, les soudures d'angle en congé (fig. 2 b) qui sont moins chères, mais, en fait, moins résistantes que les soudures d'angle normales comportant un léger arrondi (fig. 2 a), par suite précisément de l'absence de cet arrondi Δa . On emploie souvent ces soudures d'angle en congé lorsque la résistance du cordon de soudure ne doit pas être entièrement utilisée ou lorsqu'il paraît opportun de boucher un joint avec de la soudure, afin d'éviter la pénétration de l'eau. D'une manière générale, les cordons de soudures d'angle qui travaillent doivent être exécutés comme il est indiqué sur la fig. 2 a , en soudures normales, avec un léger arrondi.

Dans les soudures en bout suivant la disposition de la fig. 4, prennent naissance dans les plans AB et A_1B_1 , des efforts tranchants égaux à $\frac{P}{2}$. Par mesure de sécurité, et d'après ce qui précède, on supposera les sections de rupture AC et A_1C_1 rabattues dans les plans AB et A_1B_1 et c'est à ces sections que l'on appliquera les efforts tranchants $\frac{P}{2}$.

Les soudures à entailles peuvent être de forme circulaire, carrée ou allongée. L'arrondi des angles est favorable à une bonne répartition des charges. On ne doit adopter les soudures à entaille que lorsque l'on ne peut pas exécuter l'assemblage comme il conviendrait avec des soudures d'angle ordinaires. L'adoption des soudures à entaille fait perdre un des principaux avantages de la soudure par rapport au rivetage, puisque ces entailles conduisent inévitablement à un affaiblissement correspondant de la section.

2. Efforts dus aux moments fléchissants.

La fig. 5 représente un appui sur lequel est soudée une poutre. Sur la

poutre, s'exerce un moment fléchissant M . On peut admettre que les cordons de soudure résistent sur les plans d'accrochage de l'appui et de la poutre et que les ruptures se produisent suivant les plans bissecteurs de tous les cordons. Tant que l'on ne dépasse pas les efforts admissibles, on peut admettre que les efforts sont répartis suivant la loi de Hooke¹.

Sous l'influence du moment fléchissant M , prennent naissance, aux points extrêmes supérieurs et inférieurs, des efforts :

$$\rho_1 = \pm \frac{M}{W} \dots \dots \dots \dots \dots \quad (2)$$

Si nous supposons, comme dans la fig. 4, les plans bissecteurs rabattus sur les plans d'accrochage, W désigne le moment résistant de la section rabattue du cordon de soudure.

La réaction d'appui A qui se produit simultanément tend à cisailier la section rabattue de bas en haut, cette section étant $F = \Sigma (a \cdot l)$; si pour simplifier on admet une répartition égale des efforts, par moitié, on aura pour les efforts de cisaillement dans la section rabattue :

$$\rho_2 = \frac{A}{\Sigma (a \cdot l)} \dots \dots \dots \dots \dots \quad (3)$$

On peut admettre la composition des efforts ρ_1 et ρ_2 , suivant la fig. 6, et on obtient un effort résultant :

$$\rho = \sqrt{\rho_1^2 + \rho_2^2} \dots \dots \dots \dots \dots \quad (4)$$

Pour ρ_1 , on peut adopter l'effort admissible pour la traction, tandis que pour ρ_2 intervient l'effort admissible au cisaillement. On se placera dans des conditions de calcul défavorables en adoptant également pour la charge résultante, l'effort admissible au cisaillement. On l'adopte toutefois également parce que l'on ne peut pas compter, en fait, sur une répartition uniforme des efforts tranchants ρ_2 sur la question rabattue.

3. Prescriptions particulières concernant le calcul.

La modification provoquée dans la structure du métal par la fusion ne doit pas être considérée comme diminuant la résistance de la section. Les sections des trous éventuels pour les goujons de montage doivent, dans les calculs, être déduits de la section utile. Les efforts tranchants et les efforts de cisaillement sur les parois des trous des goujons doivent être contrôlés.

Outre les soudures d'angle, si on est amené à prévoir également des soudures à entailles, par exemple, pour des plaques de semelles rapportées sur des membrures de poutres, les sections des entailles doivent être déduites, dans les calculs, de la section utile.

