

# Projet et exécution des ouvrages soudés

Autor(en): **Bühler, A.**

Objektyp: **Article**

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

Band (Jahr): **2 (1936)**

PDF erstellt am: **21.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-2932>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

## III b 2

Projet et exécution des ouvrages soudés.

Ausbildung und Herstellung geschweißter Bauten.

Design and Execution of Welded Structures.

A. Bühler,

Sektionschef für Brückenbau S.B.B., Bern.

1. — *Définition et mesurage des contraintes dues à la chaleur et au retrait.*

1° — *Définition des contraintes dues à la chaleur et au retrait.*

Lors de l'exécution des ouvrages soudés, il faut faire spécialement attention aux contraintes dues à la chaleur ainsi qu'aux contraintes de retrait produites ensuite par le refroidissement. Il faut apporter, lors de la confection d'une soudure, une quantité relativement grande de chaleur en un point afin de relier le métal de base et le métal d'apport.<sup>1</sup>

L'échauffement produit un allongement du métal de base qui entoure la soudure tandis que les parties plus éloignées, qui restent plutôt froides, empêchent cet allongement. Dans les environs de la soudure il se produit une compression et un refoulement de la matière, favorisés par l'échauffement, alors que le reste de la section subit des efforts de flexion et de traction et peut même à la rigueur être étiré.

Lors du refroidissement de la soudure et de ses environs, les parties de la barre, éloignées et froides, offrent une résistance opposée à la suppression des efforts de flexion et de traction de telle sorte que pour finir la région de la soudure est principalement sollicitée à la traction et les régions voisines le sont à la compression. La position excentrique d'une soudure par rapport à l'axe de la barre, ou, ce qui arrive, un échauffement irrégulier, peuvent engendrer des variations appréciables ainsi que des perturbations et des modifications dans le diagramme des tensions. On ne peut plus parler alors d'une répartition linéaire des contraintes, spécialement dans la soudure et ses environs.<sup>2</sup>

Dans la soudure elle-même, ainsi que dans la zone de transition il se produit des déformations permanentes. Des parties du métal de base sont d'abord comprimées puis étirées. Les déformations, souvent importantes, qui se produisent lors du soudage, démontrent l'existence de fortes tensions internes.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Wörtmann*: Schweiz. Bauzeitung, 5. XI. 1932. La quantité de chaleur à apporter est de 1150 Kcal par kg de soudure. Cette quantité dépend évidemment du nombre de passes de soudure ainsi que de la masse des pièces à souder.

<sup>2</sup> *Bierrett*: Versuche zur Ermittlung von Schrumpfspannungen. Z.V.D.I. 9. VI. 1934.

<sup>3</sup> *Reinhold & Heller*: Die Schrumpferscheinungen an der elektrisch geschweißten Schlachthofbrücke in Dresden. Bautechnik, 21. X. 32.

Il en est en général de même lorsque des parties de poutre sont assemblées par soudure. En plus des tensions internes dont nous avons parlé, il existe encore d'autres contraintes qui sont provoquées par la résistance aux allongements de la poutre et des barres. Ce point est spécialement important lors du renforcement des ponts.

Il est clair que, dans un tel état de choses, ces tensions dues à l'échauffement et au retrait ne peuvent être déterminées qu'approximativement et pour la raison que ces déformations se trouvent en partie dans le domaine de la plasticité. Il ne faut pas s'étonner dès lors que l'on exige d'un métal à souder une grande possibilité d'allongement, si l'on veut éviter les fissures (fig. 1).

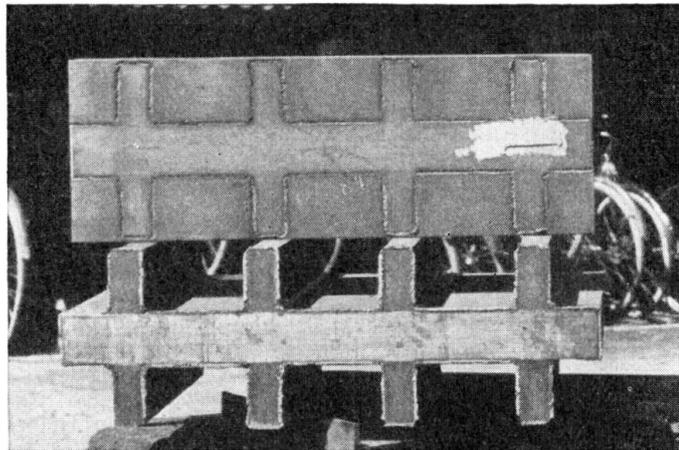


Fig. 1.

Essai non réussi de soudage d'une plaque en acier de rail sur de l'acier St. 37.  
Après le refroidissement les soudures se sont détachées de l'acier à forte  
teneur en carbone.

De même après le soudage on peut soumettre les pièces à un réchauffement ou à un recuit puis les laisser refroidir lentement afin de diminuer ou supprimer les contraintes. Cependant ces deux procédés ne sont que rarement utilisés et même souvent inutilisables dans les petits ateliers.<sup>4</sup> Ce sont pourtant les entreprises de petite et moyenne importance qui se servent principalement de la soudure électrique car les installations nécessaires sont bon marché et vite prêtes.

Dans certains cas, le soudage de pièces épaisses à l'état chaud (100 à 300°) peut présenter de gros avantages.<sup>5</sup> Si cet échauffement n'était pas insupportable pour les ouvriers, le soudage à l'état chaud permettrait de réduire de façon appréciable, les tensions de retrait.

<sup>4</sup> Les tuyaux de la conduite forcée de l'Etzel qui avaient une épaisseur allant jusqu'à 45 mm furent soumis à un recuit à la température de 625° maintenue constante durant 6 h. Ceci devait supprimer les tensions internes produites par le soudage et la mauvaise structure des cordons de soudure (structure de *Widmannstädt*). Les soudures circulaires, effectuées sur le chantier furent aussi soumises à un recuit.

<sup>5</sup> Mitteilungen der *Escher-Wyss A.G.* Nr. 5, mai 1926.

2° — *Installations pour la détermination des tensions dues à la chaleur et au retrait.*

La détermination des *tensions dues à la chaleur* n'a été, à ma connaissance, que rarement exécutée car il est difficile de travailler avec des appareils précis aux environs de la soudure et parce que, par suite de la déperdition de chaleur, l'état de tensions se modifie continuellement et rapidement. Il serait cependant possible de suivre les différents phénomènes qui se produisent dans la barre à souder au moyen d'extensiomètres.

Il est de toute première importance pour l'exécution d'un ouvrage de connaître les tensions de retrait résiduelles après le rétablissement de l'équilibre de température. On peut les déterminer approximativement par les méthodes :

- a) mesurage de l'écartement de deux repères avant et après le soudage,
- b) perçages et mesurages des allongements dans le métal de base avoisinant (Mathar),<sup>6</sup>
- c) emploi des rayons X,<sup>7</sup>
- d) division de l'éprouvette et mesurage des allongements dans les différentes pièces,
- e) procédé du vernis adhérent fragile.<sup>8</sup>

Les procédés a, b, c et e peuvent être utilisés sans détérioration tandis que dans l'emploi du procédé d, l'éprouvette est rendue inutilisable. Le procédé c n'est pas encore très développé et la méthode e ne peut être employée que dans les zones qui ne sont pas fortement chauffées.

Nous avons employé le procédé a car il est simple et peut être utilisé par des personnes qui ne sont que peu expérimentées en la matière.

Aucun de ces procédés ne peut être considéré comme complet. Ils présentent tous l'inconvénient de ne donner aucun résultat suffisant sur les tensions de retrait résiduelles à l'intérieur d'une barre. Même dans le cas de la division de l'éprouvette, on ne peut déterminer avec sûreté la grandeur des tensions internes. Les procédés de mesurage se bornent en général à la détermination des allongements à la surface de l'éprouvette mais ils ne peuvent donner de bons résultats dans la pratique.