Les semelles qui constituent les ailes des poutres ne doivent être considérées comme intervenant effectivement dans la résistance qu'aux endroits où leur section fait l'objet d'un assemblage franc par cordons de soudure (cet assemblage effectif doit d'ailleurs commencer dès l'endroit où les poutres inter-

1. Nous supposons que la section de la poutre reste plane après la flexion et que les cordons de soudure prennent les allongements nécessaires.

viennent théoriquement). Dans toute la mesure du possible, l'assemblage doit être conçu de façon à ne pas dépasser une longueur de 40 a.

Lorsque la charge de la poutre est supportée par l'intermédiaire de m tôles superposées, la longueur totale de l'assemblage à recouvrement doit être égale à $(m + 1) \cdot l$, l désignant la longueur d'assemblage nécessaire pour une seule tôle (fig. 7).

Lorsque l'on se trouve dans l'impossibilité d'exécuter d'une manière parfaite certains cordons de soudure auxquels il est difficile d'accéder, ils ne doivent pas être pris en considération dans les calculs de résistance. Cette prescription permettra d'assurer rationnellement la construction dans des conditions opportunes et sûres.

4. Efforts admissibles dans les cordons de soudure.

Nous admettons, pour les efforts admissibles dans les cordons de soudure, les valeurs indiquées dans le tableau 1.

Les chiffres de ce tableau sont valables pour l'acier de construction de qualité courante et pour l'acier doux St. 37; pour l'acier coulé, les efforts admissibles doivent être déterminés particulièrement d'après des essais.

Si, dans un assemblage, interviennent simultanément des cordons de soudure bout à bout et en angle, il ne faut adopter, pour les soudures bout à bout, que les valeurs admissibles pour les soudures d'angle.

Tableau 1.
Efforts admissibles dans les cordons de soudure.

Type de soudure adopté	Nature de l'effort exercé	Effort admissible σ_{adm}
Soudures bout à bout	Traction	0,6 σ_{adm}
	Compression	0,75 σ_{adm}
	Flexion	
	{ zone tendue zone comprimée}	0,6 σ_{adm}
		0,75 σ_{adm}
	Cisaillement	0,5 σ_{adm}
Soudures d'angle	Efforts de toute nature	0,5 σ_{adm}

Dans le tableau ci-dessus, σ_{adm} désigne l'effort admissible dans le métal destiné à constituer l'assemblage, d'après les règlements en vigueur.

Si les plans d'accrochage des cordons font entre eux un angle inférieur à 70°, il est à recommander de réduire les efforts admissibles.

Pour le calcul de barreaux composés travaillant à la compression, d'après la méthode de KROHN¹, on peut adopter, pour la charge de rupture des cordons de soudure des tôles de liaison, la valeur de 24 kg. par mm².

1. Voir : Zentralblatt der Bauverwaltung, 1908, p. 559.

On a constaté qu'il convenait d'adopter un rapport déterminé entre les efforts admissibles $\rho_{a,lm}$ dans les cordons de soudure et les efforts admissibles σ_{adm} dans la construction proprement dite ; cette disposition permet de faciliter au maximum l'application du principe suivant lequel les différentes parties d'une charpente doivent donner, dans toute la mesure du possible, la même marge de sécurité. D'après nos règlements, on arrive ainsi aux efforts admissibles indiqués dans le tableau 2 ci-après.

Tableau 2.
Efforts admissibles suivant la nature de la charge.

Nature de la charge	σ_{adm} pour la construction	$\rho_{a,lm}$ pour les cordons d'angle travaillant au cisaillement.
<i>Ponts</i>	kg par mm^2	kg par mm^2
Charges principales : fixe, roulante, centrifuge, efforts de dilatation.....	14 ¹	7
Charges principales, vent et charges additionnelles..... ces dernières comprenant les efforts de freinage, les chocs latéraux, les résistances de frottement, le déversement des appuis, le tassement des piles	16 ¹	8
Assemblages de contreventement, éléments transversaux, poutres de freinage et éléments de suspension	10	5
<i>Charpentes métalliques d'immeubles</i>		
Métal non réceptionné (fers marchands)	12	6
Acier doux.....	14	7

1. Ces valeurs tiennent compte des coefficients de choc.

Lorsque des pièces doivent être calculées à la torsion, il faut remplacer σ_{adm} par l'effort admissible à la torsion.