Pour mesurer les tensions de retrait, il faut choisir un extensiomètre qu'il ne soit pas nécessaire de laisser fixé aux pièces durant la déformation, mais que l'on puisse appliquer à la surface de la pièce avant et après la déformation.

Il est en général impossible de laisser, durant la déformation, l'extensiomètre appliqué à la pièce auscultée car les données de l'instrument seraient faussées durant le soudage par la chaleur, les coups et les inattentions du soudeur, et l'extensiomètre lui-même pourrait être endommagé.

La condition exigée, à savoir que l'instrument ne doit pas être laissé sur la pièce durant la déformation est remplie par les extensiomètres Système *Meyer* (fig. 2).

<sup>6</sup> *Müllenhoff*: Eigenspannungen in Schweißnähten, Elektroschweißung, cahier 6, 1935.

<sup>7</sup> Röntgenographische Feinuntersuchungen an Brückentragwerken, Schweiz. Bauzeitung, 12. I. 1935.

<sup>8</sup> Procédé de *Portevin*, Génie Civil, 8 II 1934, Maybach, Fabrique de moteurs, Friederichshafen.

L'emploi de ces extensiomètres à application présente encore un autre grand avantage: un seul instrument suffit pour tous les mesurages.

Nous allons décrire l'emploi de ce procédé (cf. fig. 3). La base est donnée par les pointes (1) qui sont introduites dans les deux trous prévus dans la pièce à ausculter. L'extensiomètre qui se compose de deux barres (3) et (4) qui glissent

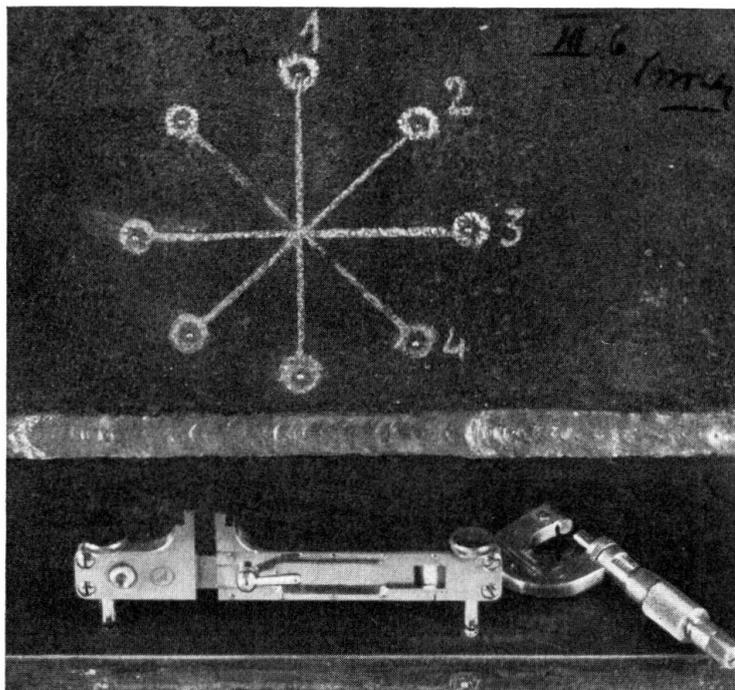


Fig. 2.

Extensiomètre à application système Meyer.

l'une dans l'autre, sera appliqué avant et après la déformation. Après l'introduction des pointes dans les trous on fixera les deux barres au moyen de la vis (5) et l'on mesurera la distance des mâchoires (6) au moyen d'un micromètre. Après quelques exercices on peut obtenir une précision de 1 à 2/1000 mm.

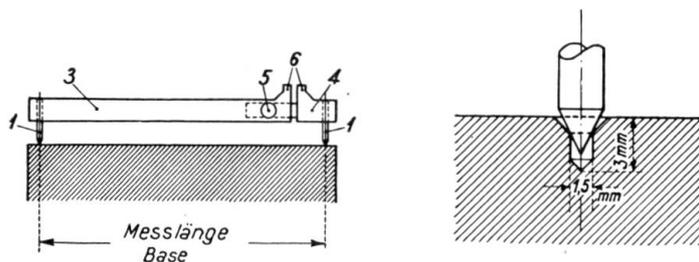


Fig. 3.

Concerne le mode de mesurage avec l'extensiomètre à application.

A dessein l'on a pas voulu utiliser un micromètre à cadran afin de ne pas introduire une nouvelle erreur à contrôler. Pour l'examen de cet extensiomètre on emploie une barre étalonnée. La conservation des petits trous peut être assurée d'une façon simple et durable par un bon graissage et le collage d'une bande.

## II. — Mesures exécutées.

## 1° — Soudage de semelles sur des profilés de laminage.

On mesura en 1929 les allongements, en différents points, de deux gros profilés DIR 100 dont les membrures inférieures devaient être renforcées par une semelle de  $260 \times 20$  mm. Ces profilés étaient destinés à la construction de la dalle en béton armé du passage sous-voies de 20 m de portée situé à la rue Voltaire à Genève.

On constata que les membrures supérieures, qui n'étaient pas directement influencées par le soudage étaient soumises, aux 5 points auscultés, à une

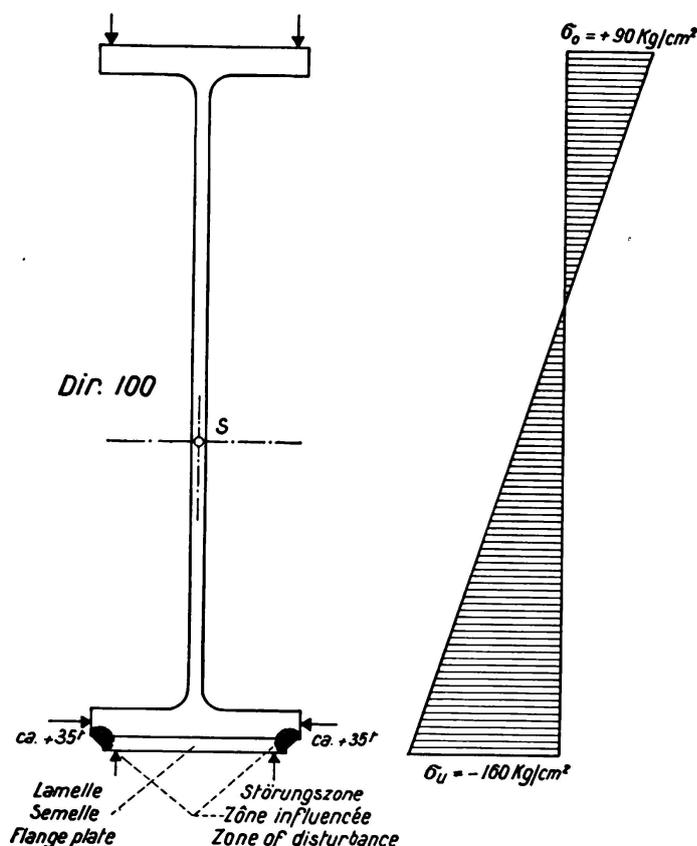


Fig. 4.

Zone détériorée des poutres du passage sous-voies de la Rue Voltaire à Genève.

tension moyenne de  $+90 \text{ kg/cm}^2$ . Il en résulte qu'une force de env. 70 t doit agir le long des deux cordons de soudure, ce qui signifie que par suite de l'exécution des soudures d'angle, c'est-à-dire par suite de l'échauffement et du retrait, la soudure ainsi que le métal environnant se raccourcit de telle sorte que l'on a entre les zones influencées et les zones non influencées une force coercitive de 35 t pour chaque soudure (fig. 4).

Il est clair que les zones influencées sont aussi soumises à de gros efforts de traction et que lors d'un essai de fatigue elles seront vite fendillées ce qui entrainera rapidement la rupture de toute la poutre.

Les mesures d'allongements dans les environs des soudures d'angle donnent des compressions moyennes de  $160 \text{ kg/cm}^2$ , ce qui correspond approximativement

à deux forces de 35 t. Il n'est pas certain que les mesures exécutées aux environs des soudures d'angle ne se trouvent pas elles-mêmes dans la zone influencée, ce qui signifierait que les tensions de compression obtenues sont trop petites.<sup>9</sup>

Les mesures effectuées au moyen de thermoéléments sur les poutres et les semelles lors de l'exécution du premier cordon donnent le diagramme représenté à la fig. 5 qui fait ressortir le gros effet local de la chaleur.

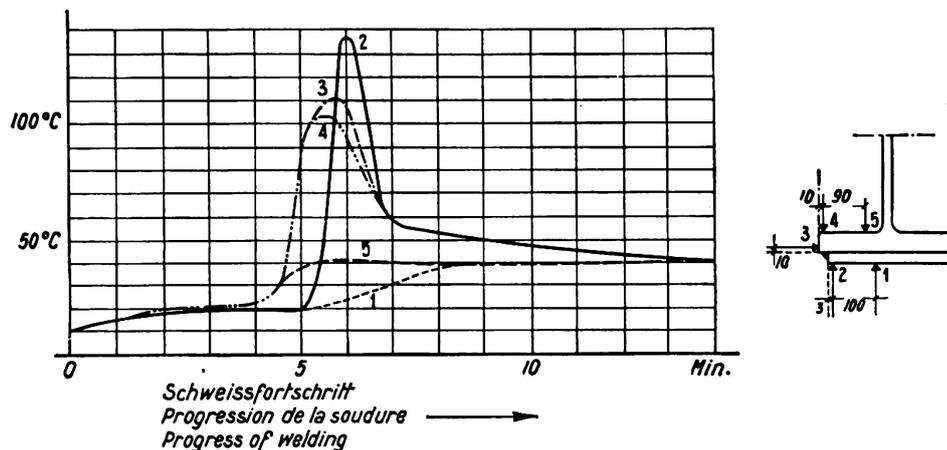


Fig. 5.

Mesures effectuées avec des thermoéléments sur les poutres du passage sous-voies de la Rue Voltaire à Genève.

## 2° — Construction d'un pont-rails à âme pleine.

Lors de la construction, en 1934, du premier pont-rails à âme pleine soudée, de la ligne Beinwil-Reinach, on effectua différentes mesures à l'atelier afin de déterminer les tensions de retrait. On mesura en différents endroits les allongements engendrés par l'exécution des soudures d'angle (fig. 6).

Les mesures effectuées permettent de dire que la force coercitive doit être de 30 à 60 t, ce qui représente dans les extrémités des semelles ( $- 350 \times 45$  et  $- 350 \times 30$ ) des sollicitations moyennes de 200 à 450 kg/cm<sup>2</sup>. On ne put observer aucune répartition régulière des allongements dans l'âme. On peut l'expliquer en considérant le fait que la chaleur se répand principalement dans les semelles et que très peu dans l'âme. Il faut encore ajouter que l'âme relativement mince peut facilement subir de grosses déformations. De toute façon l'âme qui n'est influencée par aucune autre soudure peut très bien subir des tensions de compression locales très fortes (jusqu'à 1700 kg/cm<sup>2</sup>). Les mesures du raccourcissement total de la poutre ont données 0,022 cm/m, ce qui correspond à une tension de

$$\frac{0,022}{100} \cdot 2\,150\,000 = 430 \text{ kg/cm}^2$$

et qui coïncide avec les plus grandes forces coercitives données plus haut. Lors de la construction d'un pont pour la manoeuvre des aiguilles on put déterminer

<sup>9</sup> Bierett: Versuche zur Ermittlung der Schrumpfspannungen in geschweißten Stumpfnahtverbindungen. Conférence présentée à la Commission pour la technique de la soudure, V. d. I. 1934.

un retrait de  $1^0/00$ , ce qui correspond à une tension moyenne dans la poutre de  $2150 \text{ kg/cm}^2$ .

Dans les zones influencées, les efforts de traction qui font équilibre aux efforts de compression peuvent évidemment atteindre de très hautes valeurs. Si l'on évalue la surface de cette zone à  $20\text{--}25 \text{ cm}^2$ , il en résulte que la soudure et le métal avoisinant sont sollicités jusqu'à la limite d'écoulement et même au dessus.

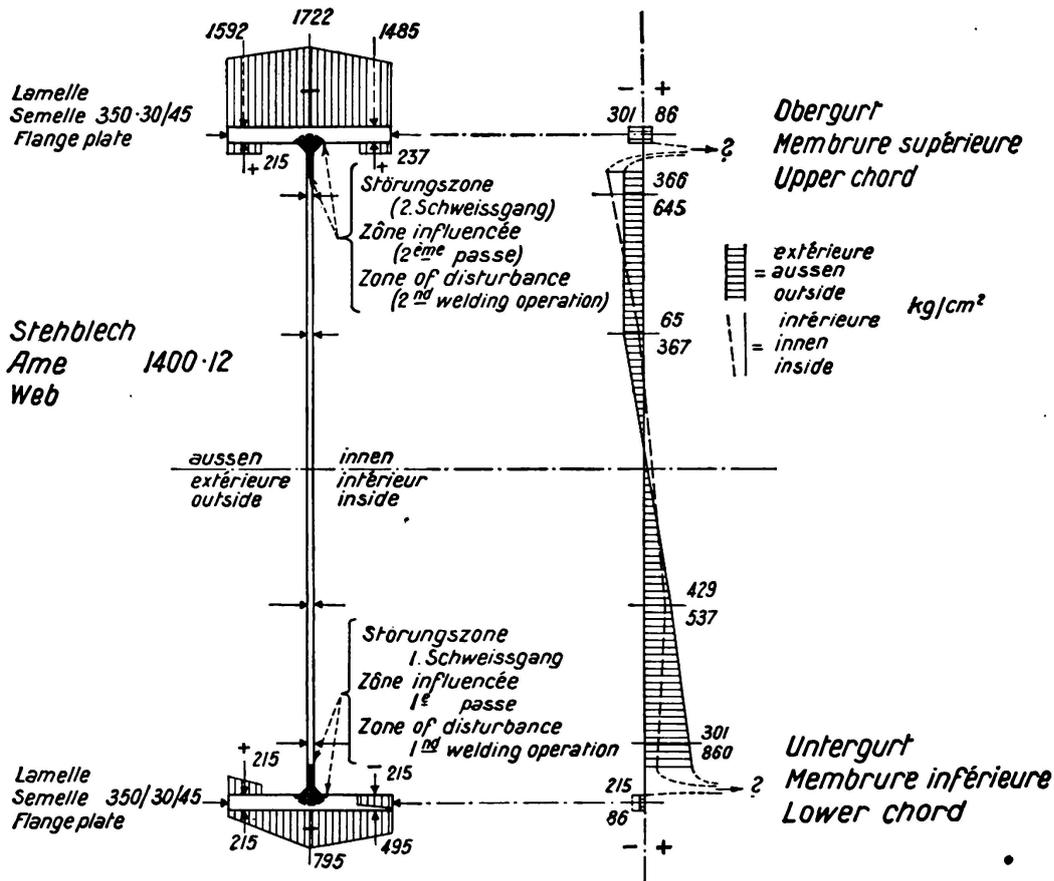


Fig. 6.

Mesures des contraintes de retrait sur un pont à âme pleine de la ligne Beinwil-Reinach. (Résultats obtenus dans une section).

Le danger de fissuration de la zone influencée lors des essais de fatigue est plus faible lorsque la soudure est entourée de plusieurs côtés par du métal non influencé que dans le cas d'une soudure d'angle de bord. On peut ainsi expliquer le bon comportement aux essais de fatigue des poutres soudées du type que nous venons de décrire.

3° — Renforcement d'un pont en treillis en fer puddlé.