On recommande, principalement au début, d'étudier par le calcul même les cas les plus simples ; c'est en effet par la pratique du calcul que l'on peut acquérir le sens de la statique et il faut savoir éviter les dispositions de construction qui ne se prêtent pas à la soudure. Souvent même, le calcul seul montrera dans quelle mesure il est possible de réduire l'importance des cordons de soudure, au moyen des cordons discontinus.

Les sections des pièces à assembler doivent être calculées comme en construction rivée. Il ne reste donc à calculer généralement que les cordons de soudure eux-mêmes. Les moments de flexion, de torsion et de cisaillement qui résultent des charges extérieures calculées et qui interviennent dans la détermination des cordons de soudure doivent être calculés d'après les principes bien connus de la statique. Le point le plus important est de déterminer comment les efforts qui résultent des charges extérieures sont transmis aux cor-

dons de soudure et comment ces derniers réagissent sur les différentes parties de la charpente. Les cordons de soudure eux-mêmes doivent être considérés comme des pièces de la charpente, auxquelles s'appliquent les principes connus de la statique.

5. Mode de calcul des assemblages et des joints dans la construction métallique.

Pour obtenir, avec les assemblages et les joints proprement dits, la même sécurité qu'avec les pièces qui les constituent, on recommande fréquemment de déterminer les cordons de soudure en tenant compte des sections des pièces qui constituent l'assemblage (section $F = F_1 + F_2 + \dots$). Soit α le coefficient par lequel on doit multiplier σ_{adm} (d'après 4 — tableau 1), pour obtenir ρ_{adm} (par exemple, $\alpha = 0,5$ pour le cisaillement). On aura :

$$\rho_{adm} = \alpha \cdot \sigma_{adm} = \alpha \frac{\max S}{F} \dots \dots \dots \dots \quad (5)$$

$\max S$ désignant l'effort maximum dans les barres.

Comme on a en construction métallique :

$$\rho_{adm} = \frac{\max S}{F_g} \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (6)$$

F_{schw} désignant la section de la soudure, on en déduit pour la construction métallique :

$$F_g = \frac{F}{\alpha} = \frac{F_1}{\alpha} + \frac{F_2}{\alpha} + \dots \dots \dots \dots \quad (7)$$

dans le cas de barreaux travaillant à la traction.

S'il s'agit d'éléments travaillant à la compression, il suffit de remplacer F par $\frac{F}{\omega}$, ω désignant le coefficient de flambage¹.

6. Prescriptions complémentaires concernant la construction des ponts.

Il faut s'efforcer d'obtenir les mêmes garanties de sécurité pour toutes les parties d'un ouvrage, donc également pour les assemblages soudés. Par suite, il faut calculer ces assemblages non seulement pour les efforts qu'ils auront effectivement à supporter, mais également avec une marge de sécurité par rapport à la section ainsi obtenue.

Pour le calcul des cordons de soudure, dans les ponts, il faut déterminer les maxima et les minima des moments, des efforts tranchants et des charges dans les éléments. Les valeurs qui correspondent à la charge roulante doivent être multipliées, ainsi qu'il est prescrit, par le coefficient de choc φ .

Les valeurs ainsi obtenues doivent être introduites dans les formules suivantes :

$$M = \max M + \frac{1}{2} (\max M - \min M) \dots \dots \dots \quad (8)$$

1. Voir : Vorschriften für Eisenbauwerke. Berechnungsgrundlagen für Eisenbahnbrücken (B. E.). — Berlin, Editeur Wilhelm Ernst und Sohn.

$$Q = \max Q + \frac{1}{2} (\max Q - \min Q) \dots \dots \dots \quad (9)$$

$$S = \max S + \frac{1}{2} (\max S - \min S) \dots \dots \dots \quad (10)$$

dans lesquelles on désigne par :

$\max M$ les valeurs absolues maxima et minima du moment ;

$\max Q$ — — — — de l'effort tranchant ,

$\max S$ — — — — de l'effort dans les éléments du système.

Les valeurs positives et les valeurs négatives doivent être respectivement introduites dans les calculs avec les signes + et —.

Si l'on a, par exemple :

$\max M = 100$ tonnes-mètres,

$\min M = -100$ tonnes-mètres,

c'est-à-dire que le moment, fléchissant reste constant,

on aura :

$$M = 100 + \frac{1}{2} (100 - -100) = 100 \text{ tm.}$$

Si : $\max M = +100$ tm et $\min M = 0$ tm,

on aura :

$$M = 100 + \frac{1}{2} (100 - 0) = 150 \text{ tm.}$$

Si : $\max M = +100$ tm et $\min M = -100$ tm,

on aura :

$$M = 100 + \frac{1}{2} (100 + 100) = 200 \text{ tm.}$$

Dans le cas le plus défavorable, pour lequel les charges variables oscillent entre des limites exactement égales (en valeur absolue), les moments fléchissants, les efforts tranchants et les efforts dans les éléments doivent donc, pour le calcul des cordons de soudure, être considérés comme deux fois plus élevés que dans le cas où ces efforts restent toujours constants. (Cette méthode de calcul des cordons de soudure est donc indépendante du mode de calcul des sections des éléments à assembler.)

Les formules que donne le chapitre 5, dans le cas de la construction métallique proprement dite, peuvent s'appliquer comme suit à la construction des Ponts :

$$\rho_{\text{adm}} = \frac{\max S + 1/2 (\max S - \min S)}{F_g} \dots \dots \dots \quad (6')$$

d'où :

$$F_g = \frac{F}{\alpha} \cdot \frac{\max S + 1/2 (\max S - \min S)}{\max S} \dots \dots \dots \quad (7')$$

lorsqu'il s'agit d'éléments travaillant à la traction.

S'il s'agit d'éléments travaillant à la compression, il suffit de remplacer F par

$$\frac{F}{\omega}$$

S'il s'agit de moments, on introduira M au lieu de S dans les formules.

Les formules (8), (9), (10) doivent tenir compte, pour le calcul des assemblages soudés, des phénomènes de fatigue éventuelle résultant des efforts répétés.

L'effort tranchant admissible dans les cordons de soudure, par suite de l'action des charges principales (tableau 2), atteindrait, dans des diagonales, des valeurs égales, en traction et en compression, qui seraient, par rapport à des charges purement statiques :

$$\rho_{\text{adm}} = 0,5 \cdot 14 \cdot 1/2 = 3,5 \text{ kg. par mm}^2.$$

Dans des assemblages soudés, la résistance aux efforts alternés a atteint, sur la machine d'essai de fatigue, environ 14 kg. par mm^2 , de sorte que le coefficient de sécurité serait encore de :

$$\gamma = \frac{14}{3,5} = 4.$$

Il faut d'ailleurs tenir compte du fait que la charge à laquelle est soumis l'assemblage sur la machine d'essai le fait travailler dans des conditions beaucoup plus défavorables que lorsqu'il s'agit de véritables ponts. A titre d'essai, on a monté des éléments soudés sur des ponts en acier à échelle réduite. L'expérience montrera si les résultats obtenus en soumettant ces ponts eux-mêmes à la machine d'essai de fatigue ne sont pas plus favorables et plus conformes à la réalité.

Si l'on ne peut pas faire coïncider, même en employant des goussets, les axes de gravité des éléments et les axes du système, il en résultera des efforts additionnels dont il faudra tenir compte dans les calculs, sans toutefois que les efforts admissibles puissent pour cela être augmentés.

Les efforts additionnels provoqués par les moments fléchissants tels que

$$M = P \cdot e \quad (\text{fig. 8})$$

dans les soudures latérales et en bout doivent être pris en considération (on suppose à nouveau les sections de rupture probables rabattues sur le plan du gousset).

Si dans les assemblages soudés, les moments d'encastrement qui résultent de l'assemblage des poutres ne peuvent pas être supportés par des plaques entaillées soudées, il faut prévoir des consoles, ou tout au moins des taquets d'appui destinés à supporter les efforts tranchants correspondants. Si ces moments d'encastrement ne peuvent pas être déterminés d'une manière précise, il faudra faire intervenir dans le calcul des assemblages soudés les moments tels qu'ils ont été déterminés pour les calculs de résistance (par exemple, pour un assemblage de poutres transversales sur des poutres principales, il faudra dans toute la mesure du possible, adopter comme moment d'encastrement les $3/4$ du moment fléchissant s'exerçant sur les poutres principales).