Lors du renforcement, en 1934, d'une série de ponts en fer puddlé, semblablement constitués, de la ligne du Brünig (Lucerne-Interlaken) nous avons voulu déterminer d'une façon approximative l'influence de soudures exécutées sur place. Pour cette raison, nous avons effectué, 5 mois après l'exécution des soudures, de nouvelles mesures aux mêmes endroits afin de savoir si, en cours

de service, on obtenait la compensation dont on a souvent fait état, des forces dues au retrait.

C'est d'abord à la membrure inférieure, à la membrure supérieure et au croisement des diagonales de trois panneaux ainsi qu'à deux montants que l'on a déterminé les tensions de retrait engendrées par le soudage de renforcements. A chaque extrémité de ces barres on disposa 3 à 4 points de mesurage sur l'ancienne construction. L'on exécuta aucune mesure sur les renforcements car ces pièces sont soumises lors de l'adaptation, à de fortes tensions qu'il n'est pas facile de mettre à part. On peut cependant affirmer que de telles mesures auraient été très intéressantes.

Les mesures (fig. 7) ont démontré que même les barres auxquelles on avait rien soudé étaient mises sous tension par suite du raccourcissement des barres,

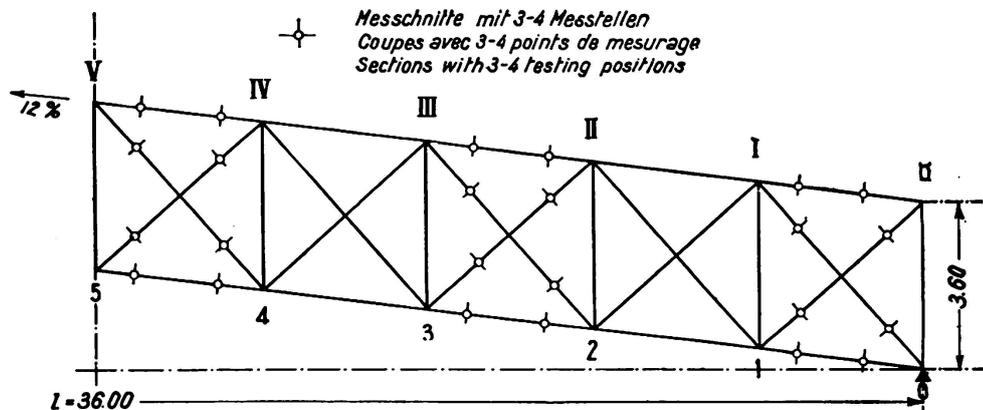


Fig. 7.

Système et points de mesurage des ponts en fer puddlé de la ligne du Brunig.

engendré par le soudage, et par la disposition hyperstatique du treillis. Les tensions moyennes au centre de gravité, obtenues en faisant la moyenne des valeurs mesurées aux deux extrémités, sont pour des tensions maxima de 840 kg/cm<sup>2</sup> dans les arêtes, les suivantes:

*barres non renforcées*

|                           |      | première mesure | seconde mesure*) |
|---------------------------|------|-----------------|------------------|
| barre de la membrure sup. | 0—I  | — 47            | — 113            |
| » » » » inf.              | 0—1  | — 40            | — 75             |
| diagonale tendue          | 0—1  | + 84            | + 133            |
| » »                       | II—3 | + 221           | + 265            |
| montant                   | 1—I  | — 304           | — 250            |
| »                         | 2—II | — 461           | — 380            |

La répartition des tensions dans les barres non renforcées (comme d'ailleurs dans les barres renforcées) est très compliquée. D'après le tableau, les membrures et les montants sont sollicités à la compression et les diagonales tendues à la traction.

Il n'est pas facile de calculer exactement les forces dues au soudage en partant des allongements. Les mesures montrent dans ces barres de fortes tensions de

retrait et de flexion. Les tensions moyennes au centre de gravité (moyenne des deux extrémités) ont les valeurs suivantes :

|                           |  | <i>barres renforcées</i> |  | première mesure | seconde mesure * |
|---------------------------|--|--------------------------|--|-----------------|------------------|
| barre de la membrure sup. | II—III   |                          |  | — 127           | — 82             |
| » » » » »                 | VI—V   |                          |  | — 300           | — 162            |
| » » » » inf.              | 2—3  |                          |  | — 165           | — 220            |
| » » » » »                 | 4—5  |                          |  | — 152           | — 150            |
| valeurs évaluées          | {<br>diag. comprimée<br>» »<br>» »<br>diag. alternativement<br>tendue et comprimée | 0—I                      |  | — 400           | — 400            |
|                           |  | 2—III                    |  | — 500           | — 500            |
|                           |  | 4—V                      |  | — 500           | — 500            |
|                           |  | IV—5                     |  | — 600           | — 600            |

Après 5 mois de service les allongements furent mesurés (2<sup>ème</sup> mesure \*) et il fut déterminé que des changements s'étaient produits. On peut remarquer que ces changements étaient soit des diminutions, soit des accroissements de tension. Il est impossible d'établir une règle en se basant sur les résultats obtenus. Il nous paraît prématuré d'affirmer qu'avec le temps il se produit une égalisation des efforts dans la zone influencée.

#### 4° — Construction d'un pont-rails à âme pleine courbe.

En 1936 on construisit près de Baden/Oberstadt un pont-rails soudé de 27 m de portée. Ce pont est courbe et fortement biais. Les traverses reposent directement sur les poutres maitresses à âme pleine. Ce pont fut calculé comme un système special en tenant compte de l'obliquité. Pour cette raison les contreventements supérieurs et inférieurs sont très forts. Les réactions d'appuis sont négatives aux extrémités en pointe et il fallut par conséquent ancrer les appareils d'appui.

Dans un panneau d'une des poutres maitresses on ménagea des pointeaux et après le soudage du cordon d'angle entre la semelle et l'âme, on mesura les déformations de l'âme et quelques allongements de l'âme et des semelles (fig. 8 et 9). Les résultats furent les suivants :

Les deux membrures sont sollicitées à la compression. Cette compression est plus faible dans la membrure inférieure qui fut soudée la première, en moyenne 325 kg/cm<sup>2</sup>, car cette membrure fut déchargée par le soudage de la membrure supérieure. La tension dans la membrure supérieure est en moyenne de 675 kg/cm<sup>2</sup>.

Dans l'âme on a constaté des tensions très élevées allant jusqu'à 950 kg/cm<sup>2</sup>.

Lors du soudage des semelles sur les âmes on constata un fait très grave. On souda d'abord les tôles de gousset des contreventements sur les membrures et ensuite seulement on souda les membrures aux âmes. Du fait que les contreventements sont rivés, les tôles de gousset ont un grand nombre de trous. Lors d'un contrôle plus minutieux on constata dans quelques goussets des fissures passant par les trous. Les mesures d'allongements firent ressortir l'influence de la forte excentricité des forces agissant sur ces tôles qui étaient soumises à des efforts de traction importants.