S'il s'agit de faire des soudures de renforcement sur des assemblages rivés, il faut s'efforcer de faire supporter aux goussets la totalité de la charge fixe, y compris le poids des pièces de renforcement, les assemblages soudés supportant la totalité de la charge roulante. Si ce n'est pas possible, les assemblages soudés doivent pouvoir supporter au moins les $2/3$ de la charge roulante, le

tiers restant étant à la charge du rivetage. Les soudures de renforcement doivent être disposées de telle sorte que les goussets ne risquent pas d'être disjoints par la chaleur de la soudure.

Dans les ponts qui doivent être renforcés par soudure, il faut veiller à ce que les cordons de soudure soient suffisamment accessibles pour que leur exécution puisse être irréprochable. Le fer forgé des vieux ponts ayant la plupart du temps une structure fibreuse, nous interdisons leur renforcement au moyen de la soudure.

Les essais de KAYSER, BÜHLER et BIERETT ont montré que, dans les ponts renforcés par soudure, les assemblages soudés et rivés ne se répartissent pas la charge d'une manière uniforme.

Ces essais ayant d'ailleurs entièrement porté sur des assemblages rivés qui ont été soudés sans être en charge, on a décidé, aux Chemins de fer allemands, d'effectuer de nouveaux essais en vue de déterminer à quelle répartition de charge on aboutit lorsque les assemblages rivés sont soumis à une charge préliminaire, sous la machine d'essai, avant d'effectuer la soudure. La charge préliminaire adoptée correspond à peu près au poids propre du pont.

IV. Réalisation pratique.

Les sections des éléments et des assemblages doivent se prêter aux particularités propres à la technique de la soudure. Les soudures au plafond doivent être évitées dans toute la mesure du possible.

Dans l'assemblage des poutres par soudure, il faut prévoir des cordons de soudure aussi bien sur les semelles que sur les âmes des poutres. Les axes de gravité des éléments doivent, dans toute la mesure du possible, coïncider avec les axes du système. L'axe de gravité d'une soudure doit, dans la mesure du possible, coïncider avec l'axe de gravité de l'élément à assembler.

Les longueurs des cordons de soudure d'angle qui doivent pouvoir intervenir dans les calculs ne doivent pas être inférieures à 40 mm., cratères d'extrémité non compris. Les cordons de soudure d'angle latéraux des assemblages ne doivent pas avoir une longueur supérieure à 40 a, a désignant l'épaisseur du cordon de soudure.

Les cordons de soudure ne doivent pas être trop groupés à certains endroits. La largeur b des cordons ne doit pas, en général, dans les soudures d'angle, être supérieure à l'épaisseur de la pièce t ; dans les assemblages de pièces dont les épaisseurs sont différentes, cette cote b ne doit pas être supérieure à l'épaisseur de la pièce la plus mince. On ne doit s'écartez de cette prescription que s'il est impossible de faire autrement pour réaliser un assemblage effectivement franc et sûr.

Dans les soudures à entailles soumises à des efforts, la largeur doit être supérieure ou égale à 3 a et au moins égale à 1,5 t pour que les cordons de soudure puissent être disposés tout autour de l'entaille dans des conditions irréprochables et qu'aucun arc ne jaillisse en A. Le plus petit intervalle entre deux entailles voisines, dans la direction transversale, ne doit pas être inférieur à 3 fois l'épaisseur de la pièce.

Les semelles qui travaillent à la compression et pour lesquelles on a :

$$\frac{\text{largeur } b}{\text{épaisseur } t} > 30$$

doivent, outre les cordons d'angle disposés latéralement, comporter au moins une soudure à entaille.

La bonne accessibilité de tous les cordons de soudure doit être étudiée avec soin, dès l'établissement du projet. Les soudures au plafond doivent être évitées dans toute la mesure du possible.

Chaque fois que cela est nécessaire, et surtout pour le montage sur le chantier, il faut prévoir des goujons de montage. Les trous correspondants doivent être disposés de telle sorte que les parties qui travaillent le plus soient aussi peu affaiblies que possible.

Prescriptions particulières aux ponts.

Dans les ponts en treillis, les barres sont en général assemblées sur les membrures au moyen de goussets.

Dans les ponts, les efforts de traction et de flexion ne doivent pas être supportés uniquement par des soudures bout à bout. On peut toutefois faire exception à cette règle en ce qui concerne les pièces secondaires, telles que les consoles supportant les trottoirs.