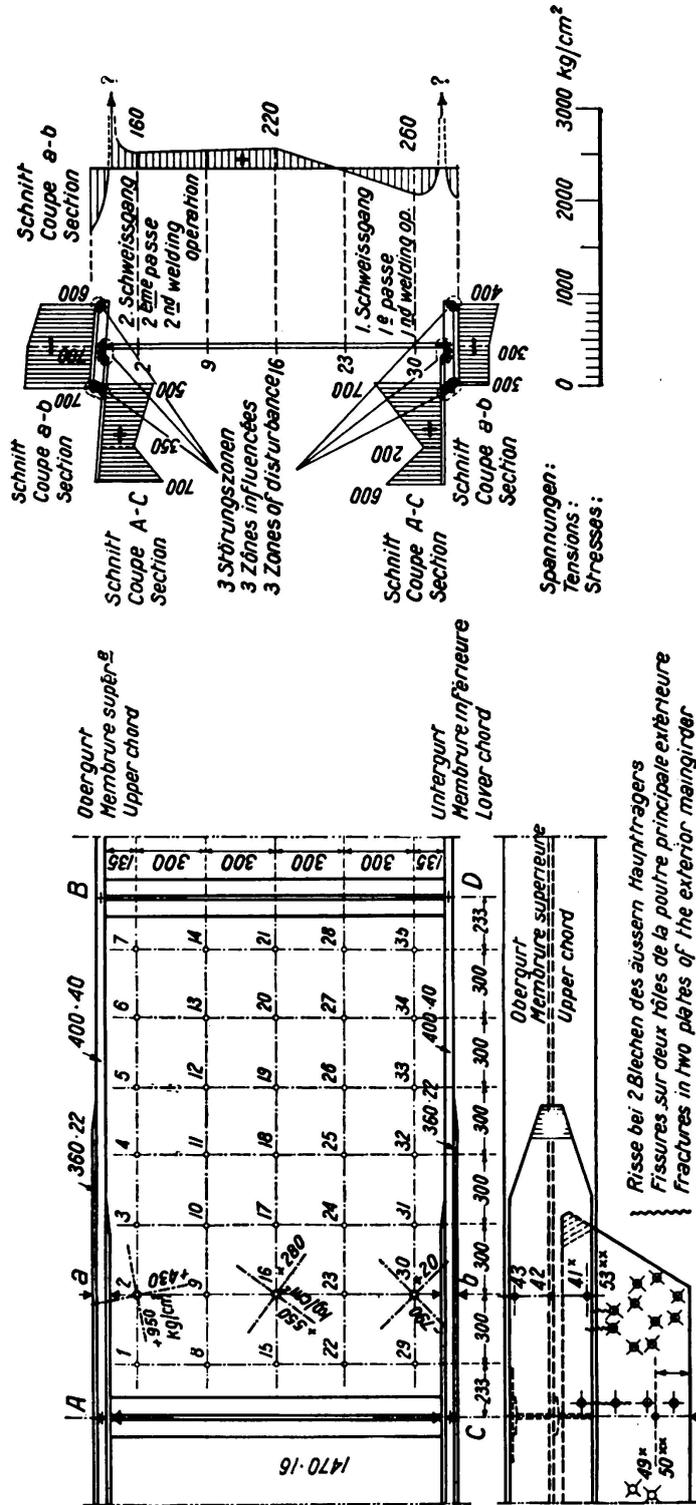


Fig. 8.

Points de mesurage et représentation des contraintes de la poutre-maitresse interne.

Les déformations de l'âme étaient très importantes, ce qui n'est pas étonnant si l'on tient compte des tensions dont nous avons parlé. La plus grande déviation était de 2,9 mm et du côté de la membrure inférieure qui fut soudée la première. Dans cet état, l'autre arête de l'âme n'était qu'imparfaitement fixée par des soudures d'attache.

Les tensions de retrait dans les membrures sont aussi grandes dans ce cas car il faut tenir compte non pas seulement d'une soudure mais de trois à chaque membrure. Il en résulte que l'on a trois zones influencées qui sont soumises aux forces de traction provenant du retrait et qui provoquent dans la poutre une forte compression.

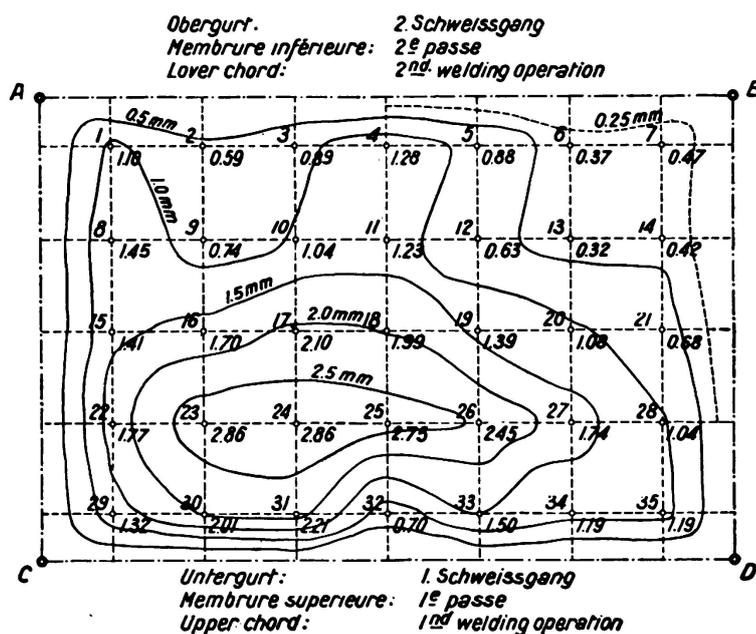


Fig. 9.

Contraintes de retrait lors de l'exécution d'un pont-rails courbe à âme pleine.  
 Déformation de l'âme. Courbes d'isoflexion.

##### 5° — Considérations sur les mesures exécutées.

En se basant sur les résultats, que l'on ne peut considérer comme favorables, des mesures dont nous venons de parler, on peut affirmer qu'il reste encore beaucoup à faire pour mettre au clair la question des tensions dues à la chaleur et au retrait. Les contraintes engendrées par le soudage sont très grandes et peuvent dans certains cas mettre en danger la sécurité d'un ouvrage sollicité à des efforts dynamiques.

Il serait de toute première importance pour la construction des ouvrages soudés, de posséder des résultats objectifs et exacts de mesures systématiques des tensions dues à la chaleur et au retrait, exécutées sur différents profilés et poutres afin de pouvoir se faire une idée, lors de l'établissement du projet, des tensions supplémentaires qui sont engendrées par le soudage.

Il serait très indiqué de rechercher les déformations d'un fer plat chauffé ou refroidi irrégulièrement ainsi que l'influence de soudures de différentes grandeurs déposées centriquement et excentriquement sur un tel fer.

Il faudrait encore faire des essais sur des fers plats de différentes sections reliés par des cordons longitudinaux et pour terminer sur des profils combinés tels que des poutres et des barres avec et sans raidisseurs. Il faudrait attacher la plus grande attention à la détermination de la zone influencée.

Selon moi on pourrait ainsi acquérir des résultats très intéressants et contrôler les deux opinions opposées, à savoir, s'il est plus exact de souder avec des électrodes minces ou épaisses et quel processus de soudage présente le plus d'avantages.

Aussi longtemps que les éprouvettes ne seront pas détériorées, elles seront à essayer statiquement et dynamiquement.

### III. — *Conformation des ouvrages soudés.*<sup>10</sup>

#### 1° — *Résistance statique et résistance à la fatigue des pièces soudées.*

Celui qui a vécu la période d'introduction ainsi que celle assez troublée du développement de la construction des ouvrages soudés, se rappellera certainement que l'on estimait une électrode aux résultats de l'essai ordinaire de traction. A l'heure actuelle la plupart des électrodes employées dans l'exécution des soudures bout à bout atteignent lors des essais statiques la résistance du matériau et la dépassent même suivant la forme de l'éprouvette. La condition de résistance est devenue une question de forme de l'éprouvette.

Ce fut une véritable désillusion lorsque l'on eut connaissance de la résistance aux efforts dynamiques des assemblages soudés. On reconnut bientôt que non seulement le métal d'apport déterminait la capacité de résistance des cordons de soudure mais aussi la disposition (soudure bout à bout et soudure d'angle, grandeur et intensité de la zone influencée), l'exécution (électrodes minces ou épaisses, entailles) et la forme (cordons normaux, en congé ou bombés). Ces trois points de vue ne sont pas encore suffisamment pris en considération par les intéressés. La cause en est aux publications sur les essais effectués, qui ne donnent pas les conditions dont nous venons de parler de telle sorte que l'on ne peut en évaluer l'importance.

On peut se demander pour terminer s'il ne serait pas possible de trouver des baguettes dont la composition permettrait d'exécuter une zone de transition plus favorable et empêcherait la formation d'entailles.

Malgré la connaissance d'une quantité inimaginable de résultats d'essais, il est très difficile, si ce n'est impossible, de se donner une courbe de *Wöhler*, pour les différentes limites de tension et manières de sollicitations, de laquelle on puisse tirer avec exactitude les diagrammes des tensions admissibles dans la représentation de *Goodmann*<sup>11</sup> généralement employée. Ces diagrammes de tension varieront encore avec le nombre d'alternances choisi. Dans ce cas encore la forme de la section a une influence.

Alors que deux à trois millions d'alternances correspondent à un temps de service relativement long pour les poutres maitresses des grands ponts, cette

<sup>10</sup> Die elektrische Schweißung im schweizerischen Stahlbau. Congrès international des constructions métalliques, Liège 1930. Ossature métallique 1935, n° 11.

<sup>11</sup> *Dustin*: Considérations sur l'endurance des assemblages soudés. Revue universelle des mines, décembre 1935.

valeur n'est que restreinte pour les pièces du tablier. Il en résulte que l'on pourrait étudier ces rapports beaucoup mieux que jusqu'à présent. Ce serait un domaine intéressant pour les Institutions d'essai des matériaux que d'exécuter en collaboration des essais systématiques qui permettent de déterminer d'une façon complète les résistances fondamentales des matériaux. Il ne serait pas nécessaire d'essayer à côté des soudures bout à bout les joints en croix et les soudures d'angle appliquées à couvre-joints car ces différentes soudures sont mauvaises dans les assemblages tendus et ne sont pas employées dans la pratique. Il serait beaucoup plus souhaitable de faire des essais sur des reproductions de parties d'ouvrages, c'est-à-dire de forme correspondant à la réalité. Le dimensionnement des éprouvettes devrait être tel que l'on puisse déterminer très exactement les résistances qui sont employées dans la pratique (traction, compression, cisaillement, flexion, torsion, influence des formes de la section). Il faut encore déterminer exactement la *qualité d'exécution de la soudure*.<sup>12</sup>

Il faut encore remarquer qu'il serait nécessaire de faire des essais non seulement sur des soudures de joints ou d'assemblages mais aussi sur l'effet, suivant la grandeur et la forme, de soudures appliquées à une tôle continue dans les assemblages simples comme par exemple dans le cas de raidisseurs sur une poutre à âme pleine, de goussets de contreventements sur les membrures, etc. Le contrôle des coefficients de forme importants devrait être fait.

Pour démontrer que par exemple les joints en croix d'assemblages tendus ne sont pas mauvais parce que la soudure a été plus ou moins bien faite, nous avons fait exécuter des essais sur une éprouvette soudée et aussi sur une éprouvette de même forme coupée dans une seule tôle. Alors que dans les essais statiques les résultats sont plus défavorables pour l'éprouvette soudée, cette différence disparaît dans les essais au pulsateur, ce qui démontre que ce type d'assemblage résiste en principe mal à la traction.<sup>13</sup> On peut en démontrer de même pour les éprouvettes assemblées avec couvre-joints soudés frontalement ou latéralement, ce qui est souvent donné comme essai déterminant dans les normes.

## 2° — *Formes de soudures.*

Pour mettre au clair les quelques questions énoncées plus haut, nous avons recherché, depuis quelques années, l'influence de la forme des soudures sur la résistance des assemblages et des barres. Pour étendre cet exposé nous parlerons aussi des essais effectués sur *l'influence de la position et de la forme des soudures d'angle déposées sur de l'acier 37 dans les assemblages de raidisseurs, de nervures, etc.*

Le programme des essais fut établi en juin 1934. On a prévu de rechercher l'influence, sur des fers plats sans joint, de 15 mm d'épaisseur, de soudures d'angle servant à fixer des raidisseurs et des renforcements. Ces essais furent

<sup>12</sup> Thum: Zur Frage der Formziffer: Z.V.D.I., 26. X. 1935.

<sup>13</sup> Les résultats sont ramenés aux surfaces de contact des soudures

|   |                |         |                    |
|---|----------------|---------|--------------------|
| { | essai statique | 22 à 26 | kg/mm <sup>2</sup> |
|   | P/2 : P        | 14      | »                  |
|   | 0 : P          | 10      | »                  |

cf. Rapport du 25 IV 1934.

effectués pour les trois types de renforcements et les trois types de soudures représentés à la fig. 10.

L'exécution exacte de la forme des soudures a présenté quelques difficultés. Afin de pouvoir comparer entre eux les résultats des essais, les soudures durent être usinées en quelques endroits. Après quelques essais préliminaires on entre-

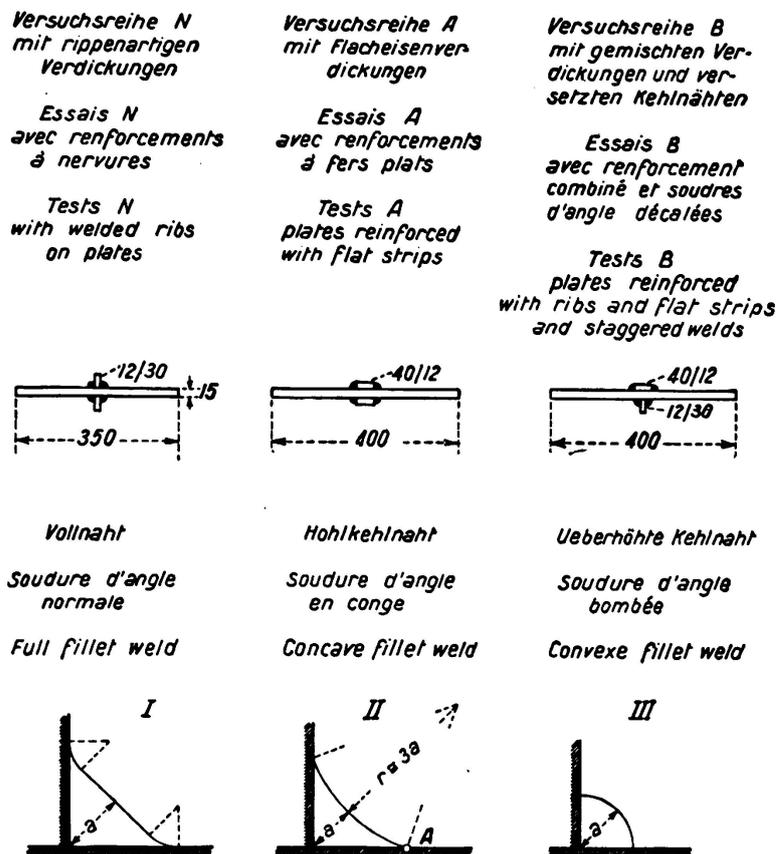


Fig. 10.

Types de renforcement et formes de soudures sur des barres sans joint.

prit des essais de fatigue à la traction pour déterminer la résistance aux efforts répétés non alternés variant de 0 à P et entre P et P/2. (Rapport du 14 avril 1936.)

Dans la résistance à la fatigue aux efforts répétés non alternés, 50 à 80 % de la surface de rupture peuvent être attribués à la fatigue et 50 % au maximum lorsque l'effort varie entre P et P/2.

Si l'on reporte les valeurs limites dans le diagramme des  $\sigma_0/\sigma_u$ , il s'en suit que la résistance aux efforts répétés non alternés pour une barre sans joint et pour un nombre d'oscillations de 1 million est de:

|                                |           |                      |
|--------------------------------|-----------|----------------------|
| forme de soudure I (normale)   | 15        | kg/mm <sup>2</sup>   |
| forme de soudure II (en conge) | 17 à 18,5 | kg/mm <sup>2</sup>   |
| forme de soudure III (bombée)  | 13        | kg/mm <sup>2</sup> . |

Si l'on usine la soudure de forme II, la résistance aux efforts répétés non alternés croit un peu, de telle sorte que la deuxième valeur indiquée est valable dans ce cas. De ces essais on peut tirer les conclusions suivantes:

La rupture à la fatigue part d'une extrémité de la soudure. La position des soudures d'angle, l'une en face de l'autre ou décalées, s'est révélée d'importance secondaire. La forme du renforcement ne joue aucun rôle. Les causes de la diminution de la résistance de la barre sans joint sont les suivantes: déviation des lignes de force, localisation des tensions à la surface des extrémités de la soudure, formation d'irrégularités au même endroit, modification de structure et tensions de retrait.