L'intervalle libre maximum l_0 entre les traits de soudure des cordons discontinus et entre les entailles, dans les soudures à entailles, dans le sens de la longueur, ne doit pas dépasser les valeurs suivantes :

- a) dans les soudures définitives, six fois l'épaisseur de la tôle de la pièce la plus mince ;
- b) dans les soudures provisoires des éléments travaillant à la compression, huit fois l'épaisseur de la tôle de la pièce la plus mince ;
- c) dans les soudures provisoires des éléments travaillant à la traction, dix fois l'épaisseur de la tôle de la pièce la plus mince.

Toutefois, si entre les cordons normaux, on prévoit des cordons plus légers (en congé), ces intervalles pourront être doublés.

Dans les poutres composées, l'intervalle entre les semelles de renforcement ne doit pas être supérieur à 1,30 mètre. Ces semelles doivent être soudées sur les membrures des ailes. Dans les poutres composées de grande hauteur, il est nécessaire de prévoir des pièces de renforcement continues, destinées à éviter les déformations des âmes.

A tous les endroits qui sont appelés à supporter des charges particulières, il faut disposer des pièces de renforcement.

V. Contrôle des calculs par des essais pratiques.

Différents assemblages soudés d'essai ont été effectués à Dresde, suivant la disposition de la figure 11. Ils ont été ensuite soumis à des essais en charge avec des efforts P . Il s'agissait de déterminer la résistance de ces assemblages.

Le moment fléchissant que doit supporter un assemblage est :

$$M = 22,5 P.$$

Si nous supposons (suivant nos règlements) que la section utile du cordon de soudure est rabattue dans le plan d'assemblage, on a pour le moment d'inertie :

$$I_g = 1/12 \cdot 19,2 \cdot (21,2^3 - 20^3) = 2,445 \text{ cm}^4.$$

et pour le moment résistant :

$$W_g = \frac{2,445}{10,6} = 231 \text{ m}^3.$$

La section utile du cordon de soudure est :

$$F_g = 2 \cdot 19,2 \cdot 0,6 = 23 \text{ cm}^2.$$

d'où on obtient, d'après les formules (2) et (4) :

$$\varphi_1 = \frac{M}{W} = \frac{22,5}{231} \cdot P = 0,0974 P$$

$$\varphi_2 = \frac{P}{F} = \frac{P}{23} = 0,0435 P.$$

On en déduit, d'après la formule (4) :

$$\varphi = \sqrt{\varphi_1^2 + \varphi_2^2} = P \sqrt{0,0974^2 + 0,0435^2} = 0,1067 P$$

Pour $\sigma_{adm} = 12 \text{ kg. par mm}^2$ (charpente métallique),

$$\varphi_{adm} = 0,5 \sigma_{adm} = 6 \text{ kg. par mm}^2,$$

on pourrait soumettre l'assemblage à une charge telle que :

$$600 = 0,1067 P_{adm},$$

d'où : $P_{adm} = 5,620 \text{ kg.}$

Comme la rupture s'est produite pour une charge :

$P_B = 28.000 \text{ kg.}$, on a pour le coefficient de sécurité à la rupture :

$$\gamma = \frac{28.000}{5.620} = 4,98.$$

Pour 1 mm^2 de section utile, du cordon de soudure, on a une charge de rupture :

$$P' = \frac{28.000}{2.300} = 12,2 \text{ kg. /mm}^2.$$

Par mesure de comparaison, les poutres ont été soudées non seulement sur les ailes, mais également sur les âmes. La section utile totale de soudure était :

$$F_g = 43,15 \text{ cm}^2.$$

Le calcul donne une charge admissible :

$$P_{adm} = 7.400 \text{ kg.}$$

La rupture s'est produite pour $P = 38.200 \text{ kg.}$, ce qui correspond à un coefficient de sécurité de

$$\gamma = \frac{38.200}{7.400} = 5,15.$$

Sur 1 mm² de soudure, on a une charge de rupture :

$$P' = \frac{38.200}{4.315} = 8,85 \text{ kg./mm}^2.$$

L'assemblage avec soudure simultanée sur les ailes et sur les âmes est donc notablement plus favorable.