La résistance à la fatigue de l'acier 37 est fortement influencée par la forme de la soudure. Un raccord doux de la soudure à la barre a probablement des conséquences favorables. L'usinage des soudures améliore encore la résistance à la fatigue. Lorsque l'on a affaire à des sollicitations dynamiques il faut absolument éviter les soudures bombées.

Autant que possible il faut adapter la forme de la soudure à son but; il ne faut pas oublier dans les calculs, que la résistance à la fatigue de pièces sans joint sollicitées à la traction n'est que de  $15 \text{ km/mm}^2$  dans les régions des soudures et n'atteint que le 70 à 80 % de la valeur d'une barre trouée d'un assemblage rivé. Lorsque le congé est bien exécuté, une telle soudure peut atteindre la résistance aux efforts répétés non alternés d'une bonne soudure bout à bout (16 à  $18 \text{ kg/mm}^2$ ). Nous avons ainsi montré l'influence d'une soudure déposée sur une pièce sans joint ainsi que l'importance du coefficient de forme.

Lors d'une autre série d'essais, une soudure en congé résista mieux qu'une soudure bombée beaucoup plus forte, ce qui montre toute l'importance de la forme des soudures. Des soudures d'angle concaves de volume de 25 à 40 % plus petit donnent des résultats peu inférieurs à ceux des soudures normales.

### 3° — *Formes de construction.*

On peut aujourd'hui considérer comme certain que les ouvrages soudés subissent une réduction de la résistance à la fatigue par suite des tensions de retrait, des irrégularités et des modifications de structure engendrées par l'exécution des cordons de soudure. La conséquence en est un accroissement de matériau. Il en résulte que les applications de la soudure peuvent être réparties en classes caractérisées par la résistance à la fatigue.

Ces classes peuvent correspondre aux trois domaines d'application suivants: charpentes, ponts-route et ponts-rails.

Les charpentes sont en général peu exposées aux sollicitations dynamiques bien que les grues, les machines, etc. engendrent des oscillations et des trépidations. Les ponts-route sont déjà plus exposés à la fatigue car l'influence des camions se fait de plus en plus sentir. Viennent ensuite les ponts-rails sur lesquels la vitesse et la grandeur des alternances de tension ont une grosse influence.

Quoique dans les prescriptions fédérales de 1935 il soit tenu compte de ces différences, par l'introduction de charges et de leurs coefficients de choc dans les bases servant au calcul des tensions admissibles, on ne peut pas montrer à première vue que la durée pendant laquelle les alternances acquièrent leur valeur critique n'est pas atteinte et que dans la troisième classe, les ponts-rails, les soudures doivent être exécutées de la façon la plus soignée et qu'il faut choisir les meilleures formes de soudure et de construction. Il ne faut pas exiger le bon marché et des dispositions «usuelles» et la marge qui est ménagée pour

la sécurité ne doit pas être négligée. Le fait qu'une construction tient ne donne aucune confirmation de la marge de sécurité. Cette dernière peut être totalement insuffisante sans que les intéressés puissent observer un indice quelconque de la faiblesse de l'ouvrage.

La place nous manque pour traiter plus largement la question des formes de construction. L'auteur a parlé plus en détails de cette question dans l'article cité ci-dessous.<sup>14</sup>

Il faudrait appliquer les principes suivants :

- a) Il ne faut négliger aucun moyen de réduction des cordons de soudure et de leur section.
- b) On peut éviter une accumulation de tensions dues à la chaleur et au retrait en prévoyant l'exécution simultanée de plusieurs soudures. Les soudures doivent être entourées de métal non influencé.
- c) Autant que possible il faut employer les soudures bout à bout dans les joints et les placer aux endroits peu sollicités. Les matériaux destinés au soudage sont à réceptionner très soigneusement, surtout au point de vue des fissures assez fréquentes à la surface et aux bords des profilés, fissures qui peuvent avoir des conséquences très fâcheuses.
- d) Lorsque l'on doit exécuter un assemblage perpendiculairement aux lignes de force d'une barre (assemblage des longrines aux entretoises, des entretoises aux poutres maitresses, des contreventements aux membrures, etc.) il faudrait éviter toute transition brusque. Il faut arrondir les angles et usiner soigneusement les soudures.
- e) Il faut éviter les parties de cordons intérieurement non soudées. Au lieu des cordons d'angle il est à recommander l'emploi de cordons en K qui permettent d'exécuter une soudure pénétrante.
- f) Il faut éviter les assemblages excentriques, comme dans les constructions rivées.
- g) Il faut s'abstenir d'employer simultanément les assemblages rivés et soudés, car il faut auparavant établir des règles en tenant spécialement compte des apparitions de fatigue.
- h) Le retrait atteint 1 à 2 mm dans les joints bout à bout et peut atteindre  $1 \frac{0}{00}$  dans les constructions de poutres avec raidisseurs.

L'application soigneuse de ces principes permettra d'éviter des tensions coercitives.

#### IV. — Exécution des ouvrages soudés.

##### 1° — Généralités.

On croit souvent que la construction des ouvrages soudés est plus simple que celle des ouvrages rivés et que l'adaptation du personnel et des installations d'atelier est simple. Cette conception est fautive lorsqu'il s'agit de soudures à haute résistance exigées pour les ouvrages soumis à de fortes sollicitations

<sup>14</sup> Die Schweiß- und Schneidverfahren im Stahlbau auf dem Gebiete des Eisenbahnwesens, Abschnitt Hoch- und Brückenbau. Rapport présenté au Congrès de l'acétylène, Londres 1936.

dynamiques. Le calcul, le projet, le dessin, etc. ne demandent pas moins de travail lorsque l'on procède avec exactitude. Il faut encore remarquer que les ouvrages soudés doivent être exactement calculés comme systèmes de l'espace car ils ne possèdent pas la propriété des ouvrages rivés de décharger les parties en danger par glissement des rivets d'assemblage. De toute façon il faut observer les règles établies, dans les soudures qui ne sont pas sollicitées dynamiquement, en tenant compte d'une part de la formation des intéressés et d'autre part du fait que les soudures doivent être exécutées avec le plus grand soin à cause des conséquences défavorables qui peuvent résulter d'une mauvaise exécution.

### 2° — *Contrôle des installations, réception des électrodes.*

Lorsque l'on se décide pour une construction soudée, on ne doit pas s'éviter la peine de contrôler l'installation de l'atelier qui s'offre à exécuter le travail. On se fera accompagner d'un ingénieur qui connaît le domaine de l'électricité et qui contrôlera les connexions et la capacité des conduites des installations de soudage (conduites, câbles, transformateurs, prises de terre, etc.). Une installation pratique et sûre pour le réglage par le soudeur de l'intensité de courant est de grande importance pour que la baguette à souder fonde suffisamment et régulièrement. Il ne faudrait confier des travaux de soudage importants qu'à des ateliers pouvant subir un contrôle sévère et qui peuvent garantir que leurs installations seront maintenues en bon état.

Il est en outre très important que l'atelier de soudage possède les grues et les dispositifs rotatifs nécessaires afin de pouvoir exécuter les soudures dans la position la plus favorable, ce qui est nécessaire pour l'obtention de formes appropriées.

Sur le chantier il faut limiter l'emploi des soudures au plafond, à la reprise à l'envers de la racine des soudures en V.