Pour pousser plus loin la comparaison, on a soudé aux angles, à l'emplacement des cordons d'angle, des équerres de 50.80.14. La rupture s'est produite pour une charge de 14.500 kg., la charge admissible était de

$$P_{\text{adm}} = 3.050 \text{ kg.}$$

On a donc un coefficient de sécurité :

$$\nu = \frac{14.500}{3.050} = 4,75.$$

Sur 1 mm² de section utile de soudure, on a une charge $P' = 4,5 \text{ kg.}$

Cet assemblage est donc non seulement plus cher, mais également notablement plus mauvais¹.

Le mode de calcul prévu dans nos règlements donne donc une sécurité suffisante.

Zusammenfassung.

Vorteile des Schweissverfahrens gegenüber dem Nietverfahren : Gewichtersparnis, einfache Ausführung. Ältere Brücken, die nicht aus Schweißeisen bestehen und die verstärkt werden sollen, lassen sich oft durch Schweißen leicht verstärken, während eine Verstärkung durch Nieten vielfach nicht mehr wirtschaftlich ist.

Angesichts der Ungenauigkeit beim Einbrand, der Dicke und Länge der Schweissnähte sind verwickelte Berechnungsmethoden nicht am Platze. Näherungsverfahren so, dass die für die Schweissverbindungen zulässigen Spannungen σ_{zul} in ein bestimmtes Verhältnis zu den zulässigen Spannungen der eigentlichen Konstruktion σ_{zul} gesetzt werden. Z. B. Scherspannungen bei Kehlnähten $\sigma_{\text{zul}} = 0,5 \sigma_{\text{zul}}$. Deutsche Vorschriften für die Berechnung und bauliche Durchbildung. Zur Ermittlung der Spannungen in den Schweissnähten denkt man sich die Bruchflächen der Schweissnähte in die Anschluss ebene umgeklappt und berechnet die Flächen, Trägheitsmomente und Widerstandsmomente dieser Bruchflächen in der üblichen Weise. Die damit berechneten Scherspannungen σ_1 werden mit den Biegungsspannungen σ_2 der Schweissnähte zu einer resultierenden Spannung $\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$ zusammengesetzt.

Die durch den Einbrand entstandene Schwächung des Querschnitts wird in der Berechnung des nutzbaren Querschnitts ausser Betracht gelassen. Bei Brücken müssen die Stabkräfte, Biegemomente u.s.w. entsprechend den wechselnden Beanspruchungen nach den Formeln $S = \max S + 1/2 (\max S - \min S)$ u.s.w. erhöht werden. Auf ein gleichmässiges Zusammenwirken der Schweissnähte mit den Nietverbindungen bei zu verstärkenden Brücken kann

1. Voir KOMMERELL. Erläuterungen zu den Vorschriften für geschweißte Stahlbauten, W. Ernst und Sohn, Berlin, 1931, p. 34.

nicht gerechnet werden. Den Nietverbindungen wird nur die ruhende Last, von der Verkehrslast höchstens aber 1/3 zugewiesen.

Bei der baulichen Durchbildung müssen exzentrische Anschlüsse beim Schweißen möglichst vermieden, andernfalls rechnerisch verfolgt werden. Bei Fachwerk-Brücken sollen die Füllungsstäbe grundsätzlich mittels Knotenblechen angeschlossen werden. Außerdem dürfen bei Brücken gezogene Teile nicht durch Stumpfnähte allein verbunden werden. Versuche haben gezeigt, dass mit der Berechnungsweise der deutschen Vorschriften ausreichende Sicherheit bei statischer Beanspruchung erzielt wird. Ob die Sicherheit auch bei dynamischer Beanspruchung ausreichend gross ist, soll durch eingeleitete Versuche noch weiter geprüft werden.

Résumé.

Le procédé d'assemblage permet, par rapport au rivetage, de réaliser les avantages suivants : économie de poids, plus grande simplicité d'exécution. Les anciens ponts qui ne comportent pas d'éléments en fer soudé et qui ont besoin d'être renforcés, peuvent très souvent être renforcés avec facilité grâce à la soudure, tandis que leur renforcement par rivetage ne serait souvent pas plus économique.

Étant donné le manque de précision que la pénétration de la fusion apporte dans les dimensions effectives des cordons de soudure (épaisseur et longueur), il n'est pas opportun d'avoir recours à des méthodes de calcul compliquées. On adopte plutôt des méthodes approchées ; les efforts admissibles dans les assemblages soudés (ρ_{adm}) sont dans un rapport déterminé avec les efforts admissibles dans les éléments de la construction eux-mêmes (σ_{adm}). Par exemple, les efforts tranchants dans les cordons de soudure d'angle seront définis par :

$$\rho_{adm} = 0,5 \sigma_{adm}$$

L'auteur expose les prescriptions allemandes pour le calcul et les méthodes d'exécution. Pour déterminer les efforts dans les cordons de soudure, on suppose les sections dans lesquelles se produit la fracture des cordons rabattus dans le plan de l'assemblage et on calcule les sections, les moments d'inertie et les moments résistants de ces sections de la manière courante. On compose les efforts tranchants calculés ρ_1 avec les efforts de flexion ρ_2 des cordons de soudure, pour obtenir l'effort résultant

$$\rho = \sqrt{\rho_1^2 + \rho_2^2}$$

On ne tient pas compte, dans le calcul de la section utile, de l'affaiblissement que produit, dans la section, la pénétration de la fusion.

Dans les ponts, les efforts dans les éléments, les moments fléchissants, etc... doivent être augmentés dans une proportion qui tient compte des efforts alternés, suivant une formule du type suivant :

$$S = \max S + 1/2 (\max S - \min S)$$

Lorsque l'on renforce un pont comportant des assemblages rivés en employant la soudure, il ne faut pas compter sur une égale répartition des efforts entre les rivets et les cordons de soudure. Il convient de ne faire sup-

porter aux assemblages rivés que la charge permanente, et tout au plus 1/3 de la charge roulante.

En ce qui concerne l'exécution pratique, il faut éviter dans toute la mesure du possible les assemblages décentrés. Si l'on y est contraint, il faut les calculer avec soin. Dans les ponts en treillis, les barres de treillis doivent être, en principe, assemblées au moyen de goussets. En tout cas, les organes qui, dans les ponts, sont soumis à des efforts de traction ne doivent pas être assemblés au moyen de soudures bout à bout seules.

Les expériences ont montré que les méthodes de calcul indiquées dans les règlements allemands donnent une sécurité suffisante pour les efforts statiques. Des essais ultérieurs devront être poursuivis pour déterminer si la sécurité obtenue est suffisante lorsqu'il s'agit d'efforts de nature dynamique.

Summary.

Advantages of welding methods as compared with riveting: Saving in weight, more simple to carry out. Old bridges, which are not made of wrought iron and have to be stiffened, can often be easily stiffened by welding, whilst stiffening by riveting is no longer economical.

In view of the uncertainty in what concerns the efficiency of the penetration, the thickness and length of the welds, complicated methods of calculation are quite out of place. An approximate method consists in taking the admissible stresses for the welded joints ρ_{adm} as a certain ratio of the admissible stresses in the actual structure σ_{adm} . For example, shearing stresses in fillet welds $\rho_{adm} = 0.5 \sigma_{adm}$. German rules for calculations and carrying out constructions: To determine the stresses in the welds, the welding faces of the plates to be welded are imagined as turned into the connecting plane, and the surfaces, moments of inertia and moments of resistance of these surfaces are calculated in the usual manner. The shear stresses ρ_1 thus calculated are combined with the bending stresses ρ_2 of the welds, giving a resultant stress $\rho = \sqrt{\rho_1^2 + \rho_2^2}$.

The weakening of the cross-section caused by the penetration is left out of consideration when determining the useful cross-section. In bridges, the forces in the members, bending moments, etc., in compliance with the varying stresses, are increased according to the formulae $S = \max S + 1/2 (\max S - \min S)$, etc. In bridges which have to be strengthened, it is not possible to reckon on the welded and riveted joints cooperating uniformly in taking the stress. The riveted joints are presumed to take only the dead load, and at the most 1/3rd of the rolling load.

In the constructions, when welding eccentric connections must be avoided as far as possible; if used, they must be tested by calculation. In lattice bridges, the web members shall as a matter of principle be connected by gussets. In addition to that, parts of bridges subject to tension, may not be connected by butt joints alone. Tests have shown that calculation by the German rules ensures sufficient safety in the case of static stress. Whether sufficient safety is ensured for dynamic stress, is a question which must be checked by further tests.