Un autre point pour le contrôle du travail de soudure est *la réception des électrodes ou baguettes à souder*. On peut démontrer que les baguettes à souder représentent un critère qui garantit la régularité. Des erreurs sont toujours possibles, c'est pourquoi il faudrait adopter comme règle de réceptionner les baguettes à souder, c'est-à-dire de contrôler leurs dimensions et leur enrobage et de les examiner au point de vue de la technique des matériaux et de la soudure. Seulement lorsque les résultats sont favorables, ces électrodes devraient être admises.

Un essai complet devrait s'étendre à environ 10 000 électrodes ou à la longueur correspondante de baguettes à souder. Dans les ateliers où l'on utilise différents types de baguettes à souder, il faut faire très attention à ce que l'on utilise exclusivement la marque prévue. Seule une direction d'atelier aimant l'ordre pourra remplir ces conditions.

### 3° — *Contrôle des soudeurs.*

On a beaucoup écrit sur le *contrôle des soudeurs*. Nous sommes d'avis que le contrôle habituel par prélèvement de quelques éprouvettes de soudure n'a pas une grande signification. Pour des raisons pratiques et des raisons de forme on ne peut pas supprimer ces contrôles. Premièrement on ne peut pas employer n'importe quel soudeur et secondement le prélèvement d'éprouvettes compliquées

a toujours une influence favorable. Des cours et des discussions continues avec les soudeurs avant et pendant le travail par une personne de la branche et expérimentée qui suivrait le travail auraient une influence favorable sur la qualité des travaux de soudage. Souvent il suffirait d'une simple explication. Il faudrait faire plus que jusqu'à présent pour la formation théorique et pratique des soudeurs. Il serait souhaitable que l'on crée une institution pour la formation de bons soudeurs dignes de confiance.

#### 4° — *Contrôle des travaux de soudage.*

En ce qui concerne le contrôle des travaux de soudage il existe une méthode tout-à-fait adéquate qui est celle des rayons X. Les autres méthodes, électromagnétiques et acoustiques, ne sont pas sûres. Le perçage et le découpage d'éprouvettes ne donnent que des résultats partiels et ne permettent pas de tirer des conclusions sur la qualité moyenne des soudures. La combinaison des rayons X et du découpage d'éprouvettes donnent les meilleurs résultats. L'application de ce procédé est cher et demande beaucoup de temps et les trous que l'on a fait peuvent engendrer dans certains cas des tensions résiduelles très défavorables. L'emploi des rayons X donne d'excellents résultats pour les soudures bout à bout lorsqu'une personne expérimentée exécute ce travail. Il est difficile de prendre les radiographies lorsqu'il s'agit de soudures d'angle ou d'autres soudures, car l'épaisseur de l'acier est dans ces cas très variable. L'application des rayons X se perd car on ne possède jusqu'à aujourd'hui aucune donnée sur les rapports entre l'image et la résistance des soudures.<sup>15</sup> Le procédé des rayons X ne présente pour le moment que le seul avantage d'influencer les soudeurs en ce sens qu'il permet de découvrir les fautes grossières sans attaquer la soudure, ce qui incite à un travail soigné. Malheureusement ce procédé est cher et il est actuellement impossible de contrôler ainsi toutes les soudures.<sup>16</sup>

Les soudures restent donc, dans le vrai sens du mot, un travail de confiance. Il ne faut par conséquent exercer aucune pression sur les soudures pour une accélération du travail lorsqu'il s'agit de travaux importants. Il faut proscrire le salaire aux pièces. Dans les ouvrages soumis à de fortes sollicitations dynamiques on doit attacher une grosse importance aux soudures pénétrantes qui exigent que l'on ouvre et que l'on nettoye d'un côté la racine déjà soudée. Il est nécessaire de faire contrôler ces différentes étapes de travail. La mise à jour des fissures, des fautes et des négligences est rendue très facile par le jet de sable. Il serait recommandable de prescrire ce procédé de nettoyage.

<sup>15</sup> Un essai spécial sur une soudure en K donne une résistance aux efforts répétés non alternés de:

|                            |                          |
|----------------------------|--------------------------|
| 14 à 16 kg/mm <sup>2</sup> | pour un travail soigné   |
| 12 à 14 »                  | pour un bon travail      |
| 9 à 11 »                   | pour un mauvais travail. |

La comparaison des photos aux rayons X permet de reconnaître cette graduation mais non d'une façon tout-à-fait concluante.

<sup>16</sup> Eng. N.-Record, 15. XI. 34. Lors de la construction de l'usine hydro-électrique du Boulderdam on a photographié aux rayons X toutes les soudures des 45 000 t de conduites forcées (env. 120 km de soudures). L'appréciation se fit sur la base du A. S. M. E. boiler code radiographs.

The Engineer, 19. IV. 35, Pullin: Radiology in the Welding Art.

### Résumé.

1° — Dans le présent rapport, après une courte introduction sur la définition des tensions dues à la chaleur et au retrait, l'auteur décrit une installation pour le mesurage de ces tensions. Il est parlé ensuite des résultats des mesures exécutées sur 4 ouvrages ainsi que de la signification et de l'effet des zones influencées par le soudage qui peuvent avancer la rupture statique ou la rupture à la fatigue.

2° — Les mesures démontrent que les tensions dues à la chaleur et au retrait ont une grosse importance. On peut lutter là-contre en diminuant les sections des soudures et en évitant les accumulations de soudures.

3° — Les zones influencées par le soudage et leurs effets sur les parties de la construction ne sont pas assez expliquées. Il est urgent d'entreprendre des recherches systématiques sur les zones influencées elles-mêmes ainsi que sur les influences du genre de courant, de la composition des électrodes, du diamètre des électrodes (intensité du courant) et des formes des sections des pièces.

4° — Il y a peu de chances que les tensions de retrait disparaissent avec le temps sous l'effet du trafic, ainsi que cela a été dit souvent, ce qui serait le cas s'il se produisait des surtensions qui pourraient avoir comme conséquence des déformations indésirables et dangereuses ou même des fissures.

5° — L'art de la construction des ouvrages soudés consiste en la conservation de la résistance à la fatigue de l'acier, c'est-à-dire dans le choix des formes de construction et de soudure appropriées qui évitent les effets d'entailles et les transitions brusques. Les zones influencées ne doivent pas se trouver dans les endroits les plus sollicités et doivent être entourées d'une masse suffisante de métal non influencé. Si l'on veut conserver une forme de soudure déterminée, il faut dans certains cas usiner les cordons. Nous aurons dans ce cas des soudures lisses qui permettront l'application d'une peinture plus résistante, un entretien plus facile et plus de facilité pour la mise à jour des fissures.

6° — On ne peut pas travailler *trop* soigneusement dans l'exécution des ouvrages soudés. L'idée que l'on peut remplacer le rivetage par un soudage *bon marché* est fautive. La soudure, en tant que procédé beaucoup plus compliqué que le rivetage, exige un contrôle continu aussi bien de la direction de l'atelier que de celle de la construction. Le contrôle prend beaucoup de temps et doit être exécuté dans certains cas par des gens du métier spécialisés. Pour obtenir un travail exact, il faut dessiner les cordons de soudure.

7° — En exigeant le contrôle des soudeurs et de leur travail on n'a pas encore pris toutes les précautions nécessaires. On doit aussi faire en sorte qu'il soit possible d'exécuter un bon travail en contrôlant les électrodes, les installations de soudage et leurs accessoires, l'équipement des soudeurs et leur qualification. Les soudeurs doivent être orientés sur la portée de leur travail et ils doivent être dirigés et continuellement surveillés par une personne qualifiée.

8° — Ce n'est que lorsque toutes ces conditions seront remplies que l'on pourra être assuré de la bonne qualité des ouvrages soudés. Il serait souhaitable que ces explications donnent lieu à un nouvel examen de toutes les questions qui se posent avec l'introduction de la soudure.

Leere Seite  
Blank page  
Page vide